

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Крижановський Володимир Володимирович

УДК 621.3.049.774:621.373

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ШУМОВИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ  
ПАРАМЕТРІВ НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ АНАЛОГОВИХ  
ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ З КЛЮЧОВИМИ РЕЖИМАМИ РОБОТИ

05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Донецькому національному університеті Міністерства освіти та науки України, м. Вінниця

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Пицюга Володимир Григорович,**  
Донецький національний університет,  
доцент кафедри радіофізики та кібербезпеки

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Карпуков Леонід Матвійович,**  
Запорізький національний технічний університет,  
завідувач кафедри захисту інформації

кандидат технічних наук, доцент  
**Гавва Дмитро Сергійович,**  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
доцент кафедри основ радіотехніки

Захист відбудеться 9 лютого 2016 року о 13-00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 при Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «\_\_\_\_\_» грудня 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В сучасних радіотехнічних системах важливою проблемою є підвищення швидкості передачі інформації, що разом з іншими чинниками потребує зменшення рівня власних шумів пристрою, а для мобільних пристроїв – зниження потужності, яка використовується на один біт інформації. Ці задачі потрібно вирішити у напівпровідникових інтегральних схемах (ІС), які задовольняють вимогам масового виробництва та низької вартості. Однією з технологій, що дозволяє отримати пристрої низької вартості, є технологія компліментарних польових транзисторів з ізольованим затвором (КМОН, метал-оксид-напівпровідник – МОН) на кремнії. Ця технологія має багато різновидів, з яких для аналогових пристроїв зручними є технології з топологічними нормами 0,25, 0,18 та 0,13 мкм.

Але при практичному здійсненні цієї концепції виникає багато теоретичних та схемотехнічних задач: побудова оптимальних схем та вибір режимів роботи пристрою з точки зору частотних, шумових, енергетичних та технологічних вимог.

Традиційні рішення, які виконувались на дискретних елементах, при їх перенесенні на інтегральну мікросхему не здатні забезпечити вимоги низької потужності споживання, низьких нелінійних спотворень та малого рівня шуму внаслідок значного впливу паразитних параметрів субмікронних активних елементів на характеристики системи, тому виникають наукові задачі вивчення процесів перетворення енергії та сигналів у аналогових ІС надвисокочастотного діапазону (НВЧ), пошук та моделювання схемотехнічних рішень для побудови трансиверів з низьким рівнем шуму, малим споживанням енергії, які задовольняють вимогам стандартів передачі інформації як у вузько смугових, так і в надширокосмугових системах.

Не зважаючи на велику кількість робіт за цією тематикою, залишаються не до кінця дослідженими питання побудови в інтегральному виконанні трансиверів та їх складових блоків – змішувачів, підсилювачів НВЧ, генераторів радіоімпульсів та інших. Для цього потрібно з'ясувати залежності коефіцієнту шуму від конструктивних параметрів ІС, режиму роботи транзисторів та пристроїв в цілому. Також не з'ясовані питання залежності рівня шуму у ключових пристроях від параметрів зовнішніх впливів, зокрема сигналів синхронізації.

Розробку аналогових інтегральних схем з низькою потужністю живлення стримує недостатній розвиток методів побудови аналогових вузлів ВЧ та НВЧ інтегральних схем. Усунення цього протиріччя є однією з актуальних **задач** сучасної мікрохвильової техніки, яка полягає в необхідності удосконалення відомих та розробки нових методів побудови аналогових вузлів приймачів-передавачів НВЧ діапазону.

Таким чином, тема дисертаційного дослідження, спрямованого на розвиток методів та засобів побудови пристроїв ВЧ та НВЧ з поліпшеними енергетичними та шумовими параметрами у вигляді аналогових інтегральних схем, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами:** дисертаційні дослідження зв'язані з плановими НДР, які виконувались на кафедрі радіофізики Донецького національного університету: «Розробка високоефективних підсилювачів потужності на базі схем із маніпуляцією гармонік», № 0111U000405 (2011-2012 рр.), «Розробка просторово-розвинених схем підсилення та перетворення сигналів на базі високоефективних активних пристроїв», № 0113U001534 (2013-2014 рр.) (здобувач – виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є поліпшення енергетичних та шумових параметрів інтегральних приймачів-передавачів з низьким споживанням енергії на основі КМОН технології за рахунок використання ключових режимів роботи.

*Об'єкт дослідження* – процеси перетворення енергії та сигналів у ключових пристроях підсилення, генерації та перетворення сигналів на основі польових транзисторів.

*Предмет дослідження* – методи та засоби підвищення енергетичних параметрів, зниження рівня шуму у автогенераторах, підсилювачах та змішувачах ВЧ та НВЧ апаратури, в тому числі у інтегральному виконанні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс наступних взаємопов'язаних часткових завдань:

1. Удосконалити метод розробки приймачів/передавачів НВЧ діапазону у інтегральному виконанні зі зниженим споживанням енергії для побудови масових телекомунікаційних систем;

2. Удосконалити конструкцію субгармонійного змішувача для зменшення споживання енергії, зниження флікер шуму та усунення проходження сигналу гетеродину на вхід приймача;

3. Провести дослідження впливу і моделювання механізму генерації флікер шуму у пасивному змішувачі внаслідок захоплення електронів у пастки діелектрика під затвором ПТ;

4. Удосконалити метод формування радіоімпульсу для надширокосмугового передавача в інтегральному виконанні з метою отримання мінімальної енергії, що споживається, на один імпульс при умові виконання вимог стандартів на рівень спектральної густини потужності;

5. Удосконалити метод формування експоненціальної залежності коефіцієнта передачі у перетворювачі: напруга на вході – напруга на виході;

6. Дослідити вплив параметрів схеми, режиму роботи на флікер шум у автогенераторах класу E, удосконалити конструкцію автогенератору класу E та метод його розрахунку.

**Методи дослідження:** При вирішенні поставлених задач використовувались: математичний апарат загальної теорії електричних кіл, теорії напівпровідникових пристроїв, методи чисельного аналізу та експериментального дослідження характеристик макетів пристроїв.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше теоретично обґрунтовано та показано реалізацію подвійного балансного змішувача на КМОН транзисторах з диференційним управлінням за 0,18 мкм технологією у якості субгармонійного змішувача з низьким рівнем флікер шуму, що дозволило отримати низький рівень флікер шуму та високі параметри лінійності.

2. Вперше теоретично обґрунтовано та використано несиметричну схему з'єднання малошумлячого підсилювача та подвійного балансного змішувача у приймачі прямого перетворення, що дозволило зменшити споживання енергії при збереженні рівня флікер шуму та показників лінійності.

3. Дістав подальшого розвитку метод формування спектру надширокосмугового передавача шляхом генерації радіоімпульсу трикутної форми, що відрізняється

від існуючих засобом управління автогенератором шляхом його вмикання та вимикання доданими ключами, що дозволило отримати потрібну частотну залежність спектральної густини потужності, яка відповідає умовам стандартів.

4. Розвинуто метод формування експоненціальної характеристики перетворювача напруги за апроксимаційним виразом, який відрізняється урахуванням нелінійностей польових транзисторів у процесі перетворення напруги, що дозволило зменшити напругу живлення перетворювачу та збільшити його динамічний діапазон.

5. Удосконалено метод розрахунку автогенератору класу E зі складним колом зворотного зв'язку, що відрізняється виділенням частини кола зворотного зв'язку з малою зміною зсуву фаз, це дозволило отримати сумісну систему рівнянь та отримати строгий розрахунок елементів схеми, яка дозволяє змінювати частоту без зміни вихідної потужності автогенератору.

**Практичне значення отриманих результатів** дисертаційної роботи полягає у наступному:

1. Розроблені технічні рішення та режими роботи дозволяють використовувати досліджені варіанти подвійних балансних змішувачів, що працюють у пасивному режимі перемикачів струму, у якості вузлів приймачів-передавачів в інтегральному виконанні за КМОН технологією з мінімальним споживанням енергії;

2. Розроблено ряд нових конструкцій змішувачів та трансиверів з їх використанням, підсилювачів НВЧ, аналоговий інтегратор та функціональний перетворювач в інтегральному виконанні на основі КМОН технології з 0,18 мкм проектними нормами.

3. Розроблено нову конструкцію та досліджено шумові характеристики автогенераторів класу E.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес у програмі навчального курсу «Напівпровідникова електроніка», розділ «Аналогові інтегральні схеми», де розглядається пасивний змішувач з малим шумом, і при виконанні курсових та дипломних робіт зі спеціальності «Радіофізика й електроніка». Також є впровадження у роботи, які проводяться в ІРЕ НАН України. Дані про впровадження результатів підтверджуються відповідними актами.

**Достовірність результатів** дисертаційної роботи обумовлена коректним використанням строгих методів параметричного синтезу радіотехнічних пристроїв, а також збігом результатів експериментальних досліджень виготовлених ІС та макетів пристроїв з результатами моделювання процесів на ЕОМ і результатами аналітичного розрахунку.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися на конференціях: 12, 14 и 18 міжнародній Кримській конференції «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь, 2004 и 2008; IEEE Asian Solid-State Circuits Conf., Nov. 2005; IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2007, ISCAS 2007; IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2007. CICC '07; 4-й та 9-тій міжн. молодіжній наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій (РТ-2008 та РТ-2013)», Севастополь, 2008, 2013; 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2008, Sevastopol, XIth and XIIth International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and

Computer Science. TCSET» Lviv – Slavske, Ukraine, 2012 and 2014; на наукових конференціях ДонНУ за підсумками науково-дослідної роботи 2010, 2012 pp.

**Публікації.** Основні результати досліджень надруковані у 20 працях, в тому числі в 6 статтях, виданих у вітчизняних та закордонних віданнях, 1 статті у журналі не з переліку ВАКу, в 1 патенті України на корисну модель, в 1 патенті України на топологію інтегральної мікросхеми, у 11 докладах на міжнародних науко-технічних конференціях.

**Особистий внесок здобувача.** У працях, опублікованих у співавторстві, авторів належать в [1] аналіз проблеми, написання роботи, у [2, 9] – проведення моделювання та оптимізація топології, у [3, 4, 6, 10, 11, 13] – аналіз, моделювання, розробка вузлів пристрою, у [5, 8, 12, 14-17] – побудова моделі, проведення розрахунків, у [9] – розробка пристрою, у [7, 20] – ідея, проведення експериментів.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, додатків. Текст дисертації містить 153 сторінки, з яких 3 сторінки зайняті рисунками і таблицями, у тому числі 111 рисунків, 17 таблиць, додатки на 13 сторінках, список використаних джерел з 202 найменувань на 22 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** відзначено актуальність теми, сформульовано мету, задачі і методи дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Наведені інші необхідні характеристики дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено огляд науково-технічної літератури за темою досліджень, вказано на основні тенденції розвитку ВЧ та НВЧ пристроїв у напрямку побудови телекомунікаційної апаратури з малим споживанням енергії, але з характеристиками, які б задовольняли вимогам існуючих стандартів зв'язку по критеріям: рівень коефіцієнту шуму, зокрема флікер шуму ( $1/f$ ), полоса робочих частот, лінійність трактів підсилення та перетворення частоти, та інших. Наявність такого комплексу параметрів пов'язана з необхідністю масового виробництва дешевих інтегральних схем трансиверів для бездротових застосувань. Варіантом вирішення цих проблем є використання технології комплементарних транзисторів метал-оксид-напівпровідник (КМОН) з проектними нормами 0,25, 0,18 мкм та менше. Така довжина затвору забезпечує роботу транзисторів у НВЧ діапазоні, але для вирішення задач побудови аналогових блоків приймачів/передавачів (трансиверів) потрібно розробити їх нові конструкції з урахуванням фізичних процесів у ІС з субмікронними розмірами. До розглянутих вузлів відносяться змішувачі, генератори безперервних коливань та радіоімпульсів, підсилювачі з підвищеним ККД та функціональні перетворювачі напруги. Проведений огляд показав, що актуальною є потреба зменшення потужності, яка споживається, та зменшення рівня фазових шумів у трансиверах, які виконані у вигляді ІС, разом з поліпшенням інших параметрів пристроїв.

У **другому розділі** розглядається розробка трансиверу з малим споживанням енергії за стандартом IEEE 802.15.4. Методом вирішення цієї задачі є спрощення електричної схеми пристрою з одночасним підвищенням параметрів його складових частин. Спрощення схеми трансиверу досягається використанням техніки прямого перетворення частоти, коли спектр сигналу переноситься з НВЧ одразу до бейсбанд діапазону.

Дослідження були зосереджені на вузлах високочастотної частині трансиверу – малощумлячому підсилювачі та змішувачі. Використовується пасивний режим роботи, де транзистори працюють як ключі, переходячи зі стану «Відчинено» у стан «Зачинено» і навпаки.

Вперше розроблено пасивний субгармонійний змішувач, який працює при частоті гетеродина ( $\omega_{LO}$ ) у два рази менше, ніж несуча частота сигналу, що приймається ( $\omega$ )  $\omega_{LO} = \omega/2$ . При такому співвідношенні частот значно зменшується рівень сигналу гетеродина на вході приймача, що зменшує завади, які даний приймач може створювати іншим, та зменшується зворотна дія сигналу гетеродина на ВЧ вхід, що унеможлиблює зміщення складової постійної напруги на виході змішувача і не порушує роботи наступних каскадів підсилення. Схема змішувача показана на рис. 1, часові діаграми порядку перемикавання його елементів показані на рис. 2.

Проведено оптимізацію розмірів транзисторів за критерієм мінімізації коефіцієнту шуму з урахуванням обмеженої потужності гетеродина, та для оптимального варіанту обраховані залежності коефіцієнту шуму від рівня постійної напруги, яка змінює час перемикавання ключів. Ці залежності представлені на рис. 3.

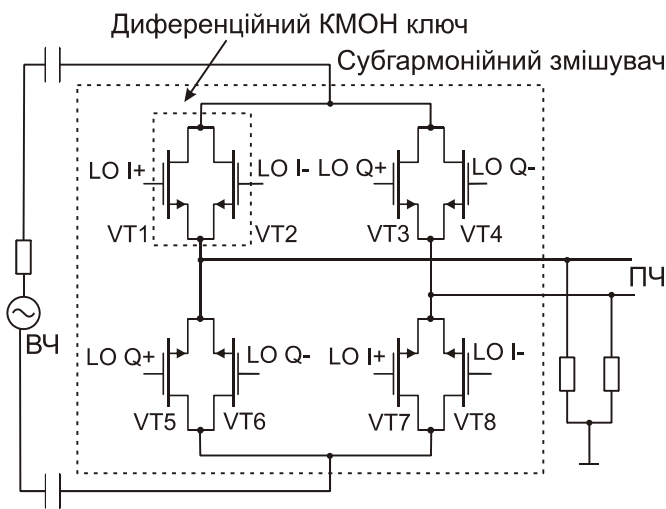


Рис. 1. Субгармонійний змішувач

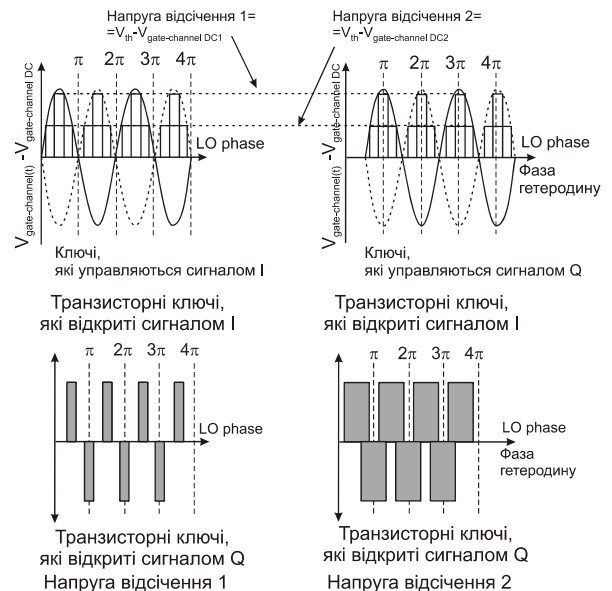


Рис. 2. Часові діаграми відкриття ключів

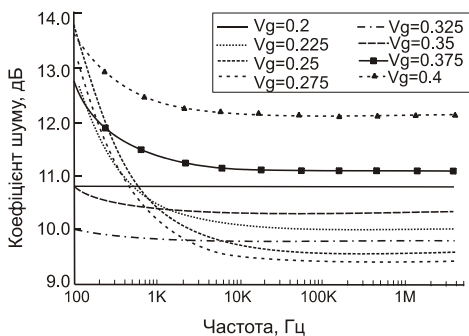


Рис. 3. Частотна залежність рівня шуму від постійної напруги на затворах транзисторів

Табл. 1

Коефіцієнт передачі	-6 дБ
ПРЗ	+5,5 дБм
Мінімальний коефіцієнт шуму для однієї бокової полоси	10,6 дБ
Коефіцієнт шуму для однієї бокової полоси на частоті 100 Гц	11 дБ
Амплітуда диференціального сигналу гетеродина	0,63 В
Постійний струм змішувача	0 А
Напруга живлення	1,25 В

Як можна побачити, частота, до якій рівень флікер шуму перевищує рівень «білого» шуму, складає декілька кілогерц, що фактично свідчить про роботу у режимі без флікер шуму. Параметри змішувача наведені у табл. 1. Таким чином, вперше досліджено таку топологію як пасивний субгармонійний змішувач, та отримано параметри, які дозволяють використовувати цей пристрій у приймачах-передавачах за стандартом IEEE 802.15.4.

Для дослідження впливу захоплення електронів у пастки в діелектрик під завором на рівень флікер шуму у змішувачі було складено алгоритм та програму розрахунку спектру шуму, який зумовлюється випадковою зміною провідності каналу транзистора. На рис. 4 зображена еквівалентна схема подвійного балансного змішувача, а на рис. 5 – варіант розрахунку для одного з наборів параметрів субмікронних транзисторів. Розроблений алгоритм розрахунку може використовуватися для аналізу більш складних пристроїв.

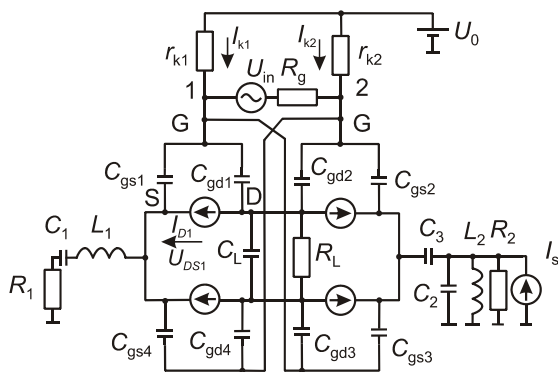


Рис. 4. Еквівалентна схема змішувача

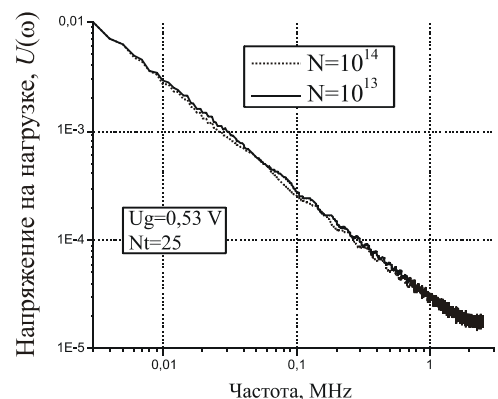


Рис. 5. Розрахований спектр шуму

На рис. 6 зображено конструкцію вхідної частини трансиверу, виконаного у вигляді ІС за 0,18 мкм КМОН технологією – підсилювач з малим рівнем шуму та змішувачі на два канали зі зсувом фази на  $90^\circ$  для обробки прийнятого сигналу без спотворень, які можуть виникнути при застосуванні цифрової модуляції у сучасних радіосистемах. Трансивер використовує техніку прямого перетворення частоти, коли сигнал діапазону 2,4 ГГц перетворюється у бейсбенд сигнал. Оптимізацію структури трансиверу було проведено шляхом узгодження параметрів його складових блоків для отримання потрібних показників при мінімізації споживання енергії.

У конструкції приймача з метою зниження споживання постійного струму від джерела живлення було використано каскодну схему підсилювача з малим рівнем шуму. Розрахунок малощумлячого підсилювача було проведено методом одночасного узгодження по шуму та потужності з урахуванням обмеженого споживання постійного струму. Цей розрахунок стає можливим при додаванні ступенів свободи у набір параметрів малощумлячого підсилювача. В наведеній схемі це виконується за рахунок додавання ємності  $C_{ex}$ , що дозволяє зменшити споживання струму підсилювачем при збереженні його шумових характеристик на високому рівні.

Пасивний подвійний балансний змішувач працює у так званому режимі «перемикання струму», який характеризується низькими імпедансами генератора сигналу (малощумлячий підсилювач) та навантаження (трансімпедансний підсилювач). Як показало моделювання, у такому режимі можна отримати низький коефіцієнт шуму



(7,3 дБ) при добрій лінійності по спотворенням другого та третього порядку (IP2 сягає 40дБм, IP3 – -8 дБм).

Несиметричне включення змішувача з використанням ємності  $C_{bp}$  дозволило зменшити споживану потужність і зберегти переваги кільцевого змішувача – малий рівень нелінійних спотворень другого порядку та мале проникнення сигналу гетеродину на ВЧ вхід. При цьому тільки один параметр змінився – коефіцієнт перетворення зменшився на 3 дБ. Оскільки потужність гетеродину було задано та обмежено споживанням постійного струму, то було проведено оптимізацію розмірів транзисторів для отримання оптимуму за коефіцієнтом шуму, бо збільшення розмірів транзисторів знижує флікер шум, але значне збільшення ширини каналу транзистора веде до збільшення його ємності, внаслідок чого зменшується сигнал гетеродину, падає коефіцієнт перетворення та може зрости коефіцієнт шуму. Оптимальним розміром nМОН транзисторів для даного проекту було визначено 130/0,18 мкм.

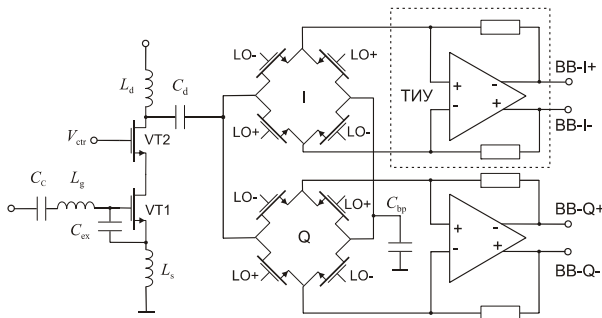


Рис. 6. Вхідна частина приймача прямого перетворення

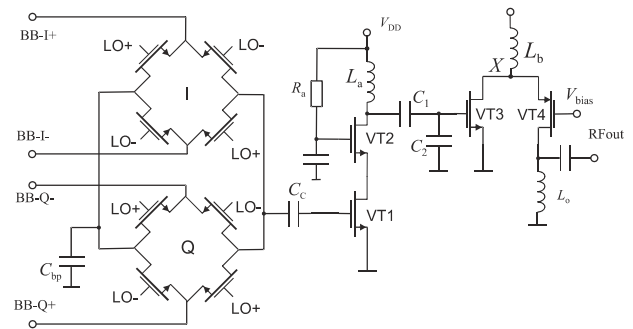


Рис. 7. Вихідна частина передавача

Даний трансивер було виготовлено за КМОН технологією (рис. 8), приймач мав площу  $2 \text{ мм}^2$ , передавач –  $1,62 \text{ мм}^2$ , споживання струму – 3,5 мА та 3 мА, відповідно, (що найменше серед відомих на момент виготовлення) при напрузі живлення 1,8 В. Коефіцієнт шуму виготовленого зразка за результатами вимірювань показано на рис. 9. Трансивер задовольняє усім вимогам стандарту IEEE 802.15.4.

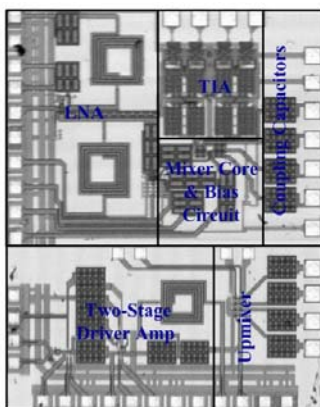


Рис. 8. Мікрофотографія ВЧ частини трансивера

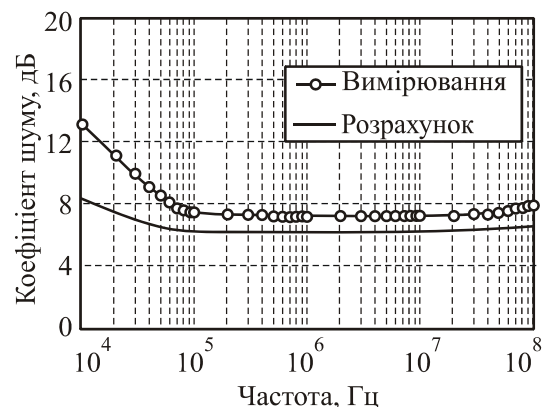


Рис. 9. Коефіцієнт шуму приймальної частини за результатами вимірювань

Для приймача діапазону 5,15-5,825 ГГц з метою зменшення потужності, що споживається, розроблено нову конструкцію змішувача на основі схеми Гамільтона, об'єднану з перетворювачем сигналу з несиметричного виду в симетричний, що до-

зволило знизити потужність, що споживається приймачем, при коефіцієнті шуму змішувача 7,1 дБ та збільшити його показник нелінійності третього порядку (IP3) до 6,6 дБм.

У третьому розділі проведено дослідження функціонування та розробка генератора радіоімпульсів та трансивера на його основі для надширокопasmової системи зв'язку. Система працює за стандартом IR-UWB – імпульсний радіозв'язок у надширокій смузі частот. Для її роботи необхідно виконати умови: спектральна густина потужності повинна відповідати обмеженням, які встановлює комісія зі зв'язку (FCC) у діапазоні 3,1-10,6 ГГц, придушення бічних пелюсток має бути більше 10 дБ при роботі в приміщенні та більше 20 дБ – зовні, передавач, який працює у нижній смузі частот, повинен перемикатися між трьома діапазонами зі смугою 528 МГц у діапазоні 3,1-5,1 ГГц.

Найбільш застосовуваним методом роботи у цьому діапазоні є випромінювання коротких імпульсів. У розробленому передавачі використовується метод генерації радіоімпульсів, який дає змогу працювати у різних діапазонах загального спектру частот при перестроюванні центральної частоти радіоімпульсу. Розроблений передавач є простим, але відповідає вимогам стандартів. На рис. 10 зображено блок-схему високочастотної частини передавача та мікрофотографія виготовленого експериментального зразка.

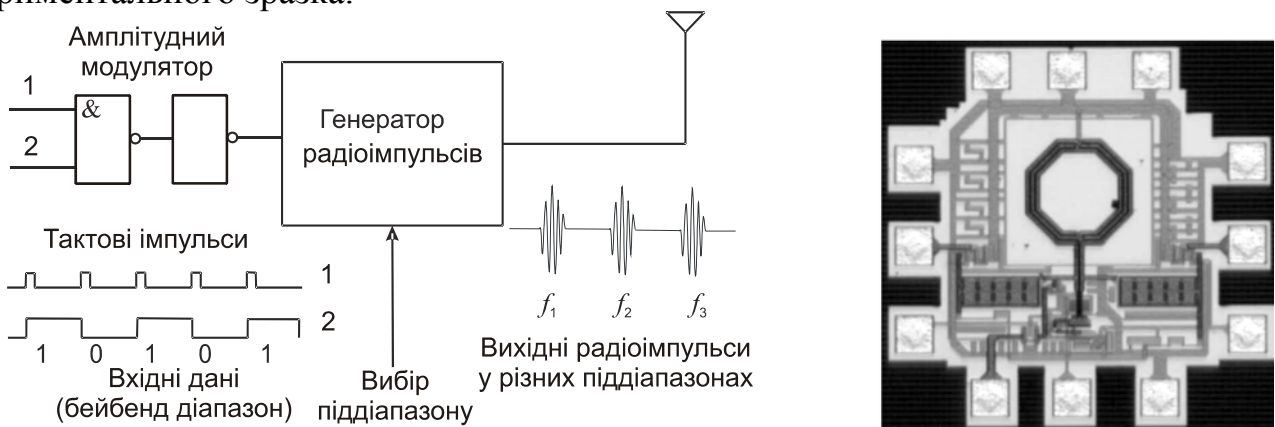


Рис. 10. Запропонований передавач для багатодіапазонної системи зв'язку (а) та його мікрофотографія,  $580 \times 680 \text{ мкм}^2$  (б)

Схему багатодіапазонного генератора радіоімпульсів зображено на рис. 11. Генератор виконано за схемою мультивібратору, який містить два додаткових перемикача, один з яких (SW1) перемикає набір конденсаторів для зміни частоти генерації, а другий (SW2) вмикає та вимикає генератор, завдяки чому знижується споживання постійного струму. Завдяки точно розрахованому часу зростання та спаду імпульсу, при його сумарній довжині порядку наносекунд, формується потрібна смуга частот вихідного спектру сигналу. Якщо зробити час зростання та час спаду імпульсу рівними, то спектр такого імпульсу буде мати мінімальний рівень бічних пелюсток. Ці інтервали часу описуються виразами для часу зростання  $t_r$  та часу спаду  $t_f$ , де  $Q$  – добротність коливального контуру,  $A_{OL}$  – коефіцієнт підсилення з розірваним колом зворотного зв'язку,  $C$  – еквівалентна ємність контуру:

$$t_r = 4,39Q / [(A_{OL} - 1)\omega_0] = 4,39CR_T / (A_{OL} - 1),$$

$$t_f \approx \tau \ln 9 = 4,39CR_D,$$

з яких видно, що забезпечивши рівність опорів  $R_T$  для включеного генератору та  $R_D$  для виключеного (при  $A_{OL} = 2$ ), можна зробити імпульс симетричним. Щоб досягти цього, потрібно ввести додаткове згасання у контур  $LC$  на відрізок часу, коли імпульс спадає (рис. 12.) У схему введено додаткові ключі на МОН транзисторах, які в додаток до перерахованих виконують функції вирівнювання часів зростання та спаду імпульсів, завдяки чому вдалося отримати потрібну потужність в антені без додаткового широкосмугового підсилювача та потрібний рівень придушення бокових пелюсток спектру без додаткових фільтрів, що значно поліпшило габарити передавача та зменшило його енергоспоживання.

Розміри транзисторів, які складають SW1 та SW2, було оптимізовано за критерієм опору у відкритому стані, і вони складають 50 мкм/0,18 мкм та 25 мкм/0,18 мкм для NMOS і PMOS транзисторів, відповідно. Це дозволило отримати потрібні залежності спектральної густини потужності спектру вихідного сигналу.

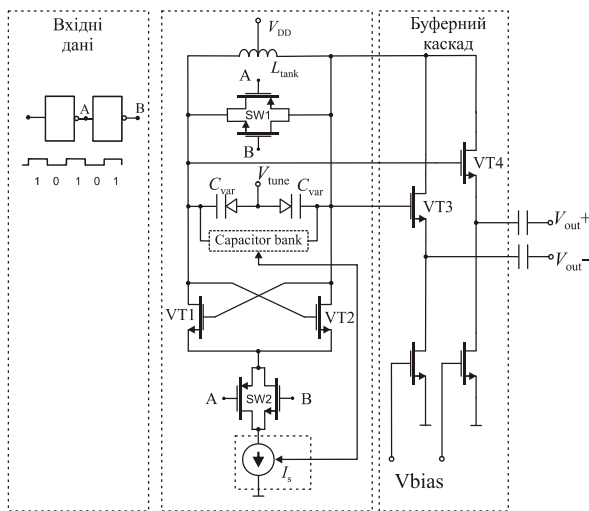


Рис. 11. Схема генератора радіоімпульсів

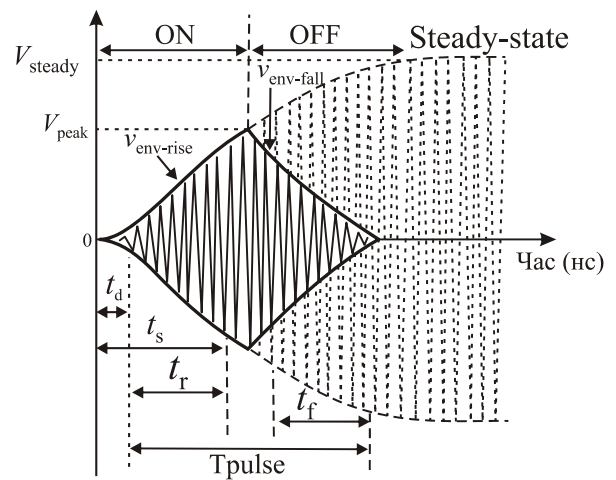


Рис. 12. Залежність форми вихідного сигналу від часу

Розроблений генератор генерує послідовність імпульсів з тривалістю 3,5 нс. Максимальна частота проходження імпульсів обмежена їх перекриттям та складає 200 МГц.

Цей генератор використано у трансивері з імпульсною модуляцією (On-Off Keying (OOK)). За результатами вимірювання при частоті 100 кГц, 20 МГц і 100 МГц струм, що споживається передавачем, дорівнює 1,13, 225 і 1120 мкА. Таким чином, споживання енергії на один імпульс складає 16,8 пДж, що добре підходить для систем з малим споживанням енергії.

Іншим методом генерації сигналу UWB є метод генерації на основі імпульсу, форма якого відповідає формі сьомої похідної від Гаусового імпульсу. У новій схемі це робиться за рахунок додавання до схеми формування сигналу у формі 5-ї похідної ще компактної схеми двократного диференціювання сигналу. У цій схемі пере-

даточна функція записується співвідношенням  $T(s) = \frac{V_0(s)}{i_0(s)} = \frac{R_L L_d C_d s^2}{C_d L_d s^2 + C_d R_L s + 1}$ , де

$s = j\omega$ ,  $L_d$  – вхідна паралельна індуктивність,  $C_d$  – послідовна ємність,  $R_L$  – опір навантаження. Вихідна напруга тоді може бути апроксимована як

$V_o(s) \cong R_L L_d C_d s^2 i_0(s)$ , і вихідна напруга є другою похідною вхідного струму. Це дозволило за результатами моделювання отримати імпульс оптимальної форми, зі спектром, що задовольняє стандартам і не потребує додаткових смугових фільтрів, та використаною енергією всього 4,7 пДж на імпульс, з максимальною вихідною напругою, яка відповідає вимогам передачі інформації.

На основі аналізу існуючих рішень був розроблений некогерентний трансивер, для якого були розроблені квадратор (виконуючий функцію зведення в квадрат) та аналоговий інтегратор (рис. 13, 14), які не споживають струму від джерела живлення при відсутності сигналу, який приймається, та задовольняють вимогам стандартів зв'язку. Коли надходить вхідний імпульс, транзистори VT1 та VT2 відкриваються, у той же час ключ S3 закривається сигналом тактових імпульсів, що приводить до заряджання ємностей C1 і C2. За рахунок різного струму скрізь транзистори накопичується різний заряд і відповідно з'являється різна напруга на вході буферного каскаду. При чутливості приймача -70 дБм на виході інтегратора формуються імпульси амплітудою 330 мВ, чого достатньо для відновлення інформації, що передається.

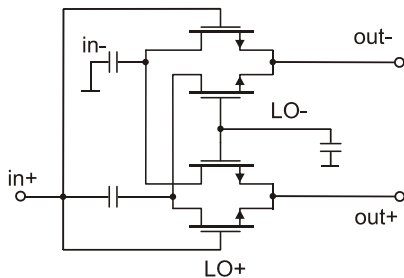


Рис. 13. Пасивний змішувач, що виконує функцію зведення в квадрат

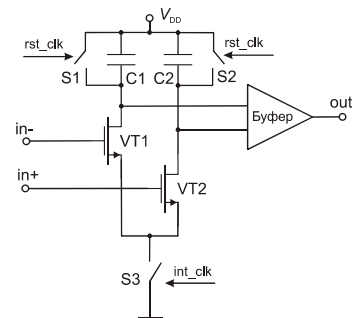


Рис. 14. Аналоговий інтегратор

Розроблений трансивер розміщено на кристалі 1,3 мм<sup>2</sup> без контактних площадок, він споживає 3,5 мА без обміну даними, при частоті імпульсів даних 100 МГц додатково споживаються 6,1 мА при напрузі живлення 1,5 В.

Для використання у трансивері на діапазон 4,1-4,6 ГГц було розроблено підсилювач у вигляді ІС з параметрами 47,5% ККД при напрузі 1,8 В на потужність 34,7 мВт. На рис. 15 зображено топографію ІС. Один з варіантів топографії цієї мікросхеми було зареєстровано в Україні. Мікросхема являє собою інтегральне виконання підсилювача потужності для використання у передаючих підсистемах надшироко-смугових бездротових систем зв'язку малого радіуса дії. Підсилювач має робочу смугу 4.1-4.6 ГГц.

Топологія дозволяє виготовити вказаний пристрій з використанням високочастотної КМОН технології TSMC 0,18, яка має наступні характеристики: мінімальна довжина затвору транзистора 0,18 мкм, наявність «глибокого N-колодзя» (Deep N-Well) для виготовлення ізолюваних від підложки транзисторів та додаткової ізоляції електричних завод, наявність Метал-Ізолятор-Метал (МІМ) конденсаторів, один шар полікристалічного кремнію, 6 шарів металізації та верхній шар металізації підвищеної товщини для виготовлення котушок індуктивності.

У четвертому розділі розглянуто питання поліпшення характеристик інтегральних підсилювачів потужності, автогенераторів класу Е та функціональних перетворювачів напруги.

Для систем на частоту 2,4 ГГц потрібні підсилювачі в інтегральному виконанні з високим ККД, тому був розроблений підсилювач класу Е, який складається з двох блоків підсилювачів, виходи яких приєднано до кільцевого мосту на мікросмужкових лініях. Схему блока підсилювача показано на рис. 16. Параметри підсилювача було розраховано за аналітичними співвідношеннями, а потім оптимізовано спочатку у програмі схемотехнічного моделювання, а потім у програмі розробки ІС. Отримано ККД по доданій потужності 60% при вихідній потужності 0,47 Вт при напрузі живлення 1,2 В. Це вдалося досягти частково за рахунок використання зовнішніх індуктивностей, у якості яких використано виводи кристалу ІС з проволочки.

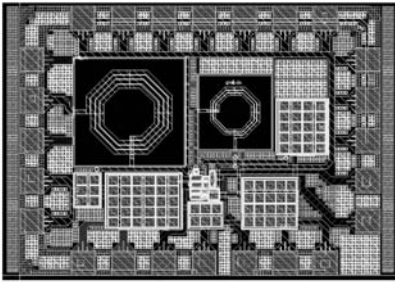


Рис. 15. Топографія підсилювача

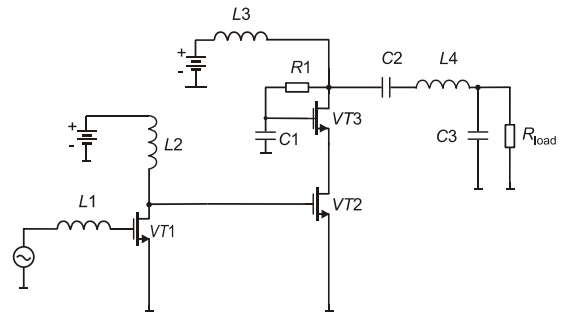


Рис. 16. Схема підсилювача класу Е

Для підсилювачів з регульованим коефіцієнтом підсилення, систем автоматичного регулювання, як і для вимірювальних систем, потрібні логарифмічні та експоненціальні перетворювачі напруги та напруги у струм (і навпаки). При розробці таких пристроїв в інтегральному виконанні при накладенні вимог малого споживання енергії та низької напруги живлення виникають проблеми з забезпеченням потрібного динамічного діапазону вихідного сигналу.

Було запропоновано використовувати диференціальний каскад для реалізації перетворювача напруги, у якому виконується приблизна залежність вихідної напруги від вхідної у вигляді  $u_{out} = u_0 e^{u_{in}/u_0}$ . Використано співвідношення

$$f(x) = e^{2ax} = \frac{e^{ax}}{e^{-ax}} \cong \frac{1+ax}{1-ax} \text{ для побудови апроксимації експоненти. Перетворювач}$$

містить два функціональні вузли – перетворювач напруги у струм, та струму у напругу (рис. 17). З наведеного рівняння видно, що якщо обоє вузлів забезпечать лінійність перетворення, то можна побудувати експоненціальний перетворювач у діапазоні 15 дБ при похибці  $\pm 0,5$  дБ, розширення діапазону відбувається за рахунок застосування нелінійності транзисторів при наближенні їх до стану насичення, що наближає функцію перетворення до експоненти. На рис. 18 зображено отримані за результатом моделювання залежності вихідної напруги від вхідної, з лінійним діапазоном 31 дБ при великому діапазоні вхідних напруг від 0,625 В до 0,58 В при напрузі живлення 1,25 В. Моделювання враховувало параметри транзисторів у 0,25 мкм КМОН технології.

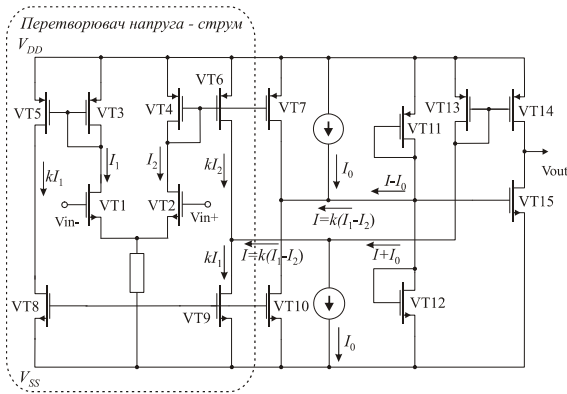


Рис. 17. Схема експоненціального перетворювача напруги

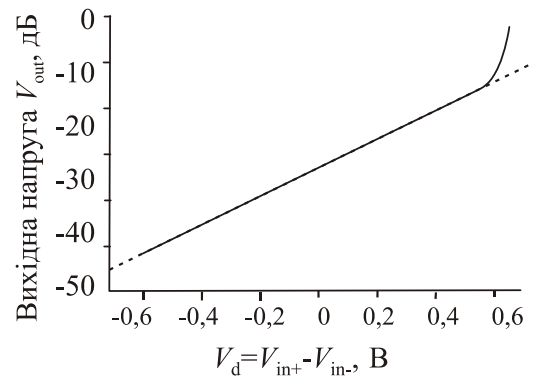


Рис. 18. Характеристики перетворювача напруга-напруга

Також було проведено дослідження з аналізу шумів автогенератора класу Е, що є перспективним кандидатом для систем з підвищеним ККД. Розроблено нову схему автогенератора з розширеною смугою частот, де зберігається високий ККД, при її зміні. Теоретично та експериментально досліджено фазові шуми у конструкціях ВЧ та НВЧ автогенераторів класу Е, вказані шляхи зменшення рівня шуму автогенераторів. Експериментально показано зменшення шумів автогенератора класу Е в режимі синхронізації зовнішнім сигналом до рівня  $-97$  дБн/Гц при відстані від несучої  $1$  кГц.

Для розрахунку шуму автогенератора по теорії лінійних (лінеаризованих) залежних від часу систем (Наїмігі, Lee, 2000) з використання функції імпульсної чутливості було проведено розрахунок цієї функції для автогенератора класу Е аналітично та з використанням чисельного експерименту. Це дає додаткові можливості для вивчення та зменшення шуму у ключових пристроях.

Розроблено нову конструкцію ВЧ автогенератора класу Е з розширеною смугою постійної вихідної потужності при зміні частоти генерації. Розроблено метод розрахунку елементів пристрою шляхом вирішення скороченої системи рівнянь для вхідного імпедансу навантажувальної ланки та зміни фази у колі зворотного зв'язку. Ця система рівнянь є сумісною бо враховує практично фіксований зсув фаз у частці запропонованої ланки кола зворотного зв'язку. В експерименті отримано зміну вихідної потужності на  $3\%$  у відносній смузі частот  $6\%$ .

Отримано добру відповідність розрахунків та експериментальних даних при вимірюванні автогенератору.

## ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних досліджень вирішена актуальна науково-прикладна задача підвищення енергетичної ефективності надвисокочастотних приймачів/передавачів у вигляді інтегральних мікросхем за КМОН технологією  $0,18$  мкм за рахунок удосконалення конструкцій і режимів роботи та розробки нових конструкцій пасивних змішувачів, схем підсилювачів, аналогового інтегратора та автогенератора з ключовим управлінням зі зменшеним споживанням постійного струму при збереженні та поліпшенні шумових характеристик пристроїв, що дозволило отримати пристрої з одними з найкращих у світі параметрами енергоспоживання на час публікації статей.

1. Удосконалено метод зменшення споживання енергії у трансиверах за рахунок використання принципу роботи приймачів прямого перетворення, у яких сигнал відразу з НВЧ діапазону переноситься до бейсбенд діапазону, в частині удосконалення малошумлячого підсилювача та використання пасивного змішувача, якій включено за несиметричною схемою. Для розрахунку цього підсилювача використовувався варіант методу одночасного узгодження по шуму та по коефіцієнту підсилення потужності за умови обмеження споживання потужності. За рахунок запровадження таких рішень розроблено трансивер з найменшим споживання енергій на час публікації роботи для високочастотної частини приймача 1,8 мВт, а для передавача – 5,4 мВт.

2. Вперше запропоновано та досліджено схему пасивного субгармонійного змішувача на КМОН транзисторах, яка дозволяє зменшити постійний струм пристрою до нуля, внаслідок чого зменшується флікер шум. Схема прибирає проходження сигналу гетеродина на високочастотний вхід змішувача та зменшує нелінійні спотворення другого та третього порядків, параметр нелінійності третього порядку (IP3) 5,5 дБм.

3. Розроблено нову схему змішувача на основі схеми Гамільтона, об'єднану з перетворювачем сигналу з несиметричного в симетричний, що дозволило знизити потужність, що споживається приймачем, при коефіцієнті шуму змішувача 7,1 дБ та його показнику нелінійності третього порядку (IP3) 6,6 дБм.

4. Розроблено алгоритм та програму розрахунку флікер шуму у кільцевому пасивному змішувачі на субмікронних МОН транзисторах, який виникає внаслідок захоплення електронів у діелектрику під затвором, що викликає випадкову модуляцію струму через транзистор.

5. Отримав розвиток метод формування радіоімпульсу у надширокосмуговому передавачі з вибором каналів у діапазоні 3,1-5,1 ГГц за рахунок використання перехідних процесів для отримання імпульсів трикутної форми. Експериментально отримано енергію на один імпульс 16,8 пДж у розробленому трансивері за стандартом IEEE 802.15.4a. Удосконалено метод формування імпульсів для надширокосмугових систем у вигляді сигналу з формою 7-ї похідної від Гаусова імпульсу. Отримано рекордно малу потужність для формування імпульсу з характеристиками, що за спектральною густиною потужності задовольняють стандартам для передавачів – 7,4 пДж/імпульс.

6. Для трансиверу з роботою у надширокопсмуговому діапазоні за принципом детектування енергії розроблено нові конструкції вузлів приймача – схему зведення в квадрат та аналоговий інтегратор, та удосконалено малошумлячий підсилювач за рахунок побудови узгоджуючої ланки. Виготовлена мікросхема має площу 1,3 мм<sup>2</sup> та споживання струму від джерела живлення 6100 мкА при частоті проходження імпульсів 100 МГц та напрузі живлення 1,5 В.

7. Удосконалено метод побудови експоненціального перетворювача напруги за рахунок використання нелінійних залежностей характеристик транзисторів, що призвело до розширення діапазону перетворювача на 16 дБ при роботі від напруги живлення 1,25 В.

8. Розроблено варіанти інтегральних схем за КМОН технологією 0,18 мкм – підсилювач на діапазон 4,1-4,6 ГГц для надширокопсмугових систем та підсилювач

класу Е на 2,4 ГГц з коефіцієнтом корисної дії по доданій потужності 60% при 0,47 Вт вихідної потужності.

9. Розроблено нову схему автогенератора класу Е та запропоновано метод розрахунку його параметрів, що дозволило розширити смугу частот, у якій дотримується постійна вихідна потужність при збереженні високого коефіцієнту корисної дії. Зміна потужності у межах 3% у відносній смузі частот 6 %.

10. Деякі результати дисертаційних досліджень провадженні в роботи, які проводяться в ІРЕ НАН України, та в учбовий процес ДонНУ, про що є відповідні акти впровадження.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Sang-Gug Lee. Technology trends in direct conversion receivers / Sang-Gug Lee, Vladimir Krizhanovskii // The Magazine of the IEEK, Sept. 2002. – V. 29, № 9. – P. 48–67.
2. Duong Q.-H. Low-voltage, high dB-linear, exponential V-V converter / Duong Q.-H., V. Krizhanovskii, Choi H.-C., Yun, S.-J., Yang M.-S., Lee S.-G. // Electronics Letters, Issue 17-19 Aug. 2004. – V. 40. – P. 1032–1034.
3. Nguyen T.-K. A Low-Power RF Direct-Conversion Receiver/Transmitter for 2.4-GHz-Band IEEE 802.15.4 Standard in 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS Technology / Nguyen T.-K., Krizhanovskii V., Lee J., Han S.-K., Lee S.-G. et al. // IEEE Trans. on MTT. – 2006. – V. 54, № 12. – P. 4062–4071.
4. Tuan-Anh Phan. A 18-pJ/Pulse OOK CMOS Transmitter for Multiband UWB Impulse Radio / Tuan-Anh Phan, J. Lee, V. Krizhanovskii, S.-K. Han, S.-G. Lee // IEEE Microwave and Wireless Components Letters, September 2007. – V. 17, № 9. – P. 688–690.
5. Макаров Д. Г. Расчет и моделирование усилителя класса Е в интегральном исполнении на частоту 2,4 ГГц / Макаров Д. Г., Крыжановский В. В. // Радиофизика и электроника: ИРЭ НАН Украины, 2007. – Т. 12, № 2. – С. 439–443.
6. Phan A. T. Energy-efficient low-complexity CMOS pulse generator for multiband UWB impulse radio / A. T. Phan, J. Lee, V. Krizhanovskii, Q. Le, S.-K. Han, S.-G. Lee // IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, 2008. – V. 55, № 11. – P. 3552–3563.
7. Крыжановский В. В. Экспериментальное исследование фазового шума ВЧ автогенератора класса Е / Крыжановский В. В., Чернов Д. В. // Вісник Донецького національного університету: Сер. А: Природничі науки, 2010. – Вип. 2. – С. 123–126.
8. Патент на корисну модель № 92161, Україна. МПК H03B 5/00. Крижановський В. В., Чернов Д. В., Охрименко Ю. Г., Данилов В. В. Автогенератор класу Е. Опубліковано 11.08.14. Бюл. №15.
9. Свідоцтво № 13 про державну реєстрацію топографії інтегральної мікросхеми, Україна. 0,18 мкм КМОН підсилювач потужності для надширокопasmових систем зв'язку малого радіусу дії / Крижановський В. В., Данилов В. В., Крижановський В. Г.; заявник і власник Донецький національний університет. – t 2012 00001 ; заявл. 09.04.2012 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23 ; пріоритет 10.12.2012. – 4 с.
10. Krizhanovskii V. 0,18  $\mu\text{m}$  CMOS LNA and mixer for wireless LAN applications Proceeding / Krizhanovskii V., Nguyen Trung Kien, Sang-Gug Lee // Microwave and Telecommunication Technology: 12<sup>th</sup> Int. Crimean Conf., 9-13 Sept. 2002: proc. – Sevastopol, Ukraine, 2002. – P. 137–138.



11. Krizhanovskii V. 0,18  $\mu\text{m}$  CMOS sub-harmonic mixer for 2.4 GHz IEEE802.15.4 transceiver / Krizhanovskii V., Lee S.-G. // *Microwave and Telecommunication Technology: 14<sup>th</sup> Int. Crimean Conf.*, 13-17 Sept. 2004: proc. – Sevastopol, Ukraine, 2004. – P. 141–142.
12. Krizhanovskii V. A Direct Conversion CMOS Front-End for 2.4 GHz Band of IEEE 802.15.4 Standard / Krizhanovskii V., Nguyen T.-K., Lee S.-G., Choi J.-C. // *IEEE Asian Solid-State Circuits Conf.*, Nov. 2005: proc. – Hsinchu, Taiwan, 2005. – P. 449–451.
13. Tuan-Anh Phan. 4.7pJ/pulse 7th Derivative Gaussian Pulse Generator for Impulse Radio UWB / Tuan-Anh Phan, Krizhanovskii V., Seok-Kyun Han, Sang-Gug Lee // *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, May 2007: proc. – New Orleans, Louisiana, USA, 2007. – P. 3043–3046.
14. Tuan-Anh Phan. Low-Power CMOS Energy Detection Transceiver for UWB Impulse Radio System / Tuan-Anh Phan, Krizhanovskii V., Sang-Gug Lee // *Custom Integrated Circuits Conference, 2007, CICC '07, IEEE*; 10/2007. – P. 675–678.
15. Принцовский В. А. Фазовые шумы автогенератора СВЧ класса E / Принцовский В. А., Крыжановский В. В. // *Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2008»*: 4-я межд. мол. науч.-техн. конф., 21-25 апреля 2008 г.: материалы конф. – Севастополь: СевНТУ, 2008. – С. 161.
16. Крыжановский В. В. Моделирование фликкер-шума в схеме смесителя на MOSFET / Крыжановский В. В., Рассохина Ю. В., Крыжановский В. Г., Бондарев Б. В. // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 18-я межд. Крымская конф.*, 8-12 сент. 2008 г.: материалы конф. – Севастополь, Украина, 2008. – С. 137–138.
17. Makarov D. G. CMOS 0.18- $\mu\text{m}$  Integrated Power Amplifier for UWB Systems / Makarov D. G., Krizhanovskii V. V., Chang Shu., Krizhanovskii V. G. // *4<sup>th</sup> Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, 15-19 Sept., 2008: proc. – Ukraine, Sevastopol, Kharkiv, KNU, 2008. – P. 153–155.
18. Krizhanovskii V. V. Experimental Study of Phase Noise in Synchronized HF Class E Oscillator / Vladimir V. Krizhanovskii // *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: XI<sup>th</sup> Int. Conf. TCSET'2012*, February 21-24, 2012: proc. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2012. – P. 171.
19. Крыжановский В. В. Моделирование функции импульсной чувствительности генератора класса E / Крыжановский В. В. // *Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2013»*: 9-а міжн. мол. наук.-техн. конф., Севастополь, 22-26 квітня 2013 р.: матеріали конф. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 66.
20. Krizhanovskii V. V. Time Domain Measurement of the Class E Oscillator Frequency Stability / Krizhanovskii V. V., Sergienko S. P. // *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: XII<sup>th</sup> International Conference TCSET'2014*, February 25 - March 1, 2014: proc. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2014. – P. 234.

## АНОТАЦІЯ

**Крижановський В.В. Методи підвищення шумових та енергетичних параметрів надвисокочастотних аналогових інтегральних схем з ключовими режимами роботи. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук 05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2015.

В результаті дисертаційних досліджень вирішена актуальна науково-прикладна задача підвищення енергетичної ефективності НВЧ приймачів/передавачів у вигляді інтегральних мікросхем за КМОН технологією 0,18 мкм за рахунок удосконалення конструкцій і режимів роботи та розробки нових конструкцій змішувачів, підсилювачів, аналогового інтегратора та автогенератора з ключовим управлінням зі зменшеним споживанням постійного струму при збереженні та поліпшенні шумових характеристик пристроїв, що дозволило отримати пристрої з рекордними параметрами енергоспоживання.

Проаналізовано подвійній балансній змішувач на МОН транзисторах у токовому режимі за умов обмежень по рівню шуму  $1/f$  та потужності гетеродину, запропоновано несиметричну схему з'єднання малошумлячого підсилювача і змішувача для зменшення енергоспоживання та рівня флікер шуму внаслідок припинення постійного струму через змішувач.

Проведено розрахунок формувача радіоімпульсів для надширококуткового передавача на діапазон 3,1-5,1 ГГц з енергією на один імпульс – 4,7 пДж.

Розроблено перетворювач напруги з експоненціальною характеристикою з розширенням на 16 дБ динамічним діапазоном. Дослідженні фазові шуми в синхронізованих генераторах класу E, розроблено його нову конструкцію.

**Ключеві слова:** змішувач, підсилювач, генератор, КМОН транзистор, аналогові інтегральні схеми НВЧ, шум  $1/f$ , автогенератор класу E.

## АННОТАЦИЯ

**Крыжановский В.В. Методы повышения шумовых и энергетических параметров сверхвысокочастотных аналоговых интегральных схем с ключевыми режимами работами. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 05.12.07 – радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2015.

В результате диссертационных исследований решена актуальная научно-прикладная задача повышения энергетической эффективности сверхвысокочастотных приемопередатчиков в виде интегральных микросхем по КМОП технологии 0,18 мкм за счет усовершенствования конструкции и режимов работы и разработки новых конструкций пассивных смесителей, схем усилителей, аналогового интегратора и автогенератора с ключевым управлением с уменьшенным потреблением постоянного тока при сохранении и улучшении шумовых характеристик приборов, что позволило получить устройства с одними из лучших в мире параметрами на момент публикации статей.

Проведен анализ двойного балансного смесителя на МОП транзистора в режиме переключения тока в условиях наложенных ограничений по уровню шума  $1/f$  и мощности гетеродина, проведена оптимизация размеров транзисторов, предложено использовать несимметричную схему соединения малошумящего усилителя и смесителя для уменьшения потребляемой узлом мощности постоянного тока и уменьшения фликкер шума вследствие исключения протекания постоянного тока через смеситель. Изготовленная по 0,18 мкм КМОП технологии микросхема имеет малую площадь кристалла и удовлетворяет требованиям стандарта IEEE 802.15.4.

Проведен расчет, моделирование и оптимизация параметров транзисторов в формирователе импульсов для многодиапазонного сверхширокополосного передатчика по 0,18 мкм КМОП технологии на диапазон 3,1-5,1 ГГц с рекордно малой энергией на один импульс – 16,8 пДж. Разработана схема формирования сигнала в виде импульса подобного по форме 7-й производной Гауссова импульса с энергией 7,4 пДж на один импульс.

Разработана схема усилителя в виде аналоговой интегральной схемы для сверхширокополосных применений на диапазон 3,1-5,1 ГГц с выходной мощностью 30 мВт и КПД 48% при напряжении питания 1,8 В.

Проведен анализ узлов преобразования напряжение-ток и ток-напряжение для построения преобразователя напряжение-напряжение с экспоненциальной характеристикой с расширением динамического диапазона на 16 дБ относительно прототипа при потреблении мощности 0,2 мВт и напряжении питания 1,25 В.

Проведено исследование фазовых шумов в автогенераторах класса E в режимах свободных колебаний и в режиме синхронизации, указано на пути снижения уровня шумов ключевых автогенераторов. Разработано новую конструкцию и метод ее расчета.

**Ключевые слова:** смеситель, усилитель, генераторы, КМОП транзисторы, аналоговые интегральные схемы СВЧ, шум  $1/f$ , автогенератор класса E.

## ABSTRACT

**Krizhanovskii V.V. Methods of improving the noise and power characteristics of microwave analog integrated circuits operating in switching modes. – Manuscript.**

Candidate's thesis by the speciality 05.12.07 – Antennas and devices of microwave technique. Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2009.

The Thesis is dedicated to improving the noise and power characteristics of mixers, amplifiers, transceivers and oscillators of microwave and RF bands, manufactured in particular using the Silicon CMOS technologies with 0.18um and 0.25um minimum channel length.

Double balanced mixer in CMOS technology was analyzed in mode of operation, namely the commutation of current, under constraints of dissipated power of local oscillator and target output  $1/f$  noise level. The non-symmetrical connection of single-ended RF signal to the differential mixer was proposed as a means of reduction of total DC power consumed by the receiver, and a means of reduction of flicker-noise thanks to elimination of DC current flowing through the mixer.

Design, simulation and parameter optimization for pulse generator intended for 3.1-5.1 GHz multiple-band Ultra Wide Band transmitter was performed. The pulse generator was manufactured in 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS technology and achieved 16.8 pJ energy consumption per pulse.

By analyzing an exponential voltage to voltage converter was developed that achieved 16 dB extended dynamic range compared with reference design. Phase noise in class E oscillators was investigated in free-running mode as well as in locked mode.

**Keywords:** mixer, amplifier, oscillator, CMOS, analog integrated RF circuits, 1/f noise, class E oscillator.

Підписано до друку 9.12.2015. Формат 60x84/16. Папір офсетний.

Друк ксерографічний.

Умов. друк. арк. 0,925. Обл.-видавн. арк. 0,85.

Наклад 100 прим. Зам. № 10135. Віддруковано з оригіналів замовника.

---

Друкарня "Твори", видавництво "Нілан-ЛТД"

ФОП Корзун Д.Ю.

21027, а/с 8825, м. Вінниця, вул. 600-річчя, 21.

Тел.: (0432) 603-000, 69-67-69. e-mail: tvory2009@gmail.com