

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр

Освітній рівень

Генератор надвисоких частот

Назва теми

КвРТР.2019022.01.03.ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр, назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

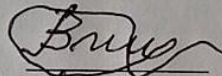
Шифр, назва

Освітня програма «Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології»

Назва

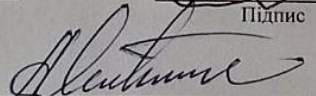
Виконав:

студент III курсу, група ТР1с-19


Підпис

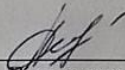
Олександр ВОЛИНЕЦЬ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник


Підпис, дата

Олександр ЯНОВИЦЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер


Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
зав. кафедри автоматизації
та комп'ютерно-інтегрованих
технологій


Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

«13» червня 2022 р.

Хмельницький 2022

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень бакалавр

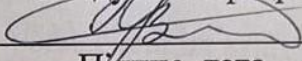
Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ


Підпис, дата

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

ВОЛИНЦЮ ОЛЕКСАНДРУ ВОЛОДИМИРОВИЧУ

1 Тема роботи: Генератор надвисоких частот

керівник роботи Яновицький Олександр Костянтинівич, к.т.н, доцент

Затверджено наказом по університету від «01» 03. 2022р. № 18

2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру: 20.05.2022р.

3 Вихідні дані до проекту

Виконати проектування і розрахунок генератора надвисоких частот.

В ході виконання кваліфікаційної роботи:

- виконати огляд принципів побудови сучасних генераторів сигналів надвисоких частот;

- визначити структурну схему генератора надвисоких частот, вибрати елементну базу;

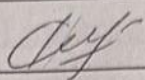
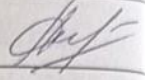
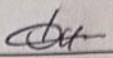
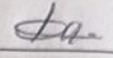
- виконати розрахунок генератора надвисоких частот.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

1) Аналітичний огляд літературних джерел 2) Принципи побудови надвисокочастотних генераторів 3) розрахунок генератора надвисоких частот.

5 Перелік графічного матеріалу. 1) Схема електрична структурна. 2) Схема електрична принципова.

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

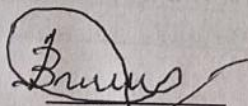
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	КОРЕЦЬКА Людмила к.т.н., доцент		
Антиплагіат	ФЕДУЛА Микола к.т.н., доцент		

7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

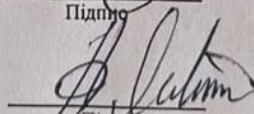
№ п/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Аналітичний огляд літературних джерел	05.03.22	всик.
2	Принципи побудови надвисокочастотних генераторів	01.04.22	всик.
3	Розрахунок генератора надвисоких частот	30.04.22	всик.
4	Висновки. Презентаційні матеріали за результатами виконання дипломної роботи.	20.05.2022	всик.

Здобувач


Підпис

Олександр ВОЛНИЦЬ
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис

Олександр Димчишин
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи:

«Генератор надвисоких частот».

Автор роботи: Волинець Олександр Володимирович

Керівник роботи: канд.техн., доц. Яновицький Олександр Костянтинович

Пояснювальна записка: 67 сторінок, 18 рисунків, 15 джерел.

Графічна частина: 2 креслення, 6 презентаційних слайдів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГЕНЕРАТОР НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ, КОЛО ФАЗОВОГО АВТОПІДЛАШТУВАННЯ ЧАСТОТИ, ТРАНЗИСТОР З БАР'ЄРОМ ШОТТКІ

Метою кваліфікаційної роботи є проектування і розрахунок генератора надвисоких частот.


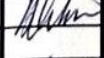

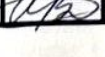
Розроблені структурна і принципова схеми генератора надвисоких частот, обрана елементна база у відповідності з частотним і динамічним діапазоном пристрою. Проведені потрібні розрахунки. Генератори, керовані напругою (ГКН), охоплені петлею фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), входять у склад синтезаторів частот. Визначена електрична схема ГКН, обрані параметри елементів. Генератор складається з малощумного цифрового фазово-частотного детектора, прецизійного зарядового насоса, програмованого еталонного дільника, програмованих лічильників А і В та двомодульного попереднього дільника.

Олександр ВОЛИНЕЦЬ
Ініціали, прізвище здобувача


Підпис, дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	6
1.1 Транзисторні генератори надвисоких частот.....	6
1.2 Структури генераторів надвисоких частот.....	8
1.3 Діод Ганна.....	19
1.4 НВЧ генератор на діоді Ганна	20
1.5 Висновки до першого розділу.....	23
2 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ...	24
2.1 Генератори на надвисокочастотних діодах.....	24
2.2 Сучасний стан виробництва генераторних діодів.....	30
2.3 Принципи побудови генераторів на діодах.....	33
2.4 Класифікація діодних генераторів.....	36
2.5 Висновки до другого розділу.....	41
3 РОЗРАХУНОК ГЕНЕРАТОРА НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ.....	42
3.1 Технічні вимоги до генератора	42
3.2 Електрична схема генератора керованого напругою.....	43
3.3 Розрахунок резонатора.....	45
3.4 Режим роботи транзистора.....	46
3.5 Аналітичний розрахунок автогенератора	50
3.6 Генератор з колом фазового підлаштування частоти	54
3.7 Польовий транзистор із затвором Шоттки.....	55

КвРТР.2019022.01.03 ПЗ				
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата
	Розробив	Волинець О.		
	Перевірив	Яновицький		
	Н. контр.	Корецька ЛО		13.06.22
	Затв.	Мартинюк В		13.06.22 р
Генератор надвисоких частот			Літера	Аркуш
Пояснювальна записка				
			2	Аркушів
ХНУ, гр. ТР1с-19-1				

3.8 Розробка гетеродину з широкосмуговим синтезатором.....	57
3.9 Висновки до третього розділу.....	62
ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	64
ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ.....	66
ДОДАТОК А. ПРЕЗЕНТАЦІЯ.....	68

ВСТУП

У сучасних технологіях телекомунікації існує проблема отримання прецизійного коливання з мінімальним рівнем бічних шумових складових. Для вирішення цієї проблеми застосовують кільця фазового автопідлаштування частоти (ФАПЧ).

ФАПЧ може бути реалізовано на елементах булевої логіки. Для цього частотно-фазовий детектор можна представити у вигляді двох RS-тригерів, що управляють схемою підкачування заряду (charge pump); дільник частоти - лічильником імпульсів. В даному випадку регулювання буде здійснюватися в імпульсному режимі, отже, кільце в такому виконанні має назву імпульсно-фазове автопідлаштування частоти (ІФАП). До недоліків кільця ІФАП, що множить, слід віднести множення завад, що приходять з опорним коливанням і потрапляють у смугу прозорості кільця (ІФАП). Для боротьби з цим недоліком доцільно ввести дробовий ноніусний тракт приведення(ТП) частоти. Перед початком розрахунку кіл ІФАП необхідно здійснити вибір компонентної бази.

У ролі частотно-фазового детектора та дільника частоти можна застосувати інтегральну мікросхему синтезатора. Визначення бажаної частоти одиничного підсилення кільця (ІФАП) проводимо за графіком рівня шумів. Для придушення сплеску бічних складових на межах вікна прозорості та підвищення зручності розрахунків можна прийняти стандартні відхилення частоти. Кільце ІФАП з частотно-фазовим детектором є системою автоматичного регулювання підсилення з (квазі) астатизмом по фазі, тому потрібно забезпечити стійкість замкнутого кільця та низьку коливність перехідного процесу при включенні. З цією метою в околицях точки перетину графіка коефіцієнта передачі розімкнутого кільця (ІФАП) з віссю абсцис нахил характеристики повинен становити -20 дБ/дек, що досягається додаванням ізодромної ланки. Оскільки нахил має становити -20 децибел на декаду, нескладно знайти частоту зламу характеристики ізодромної ланки, вона відстоїть на декаду, тобто злам має відбуватися на частоті 0,3 кГц для

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		4

кільця з дільником частоти. Так як нахил повинен становити -20 децибел на декаду, нескладно знайти частоту зламу характеристики. Якщо відома частота роботи детектора, можна знайти ємність изодромної ланки.

Для ефективного придушення частоти ОГ застосуємо петльовий ФНЧ другого порядку. Гарантоване придушення частоти ОГ досягатиметься при придушенні частоти вдвічі нижче.

Перспективним напрямом створення автогенераторів (АГ) в даний час є застосування в них в якості активних елементів узгоджених підсилювальних мікроскладань. Це спрощує (прискорює і здешевлює) процес розробки АГ, оскільки зводить його до проектування (синтезу) лише коливальної системи.

Сучасні лінійні підсилювачі міліметрового діапазону довжин хвиль створюють на основі ММІС (монолітна інтегральна схема). Такі технології мають високий коефіцієнт підсилення та вихідну потужність при узгоджених входах та виходах, зручні для створення автогенераторів, побудованих за схемою з паралельним зворотним зв'язком (ЗЗ). При цьому властивості АГ значною мірою визначаються властивостями коливальної системи (КС).

Метою кваліфікаційної роботи є проектування і розрахунок генератора надвисоких частот. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- виконати огляд принципів побудови сучасних генераторів сигналів надвисоких частот;
- визначити структурну схему генератора надвисоких частот, вибрати елементну базу;
- виконати розрахунок генератора надвисоких частот.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Транзисторні генератори надвисоких частот

При проектуванні НВЧ-транзисторних генераторів в першу чергу вирішується завдання визначення значень електричних параметрів транзистора в його складі, а також електричних параметрів і топології пасивних елементів НВЧ-ланцюга пристрою, при яких досягаються величини його вихідних параметрів, що задаються. Значення цих параметрів перебувають у режимі, який отримав найменування номінального. Проте з урахуванням реальних умов виробництва та експлуатації номінальний режим роботи генератора який завжди може забезпечуватися. Тому на етапі проектування важлива оцінка працездатності пристрою в режимах, що відрізняються від номінального, зокрема при відмінні від номінальних величин напруги джерел живлення та параметрів навантаження на виході генератора.

При зміні електричного режиму роботи генератора, якщо зберігається його працездатність, відбувається зміна значень вихідних параметрів: вихідної потужності, постійних струмів транзистора та частоти, що генерується. Отже, представляє практичний інтерес вирішення завдання визначення залежності цих параметрів від параметрів, що характеризують електричний режим пристрою, тобто. розрахунку його електричних показників. Такий розрахунок дозволяє визначити значення параметрів генератора, при яких настає зрив його роботи.

Амплітудна модуляція здійснюється в модуляторі M з частотою $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, що змінюється обернено пропорційно \sqrt{LC} .

Генератор з низьким фазовим шумом має деякі переваги, але необхідно також враховувати деякі проблеми проектування. Це можна поділити на чотири частини. Це частотний дрейф, багатомодовий режим, ефект хроматичної дисперсії та релеївське розсіювання.

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		6

Слід пам'ятати, що у точці а вихідний опір підсилювача становить частки ома, оскільки вихідна напруга залежить від зміни навантаження і з допомогою АРП підтримується постійним.

Відносна похибка встановлення частоти 1%; відносна нестабільність частоти $2,5 \cdot 10^{-4}$ за 15 хв; похибка встановлення коефіцієнта модуляції 10%; похибка встановлення опорного рівня 1 дБ.

Генератори відеочастот працюють у діапазоні 20 Гц - 10 МГц і відрізняються значним рівнем вихідного сигналу (до 30 В). За схемним рішенням відеогенератори будуються аналогічно RC-генератору з шістьма піддіапазонами, всередині яких перебудова частоти проводиться здвоєним блоком конденсаторів змінної ємності. Стабілізація вихідної напруги забезпечується колом АРП, регульований елемент якого виконаний на польовому транзисторі; це коло охоплює задаючий генератор. Крім цього, є друге кільце АРП, що охоплює вихідний підсилювач.

Генератори відеочастот призначені для налаштування та дослідження імпульсних та відеопідсилювачів, що застосовуються у техніці телебачення, радіолокації та в системах управління. Похибка встановлення частоти 2%; нестабільність частоти $4 \cdot 10^{-4}$ за 15 хв (генератор Г4-117).

Генератори ультрависоких частот працюють на частотах до 400 (1000) МГц. Вони застосовуються для налаштування та випробувань апаратури мовлення з частотною модуляцією (УКХ ЧМ), телебачення, радіонавігації, телеметрії, рухомого радіозв'язку тощо. У них застосовуються кілька видів модуляції та маніпуляції. Для формування діапазону частот застосовуються задаючі генератори, з LC-контурами, які перебудовуються в діапазоні вихідних частот, або з гетеродинним способом переносу частоти. Набули поширення генератори ультрависоких частот з розподілом частот задаючого генератора. Цей спосіб краще, оскільки в задаючому генераторі не потрібні комутуючі механізми, конструкція спрощується, стабільність частоти підвищується.

Відносна похибка встановлення частоти 1%; нестабільність частоти (1-1,5) $\cdot 10^{-4}$; похибка установки модуляції 5-10%; діапазон модулюючих частот 50 Гц - 200 кГц (генератор Г 4-107).

1.2 Структури генераторів надвисоких частот

Генератори НВЧ виробляють частоти від 1 до 80 ГГц. У них передбачається один частотний діапазон з перекриттям 1,5-2, тому вони випускаються серіями з однотипних приладів на певну ділянку діапазону частот. Генератори НВЧ призначені для вимірювання чутливості приймальних пристроїв, вимірювання діаграм спрямованості антен, дослідження трактів передачі НВЧ, налаштування фільтрів, регулювання атенюаторів тощо. Структурна схема генератора надвисоких частот приведена на рисунку 1.1.

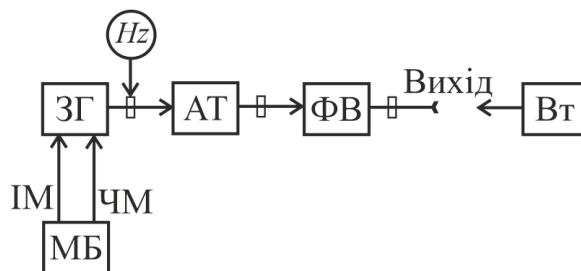


Рисунок 1.1 – Структурна схема генератора надвисоких частот

(МБ – модуляційний блок; ЗГ – задаючий генератор; АТ – атенюатор; ФВ – феритовий вентиль; Hz – вимірювач частоти; Вт – вимірювач потужності)

Структурна схема генератора НВЧ (рис. 1.1) містить порівняно невелику кількість окремих вузлів: задаючий генератор ЗГ, модуляційний блок МБ, атенюатор Ат, іноді феритовий вентиль ФВ, частотомір Hz і вимірювач потужності Вт. Вихідна потужність генератора подається до навантаження з коаксіального роз'єму або хвилеводу. Задаючий генератор виконується на клістріні із зовнішніми резонаторами, на відбивному клістріні або на діоді Ганна

із зовнішнім резонатором. Зовнішній резонатор коаксиальної конструкції налаштовується на певну частоту за допомогою короткозамикаючого плунжера. Зміна довжини резонатора призводить до зміни резонансної частоти відповідно до формули $f = c / (4\ell)$, де c - швидкість світла, а ℓ - довжина резонатора.

Генератор на відбивному клістріні, всередині якого вміщено об'ємний резонатор, налаштовує спочатку грубо, шляхом зміни його об'єму пружною деформацією («механічним налаштуванням»), а потім точно, зміною напруги на відбивачі клістріна, («електричне» налаштування). Смуга електронної перебудови частоти становить від 2 до 5 МГц. Генерована потужність виводиться з об'ємного резонатора клістріна петлею зв'язку і через відрізок тонкої коаксиальної лінії, що закінчується штиром, вводиться в хвилевід НВЧ-зракту генератора. Зв'язок резонатора клістріну з хвилеводом залежить від глибини занурення штиря, яка повинна бути меншою за чверть довжини хвилі сигналу.

Рівень потужності встановлюється на вході атенюатора рівним 1 мВт і контролюється за допомогою вимірювача потужності Вт. Вихідна потужність генератора регулюється атенюатором НВЧ. Вихідний опір генератора узгоджується з навантаженням за допомогою феритового вентиля ФВ. Сигнали НВЧ модулюються по амплітуді синусоїдальними або імпульсними сигналами і меандром і частотою - синусоїдальними і пілкоподібними сигналами. Джерелом внутрішньої модуляції є модуляційний блок МВ, на вхід якого подаються сигнали та зовнішньої модуляції. Особливо проста модуляція у відбивних клістрінах. Для здійснення амплітудно-імпульсної модуляції модулююча напруга U_m включається послідовно з напругою $E_{отр}$, що живить відбивач. Модуляція здійснюється збудженням коливань НВЧ на час тривалості імпульсу. Для отримання частотної модуляції джерело модулюючої напруги пілоподібної або синусоїдальної форми також включається послідовно в ланцюг відбивача. Потужність генерованих НВЧ-коливань втомлено. ливається максимальною, а розмах модулюючої напруги повинен забезпечити мінімальну амплітудну паразитну модуляцію.

Генератор НВЧ на діоді Ганна складається з коаксиального резонатора із ізольованим по постійному струму внутрішнім провідником. Анод діода приєднується до торцевої стінки резонатора, а катод – до внутрішнього провідника. На діод подається напруга, більша критичного, внаслідок чого арсенід галію набуває еквівалентної негативної провідності, що призводить до режиму самозбудження. Еквівалентна ємність діода Ганна змінюється зі зміною напруги, що додається до нього, що використовується для електронної перебудови частоти в межах 3 МГц і для частотної модуляції. Імпульсна модуляція здійснюється за допомогою електрично керованого р-І-л-модулятора. Потужність на виході регулюється аналогічним р-і-л-аттенюатором.

Генератори на діодах Ганна відрізняються простотою конструкції, високою надійністю, малими габаритами та масою. Випускаються промисловою генератори НВЧ, які розвивають вихідну потужність 200 мВт. Похибка встановлення частоти 0,5%. Нестабільність частоти 10^{-4} . Багато генераторів забезпечуються вказівниками частоти налаштування.

Аттенюатори НВЧ. За принципом дії аттенюатори НВЧ, що застосовуються в генераторах НВЧ, поділяються на такі види:

- граничні, у яких зменшення потужності відбувається внаслідок її ослаблення при передачі по позачерговому хвилеводу (що працює на частотах нижче критичної частоти основної хвилі), тобто без теплових втрат;

- поглинаючі, який проходить по хвилеводу потужність зменшується внаслідок перетворення деякої її частини в тепло;

- поляризаційні, в яких зменшення потужності, що переноситься в круглому хвилеводі, досягається поглинанням частини потужності, пов'язаної зі складовою вектора напруженості електричного поля, паралельної пластини, що поглинає, розміщеної вздовж осі хвилеводу;

- напівпровідникові, електрично керовані, у яких зменшення потужності відбувається в результаті поглинання її частини в активному опорі НВЧ-діодів (зазвичай р-і-п-діодів), розміщених вздовж хвилеводу.

Граничний аттенюатор складається з відрізка круглого хвилеводу критична довжина хвилі $\lambda_{кр}$ якого значно менше робочої довжини хвилі λ . Цими елементами заповнюються коаксіальні лінії на вході та виході хвилеводу. Елементи зв'язку для коаксіальних ліній є майже реактивним навантаженням, тому для їх узгодження в центральний провід послідовно включаються резистори R , опори яких рівні хвильовому опору лінії. Електромагнітна хвиля у граничному хвилеводі послаблюється. Коефіцієнт ослаблення $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - (\lambda_{кр} / \lambda)^2}$ для $\lambda_{кр} / \lambda \ll 1$ можна вважати рівним $\alpha = 2\pi / \lambda_{кр}$, тобто не залежить від частоти. Його значення визначається лише поперечним перетином, формою хвилеводу та типом хвилі, що розповсюджується по ньому.

У граничних хвилеводах зазвичай використовуються відрізки хвилеводу круглого перерізу. З теоретичної електродинаміки відомо, що у круглих хвилеводів критична довжина хвилі типу H_{11} , $\lambda_{кр11} = 3,42r$, а типу E_{01} - $\lambda_{кр01} = 2,61r$, де r - радіус хвилеводу. Отже, ослаблення $A = \alpha l$, де l - відстань між елементами зв'язку, для кожного типу хвилі (з урахуванням формули для α) можна обчислити за такими виразами: $A_{11} = 8,686 \cdot \pi l / 3,42r + A_0 = (15,9l / r) + A_0$. Аналогічно: $A_{01} = (20,8l / r) + A_0$. Тут 8,686 - перекладний множник непер в децибелі; A_0 - Початкове ослаблення, що виникає поблизу вхідного елемента зв'язку. На цій ділянці l_0 крім основної хвилі збуджуються хвилі вищих типів, і тому ослаблення вздовж нього нелінійно. Проте хвилі вищих типів швидко згасають, і ділянки ослаблення основний хвилі має лінійний характер. Значення початкового ослаблення дорівнює 10-15 дБ.

Ослаблення граничного аттенюатора розраховується за його геометричними розмірами, тому такі аттенюатори застосовують як абсолютні заходи ослаблення. Межі регулювання становлять 10-30 дБ.

Поглинаючі аттенюатори діляться на коаксіальні і хвилеводні У перших ослаблення потужності викликається поглинанням її у високому внутрішньому

провіднику коаксіальної лінії або діелектриці з великими втратами, що заповнює коаксіальну лінію; той же ефект виходить при зануренні поглинаючої пластини в хвилевод або при русі пластини від бічної стінки водовода до його центру. Стрижень механізму переміщення виконують із діелектрика з малими втратами. Ослаблення поглинаючих атенуаторів та його градування визначаються експериментально. Межі регулювання становлять 0-50 дБ.

Поляризаційні атенуатори є найбільш досконалими і точними. Атенуатор складається з трьох послідовно з'єднаних секцій круглого хвилеводу, середню з яких можна повертати на кут відносно загальної поздовжньої осі. Вхідна і вихідна секції з'єднані переходами з прямокутним хвилеводом. На вхід атенуатора надходить електромагнітна хвиля типу H_{10} , а круглий хвилевід — H_{11} . В середині кожної секції перпендикулярно вектору електричної складової електромагнітної хвилі вміщено три поглинаючі пластини. Коли всі три пластини знаходяться в одній площині, ослаблення незначне. При повороті рухомої секції на кут ϕ електричне поле розкладеться на дві складові: паралельну пластині $E \sin \phi$ і перпендикулярну їй $E \cos \phi$. Паралельна складова поглинається, а перпендикулярна до поляризації ϕ проходить у третю секцію. Тут також відбувається розкладання на складові $E \cos \phi \sin \phi$, яка поглинається, та $E \cos^2 \phi$, яка проходить на вихід атенуатора. В ідеальному атенуаторі воно лежить в межах від 0 до нескінченності при зміні ϕ від 0 до 90° .

Поляризаційні атенуатори, що випускаються промисловістю, забезпечують регулювання ослаблення від 0,3 до 80 дБ з похибкою установки 0,1 дБ.

Схема генератора НВЧ на тунельному діоді представлена на рисунку 1.2.

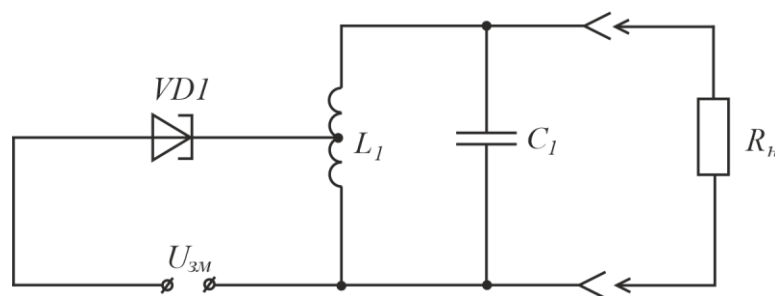


Рисунок 1.2 – Схема генератора НВЧ на тунельному діоді

Тунельний діод має від'ємний диференційний опір:

$$R_{\text{диф}} = \frac{du}{di}.$$

Умова виникнення коливань автогенератора:

$$|R_{\text{диф}}| < \frac{L_1}{rC_1},$$

де r - опір активних втрат кола.

Схема автогенератора на тунельному діоді з живленням від дільника напруги приведена на рисунку 1.3.

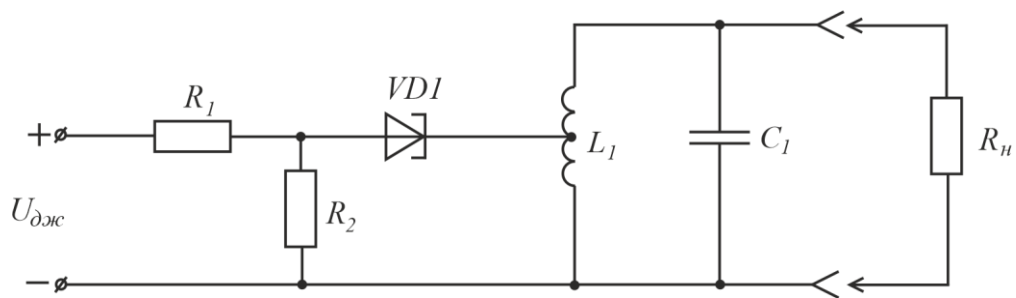


Рисунок 1.3 – Схема автогенератора на тунельному діоді з живленням від дільника напруги

Схема автогенератора на тунельному діоді з нелінійним опором ланцюга живлення приведена на рисунку 1.4.

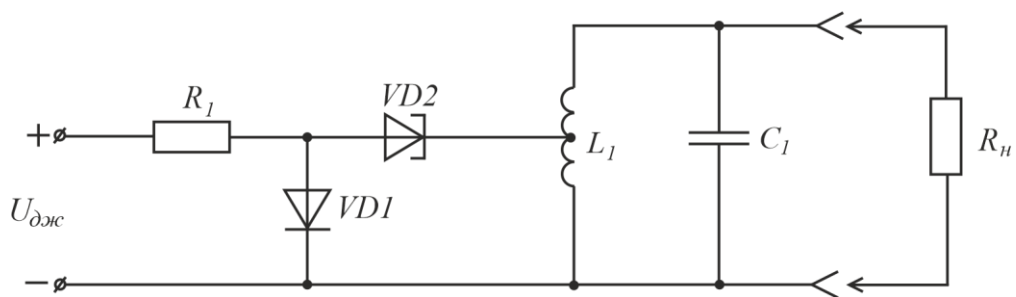


Рисунок 1.4 – Схема автогенератора на тунельному діоді з нелінійним опором ланцюга живлення

Найпростіший передавач на тунельному діоді приведений на рисунку 1.5.

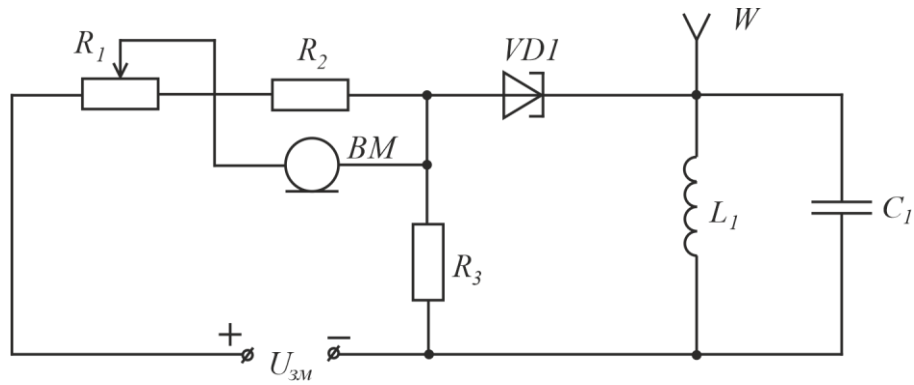


Рисунок 1.5 – Найпростіший передавач на тунельному діоді

Покращена схема передавача на тунельному діоді приведена на рисунку 1.6.

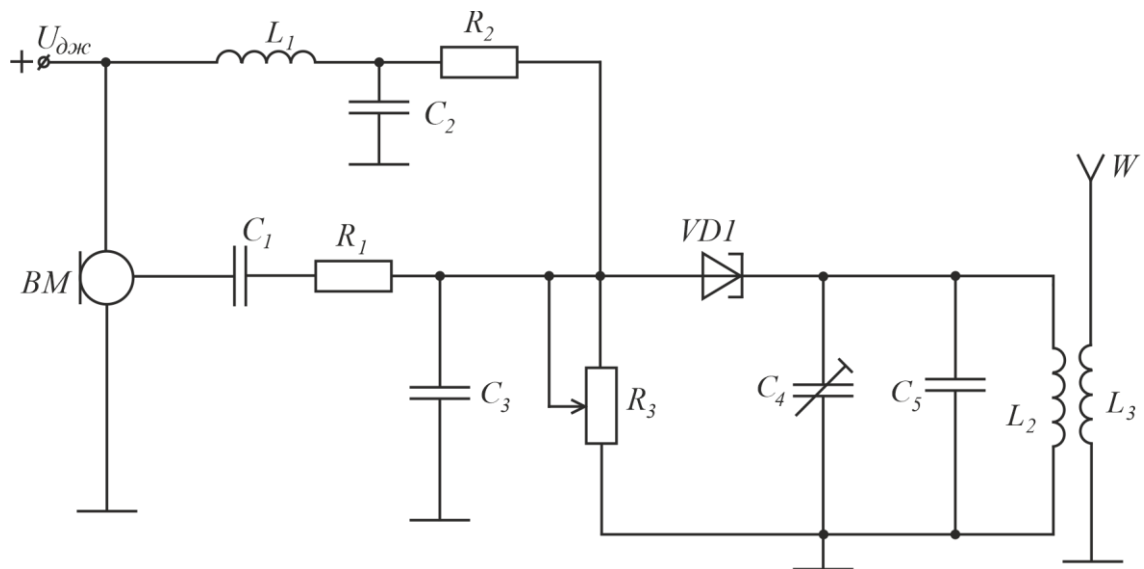


Рисунок 1.6 – Покращена схема передавача на тунельному діоді

Наявні кремнієва та арсенід-галієва технології дозволяють створювати високоякісні активні та пасивні НВЧ-прилади, модулі та компоненти, а також багатофункціональні пристрої на їх основі. Твердотільна компонентна база радіотехнічної апаратури та обладнання діапазону частот до 200 ГГц включає:

- багатофункціональні твердотільні пристрої (синтезатори частот, приймальні, передавальні та приймально-передаючі НВЧ-модулі);
- однофункціональні напівпровідникові НВЧ-компоненти (генератори, підсилювачі, помножувачі частоти, змішувачі, перемикачі, атенюатори, модулятори, фазообертачі);

- напівпровідникові НВЧ-прилади (Si p-i-n-діоди, GaAs діоди Ганна).

Схема гетеродину на тунельному діоді приведена на рисунку 1.7.

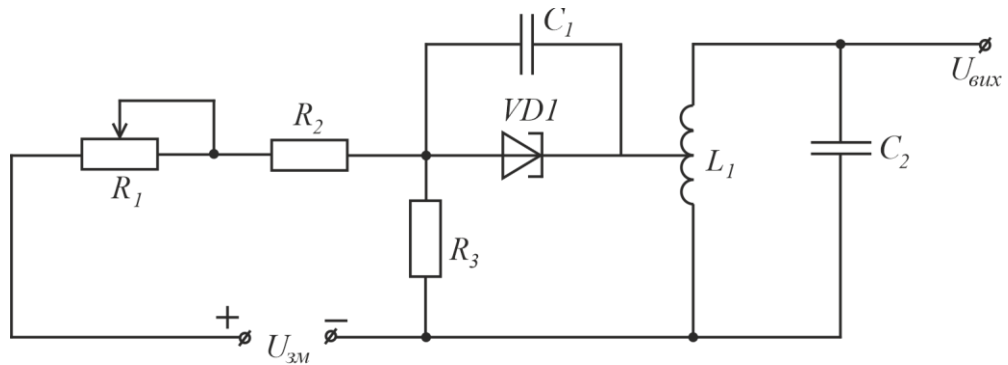


Рисунок 1.7 – Гетеродин на тунельному діоді

Автогенератор на двох тунельних діодах приведений на рисунку 1.8

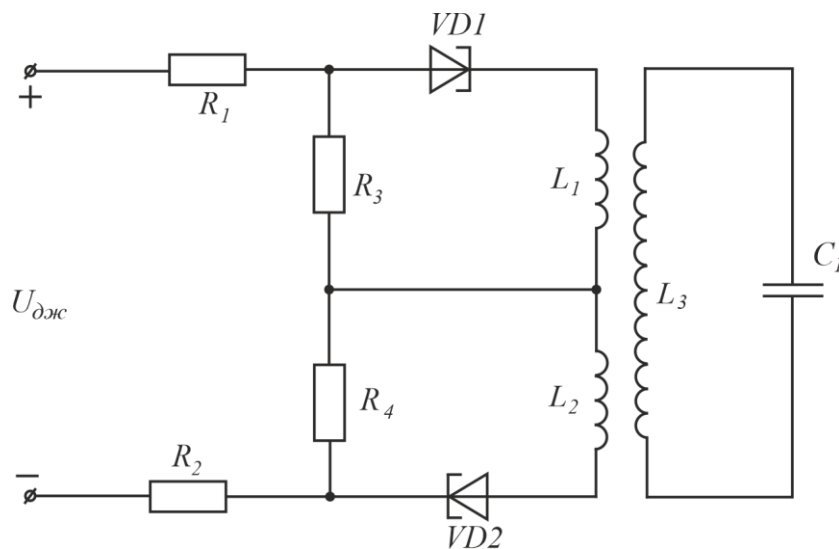


Рисунок 1.8 – Автогенератор на двох тунельних діодах

Генератор на тунельному діоді може будуватися і із застосуванням кварцового резонатора, що задає частоту коливань. Схеми автогенератора на тунельному діоді з кварцовим резонатором наведена на рисунку 1.9.

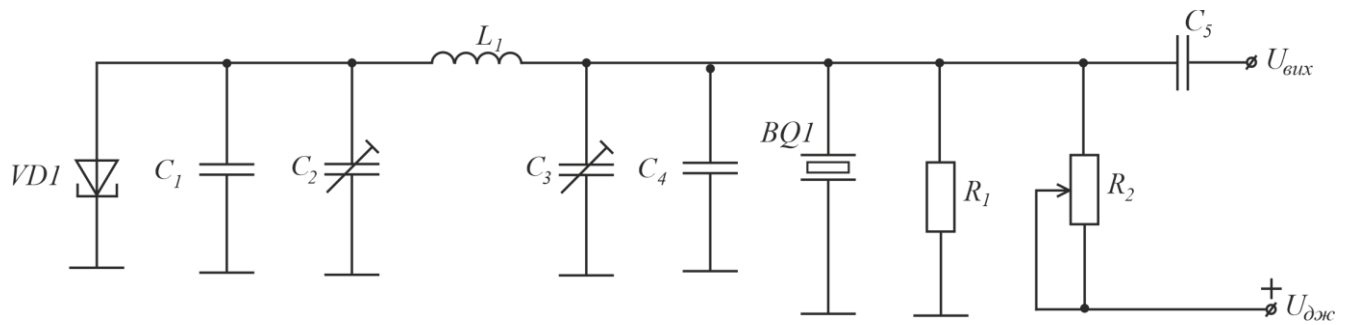


Рисунок 1.9 – Автогенератор на тунельному діоді з кварцовим резонатором

Одним з основних елементів систем надвисокочастотного діапазону різного є генераторно-перетворювальні пристрої, які перетворюють спектр сигналу несучого коливання у сигнал проміжної частоти, зі збереженням інформаційного модулюючого сигналу. Таке перетворення необхідне для подальшої обробки інформаційного сигналу, що є досить складним завданням при безпосередній роботі у зазначених діапазонах.

Під генераторно-перетворювальним пристроєм розуміється сукупність генератора сигналу та змішувача. У деяких випадках один і той же елемент може виступати і як генератор і як змішувач, тим спрощуючи схему пристрою.

Освоєння дедалі більш високочастотних діапазонів ставить ряд завдань із генерації і перетворення сигналів, ефективно вирішуваних з допомогою приладів з міждолинним перенесенням зарядів – діодів Ганна. Генератори на діодах Ганна, що мають перевагу у простоті конструкції, можуть, наприклад, використовуватися як самогенеруючі перетворювачі частоти, конкурентоспроможних на ринку технічної продукції широкого застосування.

В даний час широко обговорюється технологія п'ятого покоління (5G), яка забезпечить швидкість передачі 1 Гбіт/с з охопленням енергоефективних мікро/піко/фемто-комірок та радіоінтерфейсів з використанням міліметрових хвиль (mm-W) в області бездротових та мобільних досліджень. Через високе згасання mm-W зв'язок ближньої дії в бездротових та мобільних мережах 5G матиме велику кількість стільників з обмеженими розмірами комірок. Діапазон частот mm-W визначається як діапазон від 30 ГГц до 300 ГГц, де доступний надширокосмуговий спектр. Використання надширокосмугової передачі mm-Вт

дозволить збільшити пропускну здатність тільки в тому випадку, якщо використовується удосконалений формат модуляції та/або мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM). Пропускна здатність каналу мм- W залишиться у діапазоні сучасних радіомереж, якщо фаза генератора мм- W залишиться у тому діапазоні. Відповідним кандидатом з низькими характеристиками фазового шуму є оптоелектронний генератор (ОЕО) [1].

ОЕГ - відомий пристрій, здатний видавати високоякісні сигнали в радіочастотному (РЧ), мікрохвильовому (мм- W) та мм- W діапазонах [2]. ОЕГ несподівано відрізняється з інших генераторів тим, що фазовий шум залежить від робочої частоти [3]. Це означає, що немає прямої залежності між фазовим шумом і частотою, як у інших резонаторів, таких як повітрянодіелектричний резонатор, кристалічний резонатор, кварцовий резонатор або сапфіровий резонатор. Причина цієї позитивної властивості полягає в тому, що ОЕО має довгу оптичну затримку для свого резонатора. Оптичне скловолокно використовується як оптична лінія затримки, оскільки воно має низьку характеристику втрат (0,2 дБ/км) [4]. Довга лінія затримки діє як резонатор із високою добротністю (добротністю). Коефіцієнт добротності залежить від довжини лінії затримки. Це означає, що якщо ми збільшимо довжину лінії затримки, то зможемо збільшити добротність ОЕО. Завдяки цій перевазі можна зменшити фазовий шум ОЕО.

Показана типова конфігурація одноконтурного ОЕГ, що складається з оптичних, електричних та оптоелектронних компонентів. Ділянка, де оптичний сигнал передається від лазера до фотоприймача, називається оптичним шляхом. Лазер, що знаходиться на початку оптичного шляху, повинен модулюватися ззовні електричним сигналом, щоб виробляти високочастотні коливання. Для зовнішньої модуляції часто використовують модулятор Маха-Цендера (МЦМ) [5] або електроабсорбційний модулятор [6]. Електричний шлях проходить від фотодетектора, де оптичний сигнал перетворюється на електричний, до кінця петлі зворотного зв'язку (показаний чорним кольором). З метою фільтрації в контурі генератора повинен бути реалізований оптичний та/або електричний фільтр. Щоб компенсувати втрати контуру генератора, можна використовувати

оптичний та/або мікрохвильовий підсилювач. Наприкінці оптичного шляху оптико-електричне перетворення забезпечується фотодіод. Котушка з волокном, що є довгою лінією затримки, використовується для забезпечення зв'язку між лазером і фотодіодом. Однією з переваг ОЕО є те, що електричні, так і оптичні виходи можуть бути отримані від ОЕО.

Вважається, що для реалізації сигналу з високою спектральною ефективністю у міліметровому-ватному діапазоні для бездротових та мобільних мереж 5G [7-8] ОЕО може відіграти ключову роль. Ми пропонуємо спростити базові станції і, таким чином, зробити бездротову та мобільну мережу 5G рентабельною [1], видаливши гетеродини з базових станцій та помістивши ОЕО на центральну станцію, звідки він може живити велику кількість базових станцій і, таким чином, поділити витрати на генерацію сигналу ОЕО між багатьма базовими станціями. Крім того, розмістивши ОЕО на центральній станції контрольованого середовища, ми можемо легко керувати генератором та більш ефективно стабілізувати його. Це дає корисну перевагу при використанні діапазону мм-Вт у бездротових та мобільних мережах 5G у порівнянні з сучасними технологіями бездротового доступу. Ця інтегрована система буде розроблена та реалізована на частоті 39 ГГц. Основною метою цієї системи є подача одного сигналу генератора на велику кількість базових станцій з максимально високою швидкістю передачі даних та малою затримкою. У наступному розділі ми опишемо та обговоримо можливі проблеми та рішення впровадження ОЕО у мобільних та бездротових мережах 5G. Конфігурація ОЕО в мобільних та бездротових мережах 5G, яка буде реалізована, показана на рис. 2.

Основна ідея реалізації ОЕГ у мобільних та бездротових мережах 5G [1]. Сигнал низькофазного генератора поширюватиметься на базові станції від центральної станції по одному оптичному каналу. Кількість базових станцій, які отримують вигоду від лінії генератора, залежить від кількох параметрів ОЕО та умов центральної станції.

За допомогою цієї ідеї, докладно описаної в [1], ми можемо спростити базові станції бездротових та мобільних мереж 5G. Однією з основних переваг

використання ОЕО на центральній станції є те, що ми можемо розподіляти один сигнал осцилятора на безліч базових станцій. Цей розподіл залежить від кількох параметрів, які будуть пояснені у другому розділі. Крім того, стабілізувати ОЕО простіше, якщо ми розмістимо його на центральній станції. Він працюватиме серед з регульованою температурою.

1.3 Діод Ганна

Діод – це напівпровідниковий радіоелектронний компонент з двома виводами, що має нелінійну вольт-амперну характеристику (ВАХ). Це дозволяє електричному струму текти тільки в одному напрямку. В протилежному напрямку нелінійна ВАХ не дозволяє протікати струму, оскільки вона передбачає дуже високий опір при зворотному зміщенні.

Діоди поділяються на різні типи залежно від своїх показників і принципу роботи. Вони включають звичайний діод, діод Шоттки, діод Шоклі, струмообмежуючий діод, стабілітрон, світлодіод, фотодіод, тунельний діод, варактор, лазерний діод, рpn діод, елемент Пельтьє, діод Ганна, тощо.

Діод Ганна прийнято розглядати як один із видів діодів, однак він не має р-n-переходу. Його ще називають приладом із об'ємною нестійкістю.

Діод Ганна має негативний диференційний опір і тому його часто застосовують як генератор малої потужності для формування мікрохвиль. Він складається із напівпровідника N-типу, в якому електрони є основним носієм заряду. Для генерації коротких радіохвиль, таких як надвисокі частоти (НВЧ), використовують ефект Ганна.

Розглянемо структуру діода Ганна (рис. 1.10). Центральна область, показана на малюнку нижче, - це активна область, яка представлена низьколегованим шаром арсеніду галію (GaAs). По обидва боки активної області нарощуються епітаксійні шари високолегованого GaAs товщиною від 8 до 10 мікрометрів.



Рисунок 1.10 – Структура діода Ганна

Активна частина затиснута між двома зонами, що мають омичні контакти. Це дозволяє забезпечити ефективне тепловідведення, що допомагає уникнути перегріву та передчасного виходу діода з ладу.

Ефект Ганна було відкрито Джоном Ганном у 1960-х роках. Після його експериментів на основі GaAs (Арсенід галію), він звернув увагу на завади, що виникли в результаті цих дослідів. Далі він використав це для генерації електричних коливань у діапазоні надвисоких частот у стійкому електричному полі, величиною більше ніж граничне значення.

Цей ефект Ганна можна визначити як генерація НВЧ (частоти порядку декількох ГГц), що виникає щоразу, коли напруга, яка прикладається до напівпровідникового приладу, перевищує його критичне граничне значення.

У міру збільшення напруги на діоді відбувається збільшення струму, але після досягнення певного рівня напруги (порогового значення) струм починає зменшуватися. Область, де струм падає, називається область негативного опору.

1.4 НВЧ генератор на діоді Ганна

Діод Ганна використовується для побудови генераторів мікрохвиль з частотами в діапазоні від 10 ГГц до герагерц. Це пристрій, що має негативний диференціальний опір (NDR -Negative Differential Resistance) - також званого як прилад перенесення електронів - є коливальним контуром, що складається з діода Ганна і постійної напруги зміщення (в області негативного опору).

Завдяки цьому сумарний диференційний опір кола стає рівним нулю, оскільки негативний опір діода скорочується при наявності активних втрат у колі, що призводить до виникнення коливань.

Розглянемо принцип роботи діода Ганна. Цей діод зроблений із цілісного напівпровідника N-типу, такого як Арсенід Галлія (GaAs), або Фосфід Індія (InP). Діод Ганна складається із трьох енергетичних областей, і ця додаткова третя область на початковому етапі порожня.

Електрони із зони провідності, що мають малий електричний опір, переміщуються в третю область, оскільки вони розсіюються від прикладеної до діода напруги. Третя область з GaAs має рухливість, яка менша провідності.

Через збільшення прямої напруги збільшується напруженість поля (прикладена напруга перевищує порогове значення напруги), внаслідок чого електрони досягають стану, при якому їхня ефективна маса збільшується, а швидкість зменшується, що призводить до зниження струму.

Отже, якщо напруженість поля збільшується, швидкість дрейфу буде зменшуватися, при цьому створюється негативний додатковий опір. Таким чином, збільшення напруги збільшить опір шляхом виникнення на катоді так званого домену сильного поля, який рухається і досягає анода.

При досягненні анода домен руйнується, і струм знову зростає. При підтримці постійного значення напруги, на катоді знову виникатиме новий домен і все повториться знову. Частота повторення цього процесу пов'язана з товщиною шару напівпровідника, чим більша товщина, тим менша частота повторень.

Діод Ганна використовується в наступних областях:

- у генераторах Ганна для генерації частот у діапазоні від 5 ГГц до 35 ГГц на виході. Генератор Ганна використовуються у радіозв'язку, у військових та комерційних радіолокаційних установках.

- у залізничній сфері як датчики для виявлення порушників, з метою запобігання краху поїздів.

- як ефективні генератори НВЧ в діапазоні частот до сотень ГГц.

- у детекторах дистанційного виміру вібрацій та визначенні швидкості обертання в тахометрах.

- як НВЧ генератор струму (імпульсний генератор на діоді Ганна).

- у передавачах НВЧ для генерації НВЧ-радіохвиль при дуже малих потужностях.

А також у датчиках відкривання дверей, пристроях управління процесами, охорона периметра, системи безпеки пішоходів, датчиках рівня, датчиках вимірювання вологості та в охоронних системах.

Розглянемо прилад для визначення потужності точки доступу. Прилад дозволяє заміряти потужність точки доступу, КСВ у антени без використання точки доступу, а також грати роль генератора при випробуванні антен. Вмикається найпростіший індикатор напруги поля.

В основі живлення лежить два акумулятори від стільникового телефону, включених послідовно для отримання 7,2 В постійної напруги. Ці акумулятори мають вбудовані контролери, які дозволяють їх перезарядити. Далі стоїть інтегральний стабілізатор напруги на 5 В (з низьким падінням), від якої і живиться вся електроніка. Індикатором є підсвічування шкали міліамперметра.

Генератор ВЧ: за його основу взято аудіо/відео модулятор на 2,4 ГГц. Частоти добре потрапляють до WI-FI діапазону, це 2.414,26/2.432,3/2.450,3/2.468,2 МГц., тому перевірку антени можна проводити на всіх основних частотах. Потужність сигналу з генератора близько 30-40мВт, замало, тому було додано буферний каскад на транзисторі BFG540. У результаті вихідна потужність приладу становила близько 100мВт, чого цілком достатньо вимірювань. При зміні каналу потужність залишається не змінною. Відхилення +/- 2мВт і навіть вони впливають на показання КСВ метра, але зовсім незначно.

Вимірювальний міст (головку) бажано підключати до антени. Якщо використовувати кабель - перехідник, він повинен бути якісний і максимально короткий, при цьому його довжина повинна бути кратна 1/2 лямбда включаючи довжину роз'ємів, так як в такому випадку не відбувається трансформації опорів і показання КСВ метра найбільш точні.

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		22

Узгоджене вимірювальне навантаження (вимірювач потужності). ВЧ діод включений через дільник напруги. Діоди HSMS282x - вносять неузгодженість в навантаження (діоди BAS40 і BAS70 також можна використовувати при такому включенні). Таким чином, навантаження має чітку КСВ. Вимірювати потужність при такому конструктиві можна до діапазону 5ГГц.

Шкала КСВ-метра відкалібрована в діапазоні від 1 до 5. При такій вихідній потужності генератора вистачає одиночного операційного підсилювача, але якщо вказаного в схемі не знайти, то цілком добре підійде LM358. Звичайно, резистори в об'язці операційника доведеться підбирати в залежності від мікросхеми, головки міліамперметра, рівня сигналу, що приходить з моста. Якщо міліамперметр використовується зі слабкою чутливістю, то можливо знадобиться ввімкнення двох каскадів операційника. Деякі деталі, такі як одиночний операційник, діоди ХСМС282х можна взяти у старих сотках типу Сіменс С35-45. Тільки там діоди стоять у зборках з 3х штук у корпусі SOT326.

Висновки до першого розділу

Генератор на відбивному клістріні, всередині якого вміщено об'ємний резонатор, налаштовуєте спочатку грубо, шляхом зміни його об'єму пружною деформацією («механічним налаштуванням»), а потім точно, зміною напруги на відбивачі клістріна, («електричне» налаштування).

Генератори на діодах Ганна відрізняються простотою конструкції, високою надійністю, малими габаритами та масою. Діод Ганна прийнято розглядати як один із видів діодів, однак він не має р-п-переходу.

Ефект Ганна можна визначити як генерація НВЧ (частоти порядку декількох ГГц), що виникає, коли напруга, прикладається до напівпровідникового приладу, перевищує його критичне граничне значення.

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		23

2 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

2.1 Генератори на надвисокочастотних діодах

Розглянемо способи створення діодних генераторів, принципи побудови генераторів на діодах Ганна та лавинно-прогонових діодах (ЛПД) та особливості генераторів на основі цих активних елементів. Розглянуто рівні характеристик генераторів на діодах Ганна та ЛПД різних конструктивних рішень, а також перспективи розвитку діодних генераторів в область вкрай високих частот.

Генератори на НВЧ- та КВЧ-діодах функціонують на ефекті негативного диференційного опору активного двополюсника на робочій частоті.

Відомі три основні типи генераторних діодів. Першими в 1956 з'явилися тунельні діоди (на основі виродженого напівпровідника, в якому при доданні напруги в прямому напрямку на вольт-амперній характеристиці (ВАХ) виникає ділянка з негативним диференційним опором за рахунок тунельного ефекту в тонкому шарі p-n переходу). У 1959 році спостерігалось явище, передбачене в 1958 У. Т. Рідом (W. T. Read), а через рік в лабораторії НВЧ-діодів був розроблений лавинно-прогоновий діод (ЛПД), принцип дії якого пов'язаний із порівнянністю часу «прольоту» носіїв заряду через робочий поздовжній проміжок напівпровідника та періоду прикладеного до цього напівпровідника змінної напруги.

Діоди на ефекті Ганна, зумовленому статичною негативною провідністю напівпровідника зі складною (багатодолинною) будовою зони провідності, створені у 1963 році у США (Дж. Ганн).

В даний час діоди Ганна та лавинно-прогонових діодах застосовуються як джерела електромагнітних коливань. Зважаючи на малу потужність сигналів, тунельні діоди практично не використовуються для генерації. Діоди Ганна виготовляють на основі арсеніду галія (GaAs) – дводолинного напівпровідника,

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		24

що має різницю енергій між долинами 0,36 В. Вольт-амперна характеристика діода Ганна наведена на рисунку 2.1.

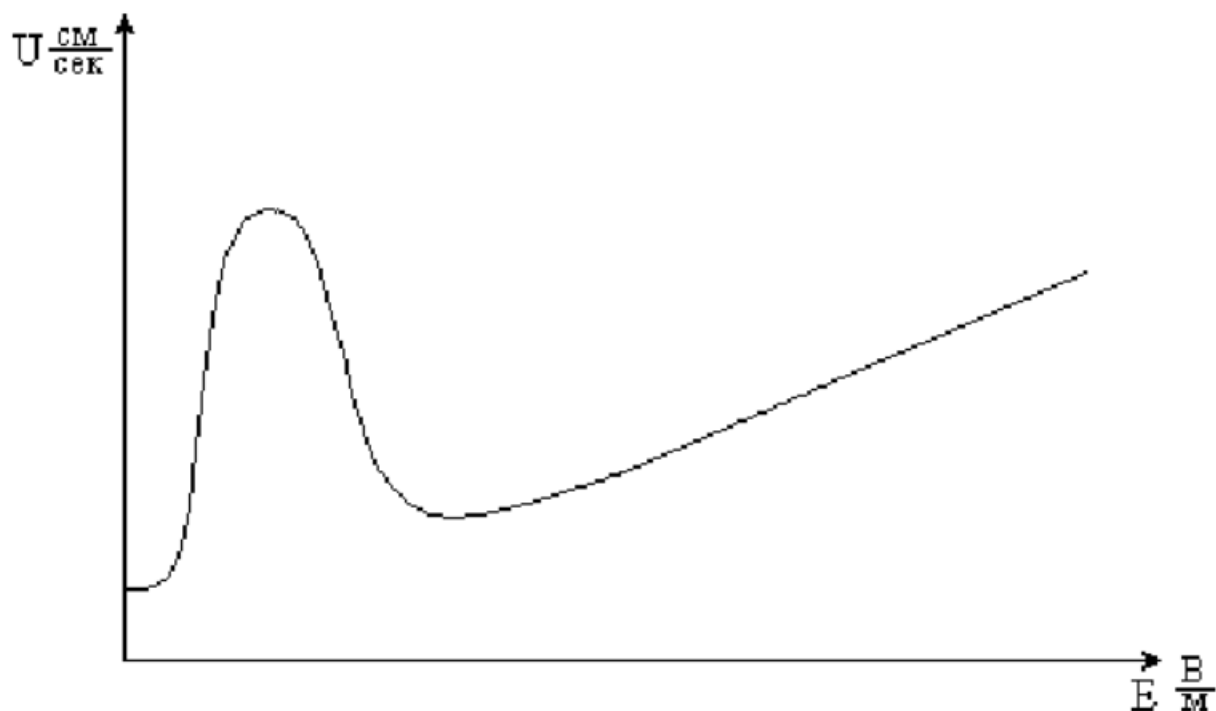


Рисунок 2.1 – Вольт-амперна характеристика діода Ганна

У другій половині минулого століття генератори на діодах Ганна (ГДГ) поряд з генераторами на ЛПД розроблялися для заміщення малопотужних генераторів [2] на відбивних клістронах та їх низьковольтних модифікаціях (наприклад, генераторах гальмуючого поля). У порівнянні з клістронами, перевага генераторів на ЛПД (ГЛПД) полягає у відсутності ланцюга накали та кращих енергетичних характеристиках, а переваги генераторів на діодах Ганна — це й низька напруга менше 10 В.

Більш широке поширення отримали ГДГ як пристрої з кращими шумовими (спектральними) характеристиками, хоча реальні ККД таких генераторів становили від кількох часток до кількох одиниць відсотка (теоретично до 15%). У діапазоні частот до 40 ГГц їхня перевага перед ГЛПД у рівні фазових шумів становить до 30 дБ/Гц при однакових відбудовах від частоти, що несе. Переваги

автогенераторів на ЛПД полягають у більш високих (на порядок) рівнях вихідної потужності та ККД до десятків відсотків.

Відмінності фізичних ефектів, у яких функціонують діоди, визначають варіанти конструктивних рішень генераторів на їхньої основі. Коротко перерахуємо ці особливості.

Залежно від параметрів кристала, властивостей навантаження, температури і напруги живлення генератор на діоді Ганна може працювати в одному з декількох режимів, що істотно відрізняються, загальним для яких є формування імпульсів струму в зовнішньому колі. Імпульс струму формується у процесі переміщення у кристалі діода «згустку» напруженості електричного поля чи носіїв заряду — домену. Залежно від особливостей (виду) доменів теоретично розрізняють доменні режими (пролітний, із затримкою та з гасінням домену), гібридні режими, режим з обмеженням накопичення об'ємного заряду.

У практиці застосування діодів Ганна суворо виділити режим роботи діода у пристрої складно. Очевидно лише, що прогоновий режим не керується зовнішнім колом (ККД $\sim 5\%$), а інші доменні режими контролюються зовнішнім резонансним контуром, причому частота коливань може бути як більшою, так і меншою за пролітну. У цих режимах сигнал, що генерується, піддається перебудові зовнішнім контуром і може лежати в межах від $0,6f_{np}$ до $1,5-2f_{np}$, тобто на частотах $f \approx 1-5$ ГГц. При цьому імпульси струму дуже відмінні від гармонійного вигляду, що зменшує потужність першої гармоніки коливань, і ККД виявляється приблизно в 2,5 рази менше, ніж у режимі із затримкою домену.

Якісно інший режим обмеженого накопичення об'ємного заряду (ОНОЗ) заснований на інерційності процесу формування домену порівняно зі швидкістю зміни змінної напруги. Для цього потрібні спеціальні діоди з однорідним профілем легування, що уповільнює формування домену. Тоді поле усередині діода рівномірно розподілиться вздовж довжини активної частини кристала.

Динамічна ВАХ діода збігається із залежністю швидкості дрейфу від напруженості поля. В ОНОЗ-режимі діод Ганна навантажується на паралельний

контур, у якого $R_n \gg R_o$. Частота генерації в такому режимі повністю визначається налаштуванням коливальної системи і не залежить від частоти.

ОНОЗ-режим застосовують для створення імпульсних ГДГ, які мають на -3 порядки більшу потужність, ніж інші твердотільні джерела НВЧ-коливань. Максимальний ККД у цьому режимі наближається до 15–17% і досягається за $R_n \approx (20 - 30) \times |R_o|$.

Практично ГДГ працюють у гібридних режимах, проміжних між ОНОЗ та доменними. У цих режимах в кристалі може одночасно існувати кілька доменів, час формування яких є досить великим у порівнянні з періодом коливань. Домени впливають на струм діода лише на частині падаючої ділянки ВАХ. У гібридних режимах ККД може бути близько 15%.

Відомі й інші режими в діодах Ганна, наприклад, статичного домену сильного поля, але в ГДГ вони не застосовуються.

На відміну від діодів Ганна ЛПД формують НВЧ коливання на основі ефекту динамічного негативного диференціального опору, що виникає в результаті ударної іонізації атомів напівпровідника при лавинному пробі. Лавина (згустки електронів) формується під дією змінної напруги у вузькому шарі переходу (шару множення). Якщо частота змінної напруги така, що лавина виникає в період прискорюючої фази напруги, то наступний півперіод зміни напруги (уповільнює електричне поле) електрони будуть віддавати свою енергію змінному полю.

Вперше генерація спостерігалася на германієвих зміщених назад діодах з одним р-n-переходом, що мають різкий злам ВАХ. До теперішнього часу створені кремнієві, арсенід-галієві та фосфід-індієві лавинно-прогонові діоди у вигляді низки структур (наприклад, діод Тагера з різким р-n-переходом, діод Ріда з переходом типу р+-n-i-n+, діод Місави з шаром однорідного множення - р-i-n-перехід та ін.), що відрізняються ВАХ, умовами лавинного пробію та динамічними властивостями, які залежать від геометрії, рівня легування, матеріалу діода тощо.

У ЛПД стандартним вважається так званий прогоновий, або ІМРАТТ (IMPact ionization Avalanche Transit-Time diode), режим. Він відбиває основні фізичні явища, які відбуваються у ЛПД при дуже високих амплітудах НВЧ-полів (резонатори середньої добротності). Зазвичай максимальний ККД приладу, приблизно рівний 25%, досягається на частоті, що задовольняє співвідношення $\omega\tau$, де τ - час прольоту електронної лавини, ω - прогонова частота. У цьому режимі носії заряду генеруються у шарі лавинного множення. Дірки йдуть у р-область, а електрони у прогоновому проміжку беруть участь у енергообміні з полем. Процес відповідає діодам Ріда та Тагера. У діоді Місави ІМРАТТ-режим складніше, ніж у діодах Ріда та Тагера, але якісно схожий.

Другий тип коливального режиму ЛПД - ТРАРАТТ-режим (TRApped, Plasma Avalanche Triggered Transit), або аномальний режим, робоча частота в якому набагато нижча за пролітну. ТРАРАТТ-режим відрізняється відносно високим значенням ККД і виникає в умовах значної напруги НВЧ на діоді, розміщеному у високодобротній резонансній системі.

Недоліком ЛПД є на порядок вищий рівень амплітудних та фазових шумів у порівнянні з ГДГ. Зазначимо, що цей недолік ЛПД «компенсується» їх перевагою порівняно з діодами Ганна у рівнях вихідної потужності на один діод та ККД генератора у режимі безперервної генерації.

За частотою лавинно-прогонові діоди здатні перекрити весь діапазон НВЧ та КВЧ (0,5–500 ГГц) та характеризуються коефіцієнтом корисної дії до 20–30% у сантиметровому та 60–70% у дециметровому діапазонах. ЛПД здатні генерувати електромагнітні коливання потужністю до 12 Вт від одного приладу в сантиметровому діапазоні та близько 0,1-1 Вт у міліметровому. В аномальному режимі імпульсна потужність ЛПД досягає сотень ват. За рівнями генерованої потужності ЛПД здатні замінити лампи зворотної хвилі та клістриони малої та середньої потужності.

Історично поява НВЧ генераторних діодів передувала появі НВЧ-транзисторів. З розвитком технології створення транзисторних структур і появою біполярних НВЧ-транзисторів інтерес до діодних генераторів малої потужності

зменшився з огляду на те, що АГ на біполярних транзисторах мають на порядок кращі шумові характеристики порівняно з АГ на діоді Ганна при порівнянних потужностях. Цей процес відповідав освоєнню сантиметрового діапазону довжин хвиль. Однак у короткохвильовій частині сантиметрового діапазону довжин хвиль (починаючи приблизно з 10 ГГц) можливість застосування біполярних транзисторів як основи автогенератора зникла через фізичну межу створення таких структур. Поява польових транзисторів, спектральні властивості яких аналогічні до шумових характеристик діода Ганна, продовжило процес витіснення ГДГ транзисторними автогенераторами (ГТр).

ГТр на польових транзисторах мають виражені переваги порівняно з ГДГ у ККД за практично однакових спектральних характеристик у частотному діапазоні приблизно до 20–30 ГГц. Зі зростанням частоти власні шуми транзисторних структур зростають, і це зростання перевищує зростання шумових характеристик діодів Ганна внаслідок зменшення числа р-п-переходів чи переходів на бар'єрі Шоттки і, відповідно, зменшення джерел шуму [4]. У міліметровому діапазоні діоди Ганна стають конкурентними польовими транзисторами не лише за спектральними характеристиками, а й за рівнями вихідної потужності. У цьому діапазоні частот за спектральними характеристиками ГДГ володіють на кілька порядків кращими характеристиками в порівнянні з АГ на ЛПД.

Отже, з освоєнням міліметрового діапазону довжин хвиль альтернативі ГДГ у сфері малошумних АГ малої та середньої потужності практично немає. «Конкурентна боротьба» тут триває між АГ на БТ із застосуванням помножувачів частоти та ГДГ.

Генератори на ДГ поступаються генераторам на ЛПД по ККД, максимальної робочої частоти і за рівнем потужності, що віддається в безперервному режимі. Проте перевагами ГДГ є: висока (порівняно з вакуумними приладами) надійність (термін служби до 10^5 год), широкий діапазон частотної перебудови, висока стабільність та малий рівень амплітудних та фазових шумів. Це визначає нішу застосування у міліметровому діапазоні, у якому використання транзисторів обмежене.

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		29

Основними областями застосування генераторів на ДГ є: джерела малої та середньої потужності та гетеродини у зв'язкових системах та у вимірювальній апаратурі, свіп-генератори на гіромагнітних резонаторах для панорамних аналізаторів ланцюгів, генератори для портативних імпульсних радарів та генераторів з лінійною частотною модуляцією.

2.2 Сучасний стан виробництва генераторних діодів

Підприємства спеціалізуються на виробництві генераторних пристроїв, діодів Ганна з широкою номенклатурою по потужності, частоті та смузі генерації, що характеризуються низьким рівнем амплітудних та фазових шумів, різноманітним конструктивним виконанням (як корпусних приладів, так і безкорпусних виробів для поверхневого монтажу), високою надійністю, забезпеченою 100% технологічними випробуваннями, а також можливістю виготовлення за спеціальними вимогами споживача. Тут рекламуються діоди Ганна сантиметрового діапазону (4-30 ГГц) як малої та середньої (<100 мВт), так і великої потужності (>100 мВт), а також діоди Ганна міліметрового діапазону (30-150 ГГц), причому малої та середньої потужності (<100 мВт) на частотах 30-150 ГГц і великої потужності (>100 мВт) до 30 ГГц. НВЧ генераторні діоди Ганна призначені для роботи у якості активного елемента у радіоелектронній апаратурі (РЕА) для створення АГ малої та середньої потужності, використовуваних як передавачі та гетеродини.

Закордонні виробники пропонують широкий спектр генераторних НВЧ-діодів різного конструктивного виконання. Наприклад, фірма Microsemi RFIS Integrated Solution [7] поряд з елементами різного функціонального призначення пропонує діоди Ганна серії MG1001–MG1060 безперервної потужності від 10 мВт у V (60,5–85 ГГц) та W (85–95 ГГц) частотних діапазонах та до 500 мВт у C-діапазоні (5,4-6,9 ГГц); X (8-12,4 ГГц) та Ku (12,4-18 ГГц) діапазонах, а також до 10 Вт імпульсної потужності в X-діапазоні. Ці діоди з відведенням теплової

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		30

потужності від катода рекламуються виробником як елементи з високими характеристиками, малим рівнем фазових шумів та низьким рівнем фліккер-шуму (пропорційний $1/f$). Серію MG1041–MG1058 представляють діоди Ганна з відведенням розсіюваної потужності від анода, що рекламуються як елементи з наднизьким рівнем фазових шумів та фліккер-шуму. Пристрої випускаються для дискретних частот X-і K-діапазонів при рівнях вихідної потужності до 30 мВт (X-діапазон). Тип застосовуваного АІІ BV напівпровідника діодів, ймовірно, GaAs. Рекомендована виробником область застосування діодів - приймачі, радары, радіометри, доплерівські системи та ін.

Фірма Linwave Electronic Manufacturing Services виробляє діоди Ганна для частот до 94 ГГц, що повторюють параметри, пропоновані фірмою Microsemi RFIS Integrated Solution. Розміри керамічної області (випромінювального простору), що відповідає керамічному циліндру (білого кольору), зменшуються зі зростанням частоти. У 3-см діапазоні довжин хвиль (X-діапазон) поздовжній розмір керамічної вставки менше 3 мм.

Фірма Microwave Technology Centre Teledyne-e2v виробляє корпусні та безкорпусні діоди Ганна у діапазоні частот до 125 ГГц, на основі яких вона виробляє генератори різного функціонального призначення. Рекламуються діоди як з катодним, і з анодним принципом теплоотвода.

Компанія Microwave Device Technology пропонує корпусні та безкорпусні епітаксійні арсенід-галієві діоди Ганна комерційного та військового призначення для діапазону частот 5–110 ГГц. Основний напрямок сучасного процесу розвитку структур діодів Ганна - підвищення частотного діапазону на основі варізонних структур, наприклад, AlInN у варіантах n^+-n-n^+ ; $n^+-n-n-n^+$; n^+-n-n^+ ; $n-n^+$ [11]. Структури забезпечують генераторні діоди із граничними частотами 0,9–1,3 ТГц.

Крім того, стимулюються дослідження можливості підвищення рівнів вихідної потужності та ККД діодів за збереження високих та розширення діапазонних характеристик. Так, дослідження довжин активної області та властивостей матеріалів варізонних структур дозволило досягти збільшення

частотних смуг негативних опорів з 27%, властивих однорідним напівпровідникам, до 97% (60-172 ГГц) в діапазоні напруги живлення 52-80 В.

Отже, сучасний напрямок розвитку ГДГ пов'язаний із освоєнням високочастотної частини (вище 100 ГГц) міліметрового діапазону довжин хвиль і, відповідно, розробкою та впровадженням у пристрої більш високочастотних діодів Ганна на основі нових матеріалів групи $A_{III}B_V$: InP, GaN, SiC та ін.

Діоди Ганна, що випускаються в даний час, дозволяють виробляти автогенератори (АГ) з безперервною вихідною потужністю від одиниць ватів (у сантиметровому діапазоні довжин хвиль) до одиниць міліватів у міліметровому діапазоні. Відносна стабільність частоти таких АГ легко забезпечується на рівні $10^{-4} \dots 10^{-5}$ при рівні амплітудних шумів, властивому для комерційної продукції (на рівні $-140 \dots -150$ дБ/Гц), та фазових шумів $-100 \dots -110$ дБ/Гц при відбудовах від несучої на 10-100 кГц.

Область застосування сучасних ГДГ — гетеродини прийомопередаючих модулів у верхній області НВЧ- та КВЧ-каналів передачі даних у радіорелейних лініях, а також традиційні автодинні та (рідше) гомодинні модулі систем ближньої радіолокації.

Фірма, що виробляють ЛПД, значно менше, ніж фірма, що випускають діоди Ганна, причому виробників тільки ЛПД фактично немає. Конструктивно ЛПД зовні повторює діоди Ганна.

Фірма QwinStar Technology, Inc (QwinStar Impatt diode - QID), США [14], пропонує лінійку потужних ЛПД (IMPATT diodes) для роботи в безперервному та імпульсному (діапазон частот 75-110 ГГц; пікова потужність 20 Вт при тривалості імпульсу 100 нс) режимах. Габарити діодів з тепловідведенням $\sim 3-4$ мм.

Фірма Microwave Device Technology пропонує кілька ЛПД для створення, на думку виробника, високоефективних автогенераторів безперервної та імпульсної потужності, призначених для застосування в авіаційних системах, системах радіоелектронної боротьби та антенних ґратах (smart antennas). Для генерації безперервної потужності рекламується ЛПД марки MI5022, який у діапазоні

частот 9,5-10,2 ГГц при напрузі живлення 50 В забезпечує вихідну потужність 3,5 Вт з ККД 20%.

Фірма Terahertz Imaging Systems (Terasense Group, Inc.), виробляє джерела КВЧ-коливань на силіконових ЛПД-діодах з прогоновою довжиною 0,6 нм. ЛПД призначені для комплектації конічних та прямокутних рупорних антен джерел, що випускаються фірмою, що включають (опційно) вентиля та ТТЛ-модулятори.

Завершуючи розділ, зауважимо, що діоди Ганна і ЛПД мають якісні відмінності у характеристиках, а й у режимах живлення. Величини напруг живлення зменшуються зі зростанням частоти (зменшенням проміжків дрейфу домену) від ~10–15 В на частотах одиниць ГГц до одиниць вольт в КВЧ-діапазоні в режимі безперервної потужності. Робочі струми діодів Ганна становлять одиниці ампер. Напруга на діод подається стрибком.

ЛПД вимагають живлення від джерела струму, тобто джерела з великим, наприклад, 1000 Ом, внутрішнім опором. Крім того джерело живлення повинен забезпечувати можливість перевищення струму в режимі запуску над силою струму в робочому режимі, в деяких випадках до 1,5 разів. Робоча напруга ЛПД становить до півтори сотні вольт у безперервному режимі генерації. У цьому ЛПД подібні до низьковольтних клістронів, але на відміну від клістронів не вимагають напружених ланцюгів, що на порядки підвищує їх функціональний ресурс.

Область застосування ЛПД - генераторні та підсилювальні пристрої середньої потужності комерційних та оборонних систем.

2.3 Принципи побудови генераторів на діодах

Генераторні НВЧ-діоди (і діоди Ганна, і ЛПД) в еквівалентному схемному поданні — активні двополюсники з ділянкою негативного опору вольт-амперної характеристики або з ділянкою ВАХ, тобто ВАХ з N- або S-образними ділянками, що визначають негативний диференціальний активний опір.

Розрахункові співвідношення високочастотних коливань в електродинамічних структурах з НВЧ-діодами, як правило, базуються на квазісереджених еквівалентних схемах опису процесів у діоді. Еквівалентні схеми містять реактивні елементи, пов'язані з часовим запізненням процесів поширення імпульсів у напівпровідниковому тілі діода, а також конструктивними елементами кріплення напівпровідника, НВЧ-ланцюгів знімання сигналу, ланцюгів живлення тощо. За період з 60-х років минулого століття запропоновано велике число варіантів таких розрахункових схем, які якісно не розрізняються. Коливальна система та навантаження в еквівалентній схемі представляють приведені до затискачів діода еквівалентні опори ланцюга.

Конструктивне виконання діодного генератора у випадку представляє коливальну систему (резонатор), що збуджується провідником, послідовно з'єднаним з діодом, тобто антенною-збудником (елементом зв'язку). При цьому якісне виконання генератора залежить від типу діода. Відмінність пов'язана лише з необхідним положенням точки "включення" активного елемента у резонатор. Це визначає необхідне збудження коливань, опір зовнішнього ланцюга, наведене до затискачів активного елемента.

Більш детальне уявлення конструктивного виконання НВЧ діодного автогенератора ілюструють пристрої ЛПД. Тут показані варіанти реалізації фільтрів живлення та конструктивне виконання тепловідводів.

Можливий варіант збудження хвилеводного резонатора антеною штиром, зміщеною до бічної стінки, що забезпечене застосуванням коаксіального конструкційного трансформатора. Таке включення діода дозволяє реалізувати включення резонатор декількох діодів, тобто створити суматор потужності.

При зміні резонансної частоти коливальної системи - наприклад, при механічній зміні розмірів резонатора або за рахунок включення до нього неоднорідностей, а також при зміні реактивностей, підключених до резонатора (пов'язаних з ним), зокрема керованих ємностей, змінюється і частота коливань.

Пристрої аналогічного функціонального призначення представляють мікросмушкові варіанти побудови НВЧ генераторів, що відрізняються лише тим,

що як елемент зв'язку виступає ділянка основного провідника мікросмушкової лінії (МПЛ). Мікросмушкові автогенератори НВЧ мають деякі переваги в розмірах, але добротність коливальної системи на основі МПЛ більш ніж на порядок менша за добротність хвилеводних резонаторів. Це визначає погіршення спектральних характеристик мікросмушкових НВЧ-генераторів. Вирішення проблеми було знайдено в 1960-і роки із застосуванням як основи коливальної системи АГ-ДР. Така коливальна система ефективна за рахунок значно більшої власної добротності, ніж системи на основі мікросмушкового резонатора.

Крім твердотільних резонансних структур на основі ДР, НВЧ-генератори створюють із застосуванням феритових резонаторів, що перебудовуються магнітним полем. Найчастіше ці резонатори утворюють монокристалічні кулі із залізо-іттрієвого гранату (ЖИГ), поміщені в повітряний зазор магнітопроводу електромагніту. Генератори забезпечують перебудову частоти в широкому діапазоні (більше октави) і застосовуються переважно до сантиметрового діапазону довжин хвиль. ЖИГ-генератори використовують при створенні вимірювальних пристроїв, наприклад, свіп-генераторів аналізаторів ланцюгів, де не потрібно швидкого сканування. Переваги таких генераторів супроводжуються збільшенням розмірів, що визначаються магнітною системою. Об'єм електромагніту на порядок перевищує розміри генератора з механічною або електричною (варакторною) перебудовою частоти. Зі зростанням частоти генерації напруженість магнітного поля, необхідна роботи ЖИГ-резонатора, лінійно зростає, що пропорційно збільшує розмір електромагніту. У міліметровому діапазоні довжин хвиль співвідношення електронної частини генератора вже на два порядки менше за розміри електромагніту генератора.

Зі зростанням частоти технічні рішення НВЧ-генераторів трансформуються у бік застосування хвилеводних труб. Це пояснюється зниженням (через дисперсію властивостей діелектриків) добротності МПЛ і ДР, що погіршує спектральні характеристики генераторів. Крім того, зменшення вихідної потужності діодів на більш високих частотах (визначається фізичними явищами у напівпровідникових середовищах діодів) вказує на важливість формування систем

підсумовування потужності на діодах. Особливо актуальне це завдання при створенні генераторів дуже високих частот (КВЧ-генераторів).

Є три варіанти побудови суматорів потужності діодних генераторів (ДД):

- за допомогою багатополюсних схем-суматорів;
- зі складанням сигналів у загальному резонаторі;
- зі складанням сигналів у просторі (фазовані антенні решітки).

Найчастіше підсумовуються однотипні сигнали ГДГ. При цьому ефект підвищення вихідної потужності складання n автогенераторів супроводжується $\sim\sqrt{n}$ раз поліпшенням співвідношень сигнал/шум вихідного сигналу суматора. У міліметровому діапазоні довжин хвиль, з переходом від порожнистих хвилеводних труб до структур діелектричних хвилеводів, змінюється тип резонансних систем. Коливальні системи ГДГ утворюють відкриті резонатори Фабрі - Перо, дифракційні ґрати Брегга і т. п. При цьому застосовують два типи діодних генераторів. У першому — у відкритому резонаторі підсумовують потужності кількох хвилеводних генераторів, а у другому — відбувається підсумовування потужностей кількох діодів, розміщених усередині резонатора, наприклад, на поверхні його дзеркала, та електромагнітно пов'язаних з ним.

2.4 Класифікація діодних генераторів

Наведені відомості щодо побудови НВЧ- та КВЧ-генераторів на ефект негативного диференціального опору активного двополюсника лише якісно описують різноманіття конкретних технічних рішень щодо створення таких пристроїв. Умовно рішення на основі генераторних діодів поділяють на такі види:

- автогенератори безперервної потужності фіксованих частот;
- автогенератори безперервної потужності з механічною перебудовою (налаштуванням) частоти;
- автогенератори безперервної потужності з перебудовою (налаштуванням) частоти за напругою живлення діода;

- автогенератори безперервної потужності з електричною перебудовою (налаштуванням) частоти із застосуванням варикапу (варакторного діода);
- автогенератори безперервної потужності з комбінованою (одночасно і з механічною та з електричною) перебудовою частоти;
- імпульсні генератори;
- синхронізовані генератори;
- генератори з фазовим автопідстроюванням;
- генератори з автопідстроюванням частоти;
- генератори з температурним підстроюванням частоти генерації.

Однак подібний поділ генераторних пристроїв дуже умовний. Наприклад, виробництво (навіть малою серією) генераторів вимагає запровадження технологічних підстроїв, що компенсують розкид параметрів комплектуючих. Такі підстроювання, як правило, забезпечують введенням елементів механічного підстроювання частоти резонаторів, узгоджувачів елементів та ін. Рідше підстроювання реалізують варіацією живлення активного елемента, що забезпечується введенням резистивних ділянок напруги. З іншого боку, в генераторах з електричною перебудовою частоти є елемент механічної підстроювання частоти генерації в початкову (робочу) точку. Все сказане відноситься і до імпульсних діодних генераторів.

Закордонні виробники генераторних пристроїв часто активно рекламують якісь невеликі відмінності моделей. Наприклад, у пристроях з механічною перебудовою частоти особливо виділяють наявність мікрометричного гвинта переміщення елемента перебудови частоти (звичайного елемента перебудови частоти резонатора коливальної системи генератора). З погляду особливостей генератора така опція не важлива, але на ній часто акцентується увага.

Особливий клас генераторів з електричною перебудовою частоти представляють пристрої з варикапною (варакторною) перебудовою частоти. Ці генератори називають генераторами, керованими напругою (ГКН). Виділення їх базується на спеціальному функціональному призначенні — основі генераторів із частотним підстроюванням частоти та фазовим автопідстроюванням частоти

щодо опорного сигналу (це може бути «опорний генератор», найчастіше гармоніка кварцового генератора, або частотна точка на характеристиці резонансної кривої стабільного резонатора).

Синхронізовані генератори умовно можна зарахувати до підсилювальних пристроїв, у яких потужний вихідний каскад виступає ролі регенеративного підсилювача малопотужного джерела НВЧ-сигналу.

Еволюція інфраструктури стільникового зв'язку почалася з аналогових систем 1G у 1980-х роках, за якими послідували цифрові системи 2G, такі як GSM, де блок основної смуги частот, цифровий блок, підключений до телекомунікаційної мережі, розташовувався разом з аналоговим головним радіоблоком в укритті на основу антени вежі. Товсті коаксіальні кабелі з малими втратами використовувалися для підключення цих пристроїв до антен на вершині високої вежі з підсилювачами компенсації втрат потужності на коаксіальних кабелях. В останніх системах 3G та 4G замість традиційних мереж 1G та 2G використовуються розподілені мережі. У розподілених мережах радіоблок, включаючи всі передавальні та приймальні компоненти з підсилювачами, відокремлюється від блоку модулюючого сигналу та розміщується на вершині антеної вежі. Довгі коаксіальні кабелі із втратами на високих частотах замінені оптоволоконними передаючими лініями, що передають цифрові дані на вежу. Ця архітектура забезпечує значне підсилення каналу зв'язку, оскільки радіоголовка розташована поруч із антенами. У системах 4.5G та 5G блок обробки основної смуги частот буде централізованим. Видалений радіоблок буде безпосередньо інтегрований з сотнями антенних елементів, утворюючи масивну схему МІМО.

Щоб визначити вимоги та мотиви цієї передової технології МІМО, розглянемо, як розвивалася масова технологія МІМО та чому вона необхідна для майбутніх мереж 5G. Це буде представлено разом з критично важливою технологією масивних антенних решіток МІМО для перетворення 4G на 5G та проблемами, пов'язаними з її розгортанням та вимірюванням.

Перш ніж приступити до формування променя, ми введемо управління променем, яке виконується шляхом спрямування головної пелюстки антени в

одному з ряду наперед визначених напрямків. Щоб вирішити, який напрямок має використовуватися в передавачі, застосовується кілька методів, таких як передача ортогональних пілот-сигналів у кожному з визначених напрямків. Потім UE повідомляє свою обслуговуючу соту BS, який сигнал прийнятий з найбільшою потужністю. Використання керування променем допомагає покращити рівні потужності сигналу в осередках із всеспрямованими антенами, оскільки потужність сигналу зменшується від центру комірки до краю комірки. Спрямовуючи всю енергію в певному напрямку, SINR значно покращується на краю комірки, більше того, кілька незалежних комірок, що працюють в одній і тій же області, можуть бути поєднані без будь-якої форми координації або співробітництва та розміщені близько один до одного. У цьому випадку всі передавальні антени розташовуються в одному місці з використанням управління променем для спрямування енергії у певному напрямку. Хоча спільне розміщення покращує SINR на краю комірки, бічні пелюстки викликають занепокоєння через перешкоди. Для цього потрібні антени з меншими бічними пелюстками.

З іншого боку, для формування променя використовується оцінка каналу. Компенсація зважування антени застосовується в режимі реального часу для формування променя, спрямованого на користувача, замість захоплення одного з задалегідь визначених напрямків, як у разі управління променем.

Щодо особливостей генераторів з температурною компенсацією зрушень частоти зауважимо, що такою опцією тією чи іншою мірою забезпечені будь-які генератори.

Інша річ, яким чином ефект температурної компенсації реалізований. Так, якщо частота генерації контролюється частотою резонатора (при дуже високій навантаженій добротності останнього), достатньо забезпечити високу термостабільність останнього. Однак реально (через «кінцеву» добротність резонаторів) найпростіший варіант реалізується при взаємній компенсації температурних доглядів параметрів компонентів ланцюга, що визначають частоту генерації. Часто процес термокомпенсації формується протилежним усуненням частоти генерації внаслідок зміни частоти резонатора та зміщення частоти за

рахунок температурних змін параметрів активної області генераторного діода. Найпростіше такий прийом здійснюється при застосуванні діелектричних резонаторів з широким спектром можливих значень температурних коефіцієнтів відносної діелектричної проникності [22]. Усі перелічені варіанти побудови систем термокомпенсації зсувів частоти генерації відносяться до пасивних варіантів систем термокомпенсації. Найкращі варіанти таких систем забезпечують нестабільність частоти генераторів не вище 10^{-6} .

Крім пасивних систем термокомпенсації частоти автоколивань, можлива реалізація температурної стабілізації частоти на основі генератора з автопідстроюванням частоти. При цьому як опорний сигнал можна застосувати відображення від термостабільного ДР.

До опцій генераторних пристроїв можна віднести і різні допоміжні вузли, наприклад помножувачі частоти, системи управління живленням, системи управління термокомпенсаторами і т.п.

Аналізуючи варіанти побудови діодних генераторів, звернемо увагу на зростаючу різноманітність пристроїв, що розглядається науковою спільнотою і виникає в результаті появи на ринку пропозицій різних комбінацій генераторів з опціями, що розширюють та покращують характеристики автогенераторів. Серед таких опцій насамперед слід згадати вентиля у лінії виведення потужності. Такі вузли можуть бути як вбудованим, і зовнішнім елементом генератора.

Як опція можна розглядати і зовнішні пристрої множення частоти сигналу АГ, якщо множник не вбудований в основний корпус генератора.

Крім того, в якості опції можна представити будь-який вузол, підключений до роз'єму АГ, що має спеціальні властивості, орієнтовані на застосування саме з даним пристроєм АГ. До таких вузлів можна віднести АГ опорного сигналу у разі побудови системи підстроювання частоти або фази генератора, помножувачі та дільники частоти, що підключаються до виходу АГ, і т.д.

Висновки до другого розділу

Залежно від параметрів кристала, властивостей навантаження, температури і напруги живлення генератор на діоді Ганна може працювати в одному з декількох режимів, що істотно відрізняються, загальним для яких є формування імпульсів струму в зовнішньому колі. Імпульс струму формується у процесі переміщення у кристалі діода «згустку» напруженості електричного поля чи носіїв заряду — домену. Залежно від особливостей (виду) доменів теоретично розрізняють доменні режими (пролітний, із затримкою та з гасінням домену), гібридні режими, режим з обмеженням накопичення об'ємного заряду.

Проведений огляд стану ринку діодних генераторів дозволяє визначити основний напрямок зусиль наукової та технічної думки щодо розвитку НВЧ та КВЧ активних пристроїв на основі діодів Ганна та ЛПД. Потрібно відзначити видиму перевагу зарубіжних виробників по широті спектру робіт і пропонованої продукції. Проте в цьому напрямі електронної техніки відставання вітчизняної промисловості може бути відновним, звичайно, при певних вкладеннях, які видаються відносно помірними.

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		41

3 РОЗРАХУНОК ГЕНЕРАТОРА НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ

3.1 Технічні вимоги до генератора

Розглянемо методику проектування електричної схеми НВЧ генератора, керованого напругою (ГКН). Розглянуто шляхи вирішення комплексу суперечливих вимог, що пред'являються до подібних генераторів: частота і потужність вихідних коливань, діапазон і крутість електричної перебудови частоти, вплив змін навантаження на частоту, що генерується, можливість двоканальної роботи, допустима розв'язка між каналами, рівень фазового шуму. Як приклад спроектована електрична схема ГКН діапазону 17 ГГц, призначена для реалізації у вигляді монолітної інтегральної мікрохвильової схеми, розраховані її основні параметри та характеристики.

Генератори, керовані напругою (ГКН), охоплені петлею фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), – невід'ємні елементи синтезаторів частот, що застосовуються в передавальних та приймальних трактах радіосистем. У цій роботі наводиться методика проектування електричної схеми ГКН, що працює в діапазоні 17...20 ГГц. Передбачається, що ГКН буде виконаний у вигляді мікросхеми на арсеніді галію, в якості активного елементу застосований польовий транзистор з бар'єром Шоттки (ПТШ). З метою зменшення розміру схема ГКН виконується на елементах із зосередженими параметрами. Довжина хвилі в мікросмужковій лінії на підкладці з GaAs товщиною 100 мкм у діапазоні, що розглядається, становить 5,3...6,3 мм, тому розміри елементів схеми не повинні перевищувати приблизно 0,7...0,8 мм.

ГКН повинен мати два виходи: один для передачі потужності коливань в навантаження, інший – організації петлі ФАПЧ. При проектуванні задають такі основні параметри [1]:

- частоту коливань f_0 ,
- потужність на кожному виході $P_{вих}$,

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		42

- діапазон електричної перебудови частоти Δf ,
- крутизну електричної перебудови $df / dU_{упр} df/dU_{упр}$ ($U_{упр}$ – напруга управління),
- розв'язання шляхів проходження сигналів між каналами,
- придушення гармонік основної частоти $10\lg(P_n / P_{вих})$, де (n – номер гармоніки) - фактор затягування, тобто максимальна зміна частоти генерації при зміні фази коефіцієнта відбиття від навантаження для певного модуля коефіцієнта відбиття.

Повинна бути передбачена стабільність частоти ГКН при коливаннях напруги живлення, а також низький рівень фазового шуму.

Можна запропонувати такий порядок проектування ГКН:

- складання електричної схеми автогенератора, що перебудовується, оптимізація його параметрів з метою отримання для моделі: заданої частоти, необхідної потужності, заданої смуги та крутості електричної перебудови частоти, мінімального рівня фазового шуму;
- розрахунок дільника потужності, необхідного для отримання двох вихідних каналів;
- проектування буферних каскадів, що забезпечують необхідну навантажувальну характеристику автогенератора, що перебудовується, необхідну розв'язку між вихідними каналами;
- моделювання в програмі Microwave Office і розрахунок основних характеристик повної схеми ГКН, що складається з автогенератора, що перебудовується, дільника потужності та буферних каскадів.

3.2 Електрична схема генератора керованого напругою

Якщо виконати схему автогенератора на елементах із зосередженими параметрами, то найбільш стабільною і найчастіше застосовуваною є ємнісна триточка (схема Колпітца).

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		43

На рисунку 3.1 показана електрична схема ГКН, виконана на польових транзисторах Шотткі (ПТШ) та розрахована на діапазон 1 ГГц.

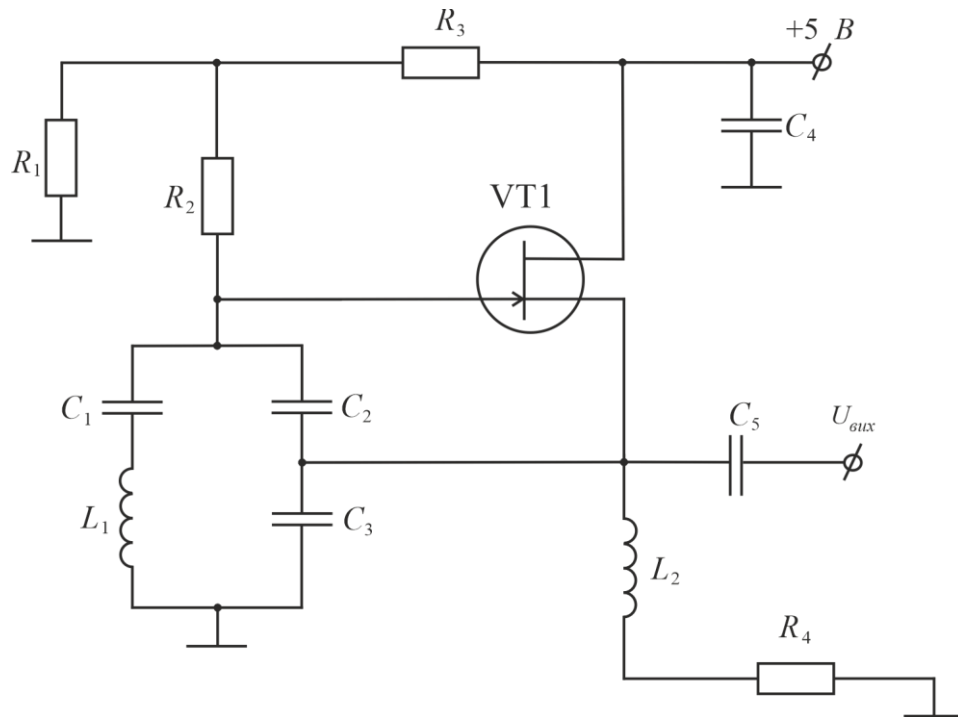


Рисунок 3.1 – Схема надвисокочастотного генератора

Резонатор автогенератора утворений котушкою індуктивності L_1 , конденсаторами C_1 , C_2 , а також ємностями транзистора: затвор витік C_3 -в та затвор стік C_3 -с. Конденсатори C_3 та C_5 – розділові. Сток транзистора заземлений змінним струмом за допомогою блокувального конденсатора C_4 . Зсув на затвор транзистора подається від джерела через дільник напруги, утворений резисторами R_1 і R_2 . Резистор R_3 – блокувальний.

Для того щоб з'єднати джерело транзистора з землею по постійному струму і при цьому забезпечити знімання вихідної потужності з початку, застосований короткозамкнутий відрізок лінії передачі $TL1$. З метою зменшення довжини цього відрізка включена блокувальна котушка індуктивності L_2 .

Частоту коливань можна встановлювати підбором індуктивності котушки L_1 . Електрична перебудова частоти здійснюється зміною напруги зміщення на затворі за допомогою джерела $V2$.

Коливальний контур з'єднаний з навантаженням автогенератора з коефіцієнтом включення $p_n = U_{C_2} / U_{L_1}$, де U_{C_2} – амплітуда напруги на навантаженні (на конденсаторі C_2), U_{L_1} – амплітуда напруги на котушці L_1 (у точках з'єднання ємнісної та індуктивної гілок контуру). При досить високій добротності контуру орієнтовно

$$p_n = \frac{C_\Sigma}{C_2}$$

$$\text{де } C_\Sigma = \frac{(C_1 + C_{3-\theta})C_2}{C_1 + C_{3-\theta} + C_2}$$

сумарна ємність контуру. Ємністю затвор-стік транзистора нехтуємо через її невелику кількість. Провідність навантаження, перерахована до висновків котушки індуктивності контуру L_1 (повне включення контуру та навантаження)

$$Y_n^1 = p_n^2 Y_n$$

де Y_n – провідність навантаження, паралельно конденсатору C_2 .

Схема автогенератора змодельована та оптимізована у програмі Microwave Office.

Попередньо виконано орієнтовний розрахунок схеми за простими інженерними формулами.

3.3 Розрахунок резонатора

Індуктивність коливального контуру вибираємо таким чином, щоб його характеристичний опір на заданій частоті генерації ω_0 був досить високим,

наприклад $\omega_0 L_1 = 100$ Ом. Далі розраховуємо сумарну ємність контуру $C_\Sigma = (\omega_0^2 L_1)^{-1}$.

Співвідношення між ємностями конденсаторів контуру визначається коефіцієнтом зворотного зв'язку по напрузі $K_{33} = U_{C1} / U_{C2}$, де U_{C1} – амплітуда напруг між затвором і витоком. Приблизно можна вважати, що

$$K_{33} = \frac{C_2}{C_1 + C_{3-e}}$$

Величину K_{33} знаходимо з розрахунку режиму роботи транзистора, а C_{3-e} – за її вольт-фарадною характеристикою. З виразів (2) та (3) розраховуємо ємності конденсаторів контуру C_1 та C_2 .

3.4 Режим роботи транзистора

Для розрахунку режиму роботи транзистора доцільно користуватися розрахованою перехідною характеристикою транзистора (рис. 2). Миттєва напруга на затворі не повинно підніматися вище 0 В, щоб уникнути відкриття бар'єру Шоттки і супутнього перегріву транзистора. Враховуючи цю обставину, а також необхідність надійного відкриття транзистора, встановимо постійну напругу зсуву на затворі $U_{3-e} = 0,3$ В. Амплітуда змінної напруги на затворі становить у цьому випадку 0,3 В.

Напругу живлення для даного транзистора рекомендується вибрати рівною 3 В. Щоб уникнути роботи транзистора в перенапруженому режимі, встановимо амплітуду змінної напруги стоку $U_{c-e} = 1$ В. У цьому випадку коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі $K_{33} = 0,3$.

Потужність, що віддається транзистором у контур:

$$p = 0,5 U_{c-e}^2 G_k$$

де G_k - дійсна частина повної провідності контуру в точках сток-витік, звідси можемо знайти необхідну провідність для досягнення заданої потужності. Якщо у першому наближенні не враховувати втрати у контурі, то відповідно до схеми рис. 1, G_k дорівнює провідності навантаження $0,02 \text{ С}$ і потужність, що генерується, становить 10 мВт .

Розрахуємо схему електричної перебудови частоти. Для електричної перебудови частоти часто у резонатор включають варикап [3]. Однак можна використовувати нелінійність ємності затвор-виток транзистора, яка є частиною коливального контуру автогенератора. При зміні ємності затвір- витік на $\pm \Delta C_{3-6}$ щодо середнього значення змінюється сумарна ємність на $\pm \Delta C_{\Sigma}$, і частота, що генерується, стає рівною $f = f_0 \pm \Delta f$, де відносна зміна частоти коливань

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx 0,5 \frac{\Delta C_{\Sigma}}{C_{\Sigma}} \quad (3.1)$$

Зв'язок ΔC_{Σ} з ΔC_{3-6} і визначається виразом

$$\Delta C_{\Sigma} = p_C^2 \Delta C_{3-6} \quad (3.2)$$

де $p_C = U_{C1} / U_{L1} = C_{\Sigma} / (C_1 + C_{3-6})$ – коефіцієнт включення ємності C_{3-6} в коливальний контур. Звідси

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2} p_C^2 \frac{\Delta C_{3-6}}{C_{\Sigma}} \quad (3.3)$$

Змінювати ємність ΔC_{3-6} , отже, здійснювати електричну перебудову частоти можна, змінюючи напругу на затворі транзистора за допомогою

зовнішнього джерела V2, показаного на рис. 1. Крутизна перебудови може бути надмірною, для її зменшення напруга від джерела подають через дільник напруги.

Для того щоб визначити, яка зміна напруги на затворі потрібна для отримання потрібної зміни ємності $\Delta C_{з-г}$, необхідно знання її вольт фарадної характеристики (ВФХ).

Визначимо вольт-фарадну характеристику вхідної ємності транзистора. Для отримання вольт-фарадної характеристики вхідної ємності транзистора, розраховуємо уявну частину його вхідної провідності B_{in} в діапазоні частот при постійній напрузі на стоку, що дорівнює 3 В, і змінюється в діапазоні -0,8 ... 0 В напрузі на затворі у відповідності залежностями.

Отримаємо залежність ємності $C_{з-г}$ від напруги між затвором і витком. Ємність $C_{з-г}$ розраховувалася за даними з використанням формули:

$$C_{з-г} = \frac{\Delta B_{in}}{\Delta \omega} \quad (3.4)$$

Визначимо навантажувальну характеристику ГКН

Передбачається, що автогенератор, який перебудовується, пов'язаний з навантаженням Z_n лінією передачі. Навантажувальна характеристика автогенератора являє собою залежність частоти, що генерується, від змін фази коефіцієнта відображення від навантаження $\Gamma e^{j\varphi}$ при певному коефіцієнті стоячої хвилі напруги в навантажувальній лінії k_{cx} . Вважається допустимим максимальне значення $k_{cx} = 2$, що відповідає модулю коефіцієнта відбиття $\Gamma = 0,33$, фаза φ при цьому може бути довільною в межах 0 ... 360°.

Наявність відбитої хвилі в навантажувальній лінії еквівалентно тому, що її вхідна провідність має комплексний характер $Y_{ex} = G_{ex} + jB_{ex}$, вона і є навантажувальною провідністю автогенератора, що перебудовується. Провідність Y_{ex} пов'язана з коефіцієнтом відбиття лінії співвідношенням:

$$Y_{ex} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1 - \Gamma(\cos \varphi_0 + j \sin \varphi_0)}{1 + \Gamma(\cos \varphi_0 + j \sin \varphi_0)} \quad (3.5)$$

де ρ – хвильовий опір лінії, φ_0 – фаза коефіцієнта відбиття напруги на початку лінії (на виході автогенератора).

З (5) нескладно отримати вираз для уявної частини B_{ex} , яка і впливає, головним чином, на зміну частоти, що генерується:

$$B_{ex} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\sin \varphi_0}{A + \cos \varphi_0}. \quad (3.6)$$

$$A = \frac{1 + \Gamma^2}{2\Gamma}. \quad (3.7)$$

Дослідження (6) на екстремуми показує, що при зміні φ_0 уявна частина провідності навантаження змінюється від

$$B_{min} = \frac{1}{\rho} (A^2 - 1)^{-0.5}$$

до

$$B_{max} = \frac{1}{\rho} (A^2 + 1)^{-0.5},$$

тобто. найбільша зміна уявної частини $\Delta B_{ex} = B_{max} - B_{min}$ з урахуванням (7)

$$\Delta B_{ex} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{4\Gamma}{1 - \Gamma^2}. \quad (3.8)$$

Знайдемо фактор затягування, тобто зміну частоти генерації при максимальній зміні уявної частини провідності навантаження ГКН [4].

Провідність ΔB_{ex}^1 , перерахована до виводів індуктивності L_1 визначається співвідношенням:

$$\Delta B_{ex}^1 = \rho_n^2 B_{ex}, \quad (3.9)$$

де коефіцієнт включення навантаження ρ_n може бути розрахований за (1). Співвідношенням, аналогічним (9), розраховується відхилення ΔB_{ex}^1 при зміні уявної частини вхідної провідності лінії на ΔB_{ex} , при цьому частота генерації змінюється на

$$\Delta \omega = \frac{\Delta B_{ex}^1}{dB_k d\omega}, \quad (3.10)$$

де dB_k - уявна частина повної провідності контуру поблизу резонансної частоти. З виразу (10) з урахуванням (8) та (9) отримаємо:

$$\frac{\Delta f}{f_p} = K \frac{\Gamma}{1 - \Gamma^2}, \quad (3.11)$$

де:

$$K = \frac{4\rho_n^2}{\omega_0 \rho \frac{dB_k}{d\omega}}.$$

З (11) видно, що зменшення фактора затягування слід зменшувати коефіцієнт K і модуль коефіцієнта відбиття від навантаження Γ .

Для зменшення K потрібно послаблювати зв'язок автогенератора з навантаженням і збільшувати крутість залежності уявної частини провідності контуру від частоти. Похідна $\frac{dB_k}{d\omega}$ визначається індуктивністю контуру автогенератора, величина якої обмежена можливістю її інтегрального виконання.

З метою зменшення модуля Γ між автогенератором та навантаженням слід увімкнути буферний каскад.

3.5 Аналітичний розрахунок автогенератора

За наведеними формулами була розрахована схема автогенератора, що перебудовується, на частоту діапазону 17...20 ГГц, призначена для комп'ютерного моделювання. Отримані результати аналітичного розрахунку є початковим наближенням для моделювання та оптимізації схеми автогенератора.

Розрахуємо дільник потужності. Дільник потужності необхідний для створення двох вихідних каналів ГКН. З метою мінімізації розмірів генератора слід відмовитись від дільників, виконаних на відрізках ліній передачі. Можливий варіант дільника потужності на резисторах, показаний на рисунку 3.2.

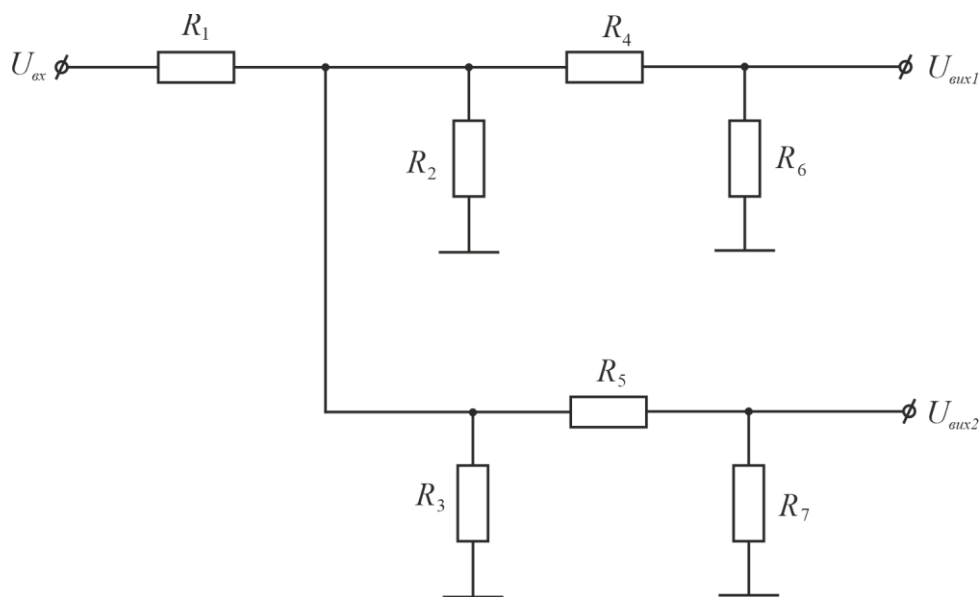


Рисунок 3.2 – Схема дільника потужності

Дільник потужності включає два П образних (або Т образних) атенюатора, що послаблюють вплив змін опорів навантажень на генеровану частоту. На рис. 6 як приклад показані однакові атенюатори, що послаблюють вхідну потужність на

10 дБ. Для створення різних потужностей на виходах обох каналів слід використовувати атенюатори з різним загасанням.

Розрахуємо буферний підсилювач. Пропонується застосувати буферний підсилювач, у якого в якості вхідного кола служить резистивний атенюатор дільника, а вихідний ланцюг в діапазоні частоти генерації узгодить вихідний опір транзистора підсилювача з навантаженням. Підсилювач складається з двох однакових каскадів, на входи яких надходить поділена навпіл потужність коливань автогенератора. Електрична схема одного каскаду буферного підсилювача представлена на рисунку 3.3.

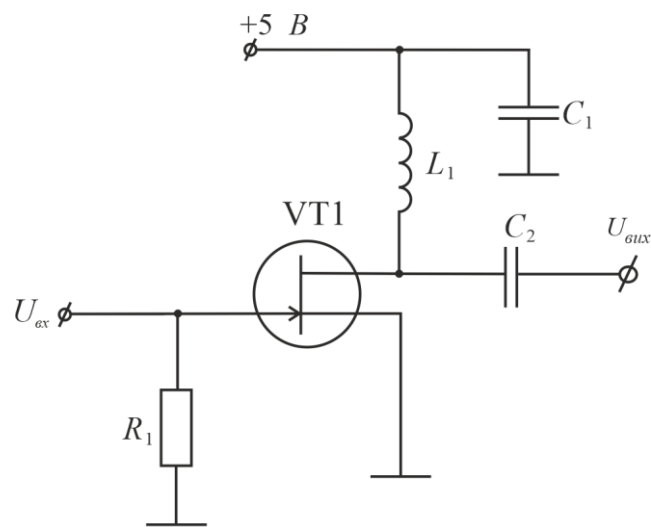


Рисунок 3.3 – Схема буферного підсилювача

Колівання автогенератора надходять у вхідний порт P1; LC-ланцюжок, підключений до стоку транзисторів, є вихідним узгоджувальним ланцюгом.

Для розрахунку параметрів ГКН та їх оптимізації слід змоделювати схему у програмі Microwave Office та розрахувати її параметри у нелінійному режимі. З цією метою автогенератор, дільник потужності та буферні підсилювачі з'єднуються відповідно до блок-схеми, представленої на рис. 8.

Потужність автогенератора 1 поділяється на два канали, на виході кожного з яких включений буферний підсилювач 3.

Розрахунок вихідного діапазону. Спектр вихідних коливань може бути розрахований, якщо схему автогенератора включити генераторний зонд OSCAPROBE. Генераторний зонд є джерелом коливань зі змінними частотою і вихідною потужністю [6]. Він підключається до затвора або початку транзистора, і як результат моделювання на виході ГКН з'являються спектральні лінії в тому випадку, коли частота та амплітуда коливань у ГКН збігаються з частотою та амплітудою коливань генераторного зонда. Спектр коливань на виходах показано на рис. 9. Потужність основної частоти однакова на обох виходах, а потужність другої гармоніки менша від основної більш ніж на 20 дБ.

Перебудова частоти керуючою напругою. Для того щоб отримати залежність частоти коливань від управляючої напруги, потрібно змоделювати схему в нелінійному режимі з включенням зонда OSCAPROBE. Замість джерела постійної напруги DCVS (V2), що подає зсув на затвор, слід увімкнути джерело напруги DCVSS, що перебудовується, і встановити межі і крок перебудови. Для того, щоб вивести результат на графік, картинка на екрані монітора після виклику команди Add Measurement має відповідати рис. 10.

Результат розрахунку перебудовної характеристики свідчить про те, що, при зміні керуючої напруги в діапазоні -3 ... 0 частота змінюється більш ніж на 170 МГц, таким чином крутість перебудови становить 57 МГц / В.



Рисунок 3.4 – Блок схема генератора керованого напругою

Розв'язка між каналами. Для оцінки розв'язки між каналами до одного виходу ГКН підключається PORT1, що є джерелом коливань заданої потужності і частоти, що змінюється, в діапазоні, заздалегідь встановленої для моделювання в програмі Microwave Office. У нелінійному режимі розраховується коефіцієнт

передачі потужності P_{Gain} від цього джерела на другий порт, причому зонд OSCAPROBE зі схеми видаляється. Результат показаний на рис. 12.

Затягування частоти генерації. Щоб оцінити вплив змін навантаження на частоту, до одного з виходів ГКН підключається PORTG з можливістю зміни модуля і фази коефіцієнта відбиття напруги від нього $\Gamma e^{j\varphi}$. Зонд OSCAPROBE у цьому розрахунку у схему включений. Розраховують фактор затягування частоти, тобто максимальну зміну частоти коливань при зміні фази від 0 до 360° та мінімально допустимому модулі $\Gamma = 0,33$.

У таблиці 2 наведена залежність δf (перевищення генерованою частотою значення 17 ГГц) від фази коефіцієнта відбиття від навантаження одного з каналів ГКН при модулі коефіцієнта відбиття $\Gamma = 0,33$ ($k_{зв} = 2$).

Як очевидно з таблиці, фактор затягування частоти у даному випадку становить 144 МГц.

Фазовий шум ГКН. Для розрахунку рівня фазового шуму у схемі ГКН слід викликати аналізатор фазового шуму OSCNOISE та встановити його параметри: початкову та кінцеву частоти бічної смуги спектра генератора, в якій розраховується шум, а також крок перебудови. Приклад розрахунку фазового шуму представлено рис. 13.

По горизонтальній осі відкладені частоти відбудови від частоти, на яких проводиться аналіз, по вертикальній осі - спектральна щільність потужності фазового шуму в одній бічній смузі, віднесена до потужності генератора.

Фазовий шум розраховується у процесі нелінійного аналізу схеми ГКН.

3.6 Генератор з колом фазового підлаштування частоти

Сучасні системи мобільного зв'язку вимагають більш високої якості зв'язку, більш високих швидкостей передачі даних, роботи на більш високих частотах та великої кількості каналів на одиницю смуги пропускання. Оскільки більша

частина цього обладнання є портативною, також потрібне низьке енергоспоживання та невеликі розміри. Всі ці обмеження разом роблять весь проект, включаючи вибір і оцінку компонентів, досить складним. Однією частиною цієї конструкції, яка дуже важлива щодо всіх вищезгаданих вимог, є синтезований осцилятор. Типові синтезовані генератори поєднують у собі генератор, керований напругою (VCO) з ІС фазового автопідстроювання частоти (PLL), еталонем частоти (наприклад, кварцовим кристалом / TCXO) і контурним фільтром. ГКН використовується для генерації вихідної частоти ВЧ. PLL (аналогового типу, тобто відмінний від суто цифрової PLL) використовується для стабілізації та керування частотою. Конструкція петлевого фільтра повинна включати всі компоненти, щоб, серед іншого, знайти компроміс між шумом і перехідною характеристикою (рис. 3.5). Опишемо оцінку PLL та VCO та зв'яжемо ці оцінки з інформацією, яка дозволить розробнику схеми оптимізувати всю конструкцію генератора, включаючи петльовий фільтр.

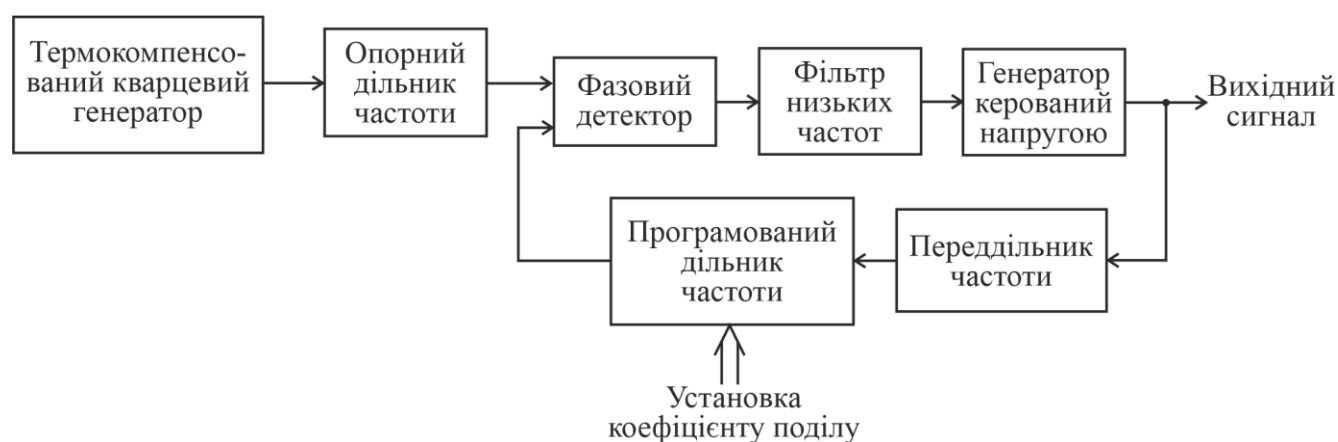


Рисунок 3.5 – Структурна схема генератора з фазовим підлаштуванням частоти

3.7 Польовий транзистор із затвором Шоттки

Польові транзистори з затворами у вигляді контакту метал-напівпровідник містять контакт Шоттки із заданою висотою бар'єру Фв. Відстані між краями

контакту Шоттки та металургійними межами n⁺ областей витоку та стоку не менше 0.1мкм, рис. 3.6.

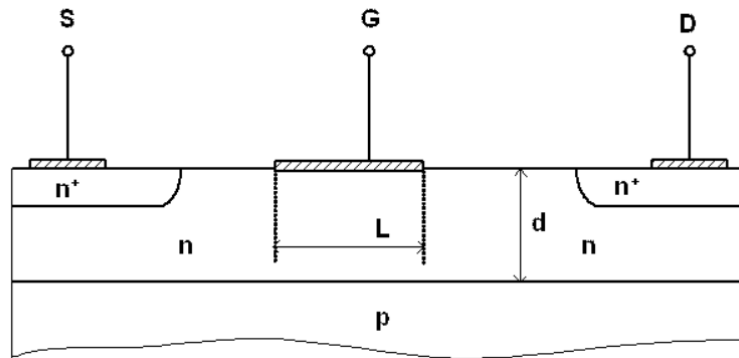


Рисунок 3.6 – Польовий транзистор з затвором Шоттки

висота бар'єру на контакті визначається електростатичним потенціалом у напівпровіднику Φ_B з боку металу, рис. 16 . Величина цього потенціалу дорівнюватиме ,так що при $\Phi_M=0,7$ В і $E_F= 0.3$ еВ $\Phi_B= - 0.4$ В

$$\Phi_B = - \left(\Phi_M - \frac{E_F}{q} \right)$$

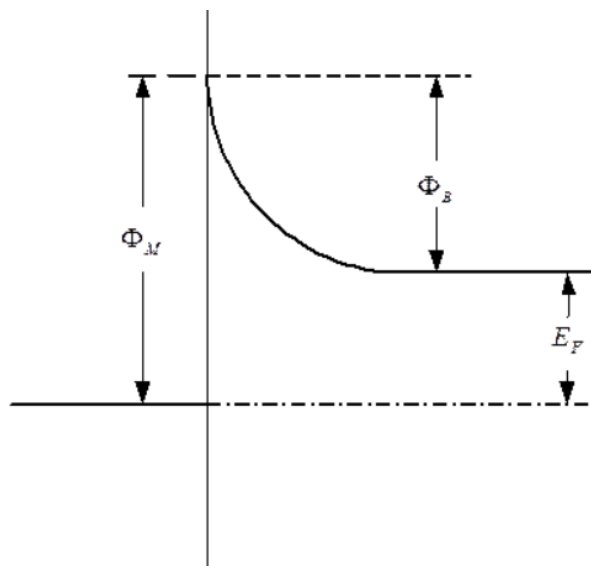


Рисунок 3.7 – Висота бар'єра з боку металу і електростатичний потенціал Φ_s на контакті Шоттки

В якості транзистора обраний CPN3348-TL-E. Його параметри:

Корпус SOT346T3

Максимальна напруга сток-витік – 12 В

Струм стоку номінальний при 25°C – 3 А

Опір відкритого каналу – 70 мОм

Діапазон номінальної напруги затвора 4-5 В

Потужність, що розсіюється – 1 Вт

Ємність затвора – 405 пФ

3.8 Розробка гетеродину з широкосмуговим синтезатором

Синтезатор з фазовим автопідстроюванням частоти ADF4106, що є новим еталоном швидкості і фазового шуму, повністю відповідає вимогам для роботи на частотах до 6,0 ГГц. Це дозволяє значно спростити конструкцію верхнього не ліцензованого діапазону частот від 5,4 до 5,8 ГГц. Швидший доступний синтезатор з цілим коефіцієнтом поділу і може забезпечити зниження фазового шуму на 3 дБ. Для нього потрібне лише джерело живлення 3,3 В, а його виведення V_P розрахований на напругу до 5,5 В для сумісності з рівнями напруги налаштування, які часто потрібні для модульних ГКН в базових станціях.

Синтезатор частот ADF4106 можна використовувати для реалізації гетеродинів (гетеродинів) у секціях підвищуючого та знижувального перетворення бездротових приймачів та передавачів. Він складається з малошумного цифрового фазово-частотного детектора (PFD), прецизійного зарядового насоса, програмованого еталонного дільника, програмованих лічильників А і В та двомодульного попереднього дільника (P/P+1). Лічильники А (6-розрядний) та В (13-розрядний) у поєднанні з двомодульним попереднім дільником (P/P+1) реалізують N-дільник ($N = BP+A$). Крім того, 14-бітний опорний (R) лічильник дозволяє вибирати частоти REFIN на вході PFD. Повний

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		57

контур фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) може бути реалізований, якщо синтезатор використовується із зовнішнім контурним фільтром та генератором, керованим напругою (ГКН). Його широка смуга пропускання означає, що подвоювачі частоти можна усунути у високочастотних системах.

Широка смуга пропускання дозволяє використовувати гетеродин 6 ГГц.

Стандартна архітектура системи ФАПЧ, що використовується в ADF4106 та його попереднику ADF4113. Оскільки максимальна робоча частота ADF4113 становить близько 4 ГГц, вищі частоти вимагають використання подвоювача частоти, що зазвичай вимагає додаткового ВЧ-підсилювача, щоб забезпечити адекватний рівень для подвоювача. Використання ADF4106 усуває необхідність у подвоювачі частоти та пов'язаних з ним схемах, забезпечуючи набагато більш простий та енергоефективний гетеродин. Наприклад, конструкція, показана на рис. 3, генерує вихідні частоти ВЧ з поділом каналів 1 МГц в діапазоні від 5,4 ГГц до 6,0 ГГц. Фазовий шум, виміряний на верхньому кінці, становить -83 дБн/Гц.

Оскільки вхідний імпеданс ADF4106 на цій високій робочій частоті дуже близький до 50 Ом, резистор, що узгоджує, опором 50 Ом на ВЧ-вході не потрібен для максимальної ефективності передачі потужності. Низький фазовий шум дозволяє йому працювати як малOSHумний гетеродин з частотою 1,5 ГГц.

ADF4106 у поєднанні з широкосмуговим дільником може покращити фазовий шум стандартної схеми гетеродину на частотах нижче 2,0 ГГц.

Типова бездротова система може генерувати частоти з кроком 200 кГц від 1450 до 1500 МГц. При використанні архітектури з цілим числом N для цього потрібна опорна частота фазового/частотного детектора 200 кГц, а значення N варіюватиметься від 7250 (1450 МГц) до 7500 (1500 МГц).

Використання ADF4106 для досягнення найкращих характеристик дасть коефіцієнт фазового шуму -88 дБн/Гц. Типові еталонні паразитні перешкоди у такій системі становлять -88 дБн на частоті 200 кГц та -90 дБн на частоті 400 кГц. При реалізації лінії пропускання контуру 20 кГц типовий час синхронізації до 10 градусів фазової помилки становитиме 250 мкс.

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		58

Однак, широкопasmугова робота, можлива з ADF4106, дозволяє розглянути альтернативну архітектуру. У цій конфігурації базова PLL працює на частоті, кратній кінцевій бажаній вихідній частоті. У наведеному вище прикладі бажаний діапазон частот становить від 1450 МГц до 1500 МГц. Кратність у діапазоні частот пристрою становить від 5800 МГц до 6000 МГц (в 4 рази більше бажаної вихідної смуги). У запропонованій схемі FPDF працює на частоті 800 кГц, смуга FVCO становить від 5800 МГц до 6000 МГц, а остаточний вихідний сигнал гетеродину системи виходить шляхом поділу FVCO на 4.

$$f_{out} = (f_{pfd} \times N) / X$$

Деякі переваги використання цієї архітектури наведено нижче.

Розглянемо зниження фазового шуму. Фазовий шум синтезатора має співвідношення $10 \lg f_{pfd}$. Це означає, що при кожному подвоєнні частоти PFD фазовий шум синтезатора погіршуватиметься на 3 дБ. Проте вихідний сигнал ГЧН буде розділений вниз, яке фазовий шум підпорядковується правилу $20 \lg f_{pfd}$. Таким чином, для кожного подвоєння X буде вигреш у характеристиці фазового шуму на 6 дБ. Якщо частота PFD збільшена вчетверо, як зазначено вище, F VCO ділиться на чотири, щоб отримати правильне значення F OUT . Таким чином, 6 дБ будуть втрачені через чотириразове збільшення F PFD .і 12 дБ виходять через розподілу на чотири, що дає загальне підсилення фазового шуму на 6 дБ, використовуючи малюнок, порівняно з використанням стандартної архітектури. У наведеному вище прикладі результуючий фазовий шум дорівнює -94 дБн/Гц.

Зменшення еталонного навантаження. У системі ФАПЧ з цілим N паразитні частоти виникають на цілих кратних частоті PFD на виході ГУН. На малюнку 4а, якщо ви розглядаєте F VCO , ці паразитні перешкоди будуть при F PFD , 2 F PFD , 3 F PFD і т.д. Однак при f OUT основна частота поділяється на X (X = 4), а паразитні частоти все ще існують на частотах, кратних частоті PFD. Зверніть увагу, однак, що їхня амплітуда зменшена на $20 \log X$ ($20 \log 4 = 12$ дБ). рис. 4б.

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		59

Таким чином, використовуючи архітектуру, показану на рис. 4а, з $X = 4$ і генеруючи FOUT від 1450 МГц до 1500 МГц з інтервалом 200 кГц, частотні викиди існуватимуть за цілих кратних 800 кГц, частоті PFD, на рівнях нижче -90 дБн. Зверніть увагу, хоча частота кроку становить 200 кГц, найнижча паразитна частота на частоті 800 кГц.

Оскільки PFD працює на вищій частоті, порівняння фаз відбувається з більшою швидкістю; це призведе до більш швидкого блокування циклу. Крім того, через вищу частоту PFD можлива ширша смуга пропускання контуру, що також допомагає покращити час захоплення. У цьому прикладі час синхронізації становить близько 70 мкс з точністю до 10° фазової помилки смуги пропускання контуру ФАПЧ 80 кГц.

Розглянемо пропускну спроможність. Процес виготовлення BiCMOS 0,35 мкм та ретельне застосування методів радіочастотного проектування дозволяють секції попереднього дільника ADF4106 працювати на частоті до 6,0 ГГц із вхідним рівнем -10 дБм (при опорі 50 Ом), гарантованим у промисловому діапазоні температур (від -40 до $+85$ °C). На малюнку 6 показаний типовий графік чутливості для ADF4106 в корпусі TSSOP при -40°C , $+25^\circ\text{C}$ і $+85^\circ\text{C}$. Добре видно, що продуктивність до 6 ГГц знаходиться в межах можливостей пристрою із сигналами нижче -15 дБм.

Фазовий шум

Фазовий шум, міра чистоти сигналу гетеродина, є єдиною найважливішою характеристикою у розділі гетеродина радіоприймачів, що мають пряме відношення до чутливості приймача. Це відношення до вихідної потужності несучої потужності шуму у смузі шириною 1 Гц при заданому зміщенні від несучої. Виражений як логарифмічного відношення, фазовий шум вимірюється в дБн/Гц. Фазовий шум, як правило, вимірюється аналізатором спектра.

Схема буде використовуватися як модель схеми для обговорення фазового шуму. Загальний фазовий шум у контурі фазового автопідстроювання частоти м:

Збільшення фазового шуму через збільшення частоти, пов'язаного з коефіцієнтом зворотного зв'язку, $1/N$. Збільшення шуму, пов'язане з частотою

PFD. Графік показує характеристики фазового шуму ADF4106 залежно від частоти PFD, FPFД. Це забезпечує показник якості для самої схеми синтезатора ФАПЧ, незалежно від шуму, що вноситься значенням N ФАПЧ і частотою PFD, оскільки вони будуть однаковими для будь-якої аналогічної аналогової схеми. Для ADF4106 цей показник становить -219 дБн/Гц, що на 3 дБ краще, ніж у ADF4113, який був найкращим доступним синтезатором із цілим числом N з точки зору фазового шуму.

За допомогою цього показника якості фазового шуму інженер може розрахувати загальний фазовий шум системи ФАПЧ для будь-якої заданої частоти PFD та вихідної частоти ВЧ. Наприклад, розглянемо генерацію сигналу гетеродину з частотами від 1700 МГц до 1800 МГц та рознесенням каналів 200 кГц. Використовуючи рівняння (2), близький фазовий шум при використанні ADF4106 як синтезатор PLL. Показано, що ADF4106 підпорядковується "правилу" $10 \log F$ PFD (фазовий шум PFD практично лінійний з логарифмічною частотою) досить стабільно до 30 МГц. Деякі пристрої з цілим N починають швидко погіршуватися, коли частота PFD перевищує 1 МГц.

Зверніть увагу, що показник якості -219 дБн/Гц отримано шляхом екстраполяції 8 малюнку назад на частоту 1 Гц. Графік можна використовувати для швидкого визначення продуктивності, можливої в даному налаштуванні PLL, коли відомо значення N. Наприклад, 200 кГц на графіку відповідає фазовому шуму -166 дБн/Гц. Додавання $20 \log N$ (79 дБн) дає фазовий шум системи ФАПЧ - 87 дБн/Гц.

Висновки до третього розділу

Проведений розрахунок генератора надвисоких частот. Генератори, керовані напругою (ГКН), охоплені петлею фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), входять у склад синтезаторів частот. Визначена електрична схема ГКН, обрані параметри елементів.

Виконано проектування електричної схеми НВЧ-генератору, керованого напругою. Розглянуто приклад проектування схеми ГКН частоти 1 ГГц.

Змінювати частоту генерації доцільно шляхом підбору індуктивності коливального контуру автогенератора. Для збільшення діапазону електричної перебування частоти слід зменшувати ємність конденсатора С1 та збільшувати ємність конденсатора С2 (рис. 3.1). Вихідну потужність можна збільшити завдяки застосуванню атенюаторів із меншим загасанням. Для збільшення розв'язки між каналами та зменшення впливу змін навантаження на частоту генерації загасання атенюаторів потрібно збільшувати. Фазовий шум визначається транзистором, що використовується в автогенераторі; шум може бути зменшений на 2...3 дБ шляхом застосування у якості блокувального елемента в колі подачі керуючого напруги не резистора, а індуктивності.

ВИСНОВКИ

1. В результаті виконання кваліфікаційного проекту розроблена структурна схема і принципова схема генератора надвисоких частот

2. Польовий транзистор з затвором на бар'єрі Шотткі (ПТШ) - напівпровідниковий прилад планарно-епітаксiального типу, що має контакти на зовнішній поверхні кристала напівпровідника n-типу і здатний підсилювати і генерувати електромагнітні коливання практично в усьому НВЧ діапазоні з малими власними шумами. ПТШ має менший розкид електричних параметрів. Струм у них тече не через р-n-переходи, а між омiчними контактами однорідного середовища каналу. Завдяки цьому ПТШ мають високу лінійність передавальної характеристики, менший рівень шумів, більшу потужність.

3. Проведений розрахунок генератора надвисоких частот. Генератори, керовані напругою (ГКН), охоплені петлею фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), входять у склад синтезаторів частот. Визначена електрична схема ГКН, обрані параметри елементів.

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		63

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гусєв О.Ю. Теорія електричного зв'язку / О.Ю. Гусєв, Г.Ф. Конахович, В.І. Корнієнко, Г.В. Кузнецов, О.Ю. Пузиренко. Навч. посібник. - Львів: Магнолія, 2006.– 364 с.

2. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / За заг. ред. В. В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 596 с.

3. Пятін І.С. Моделювання спотворень сигналу у каналі передачі/ І.С. Пятін, Д.А. Макаришкін // Вісник ХНУ. - 2020. - №5

4. Волощук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці : підручник для студентів вищ. навч. закладів : у 4-х т. / Ю. І. Волощук. – Х. : ТОВ “Компанія СМІТ”, 2003. – Т. 1. – 580 с. ; 2003. – Т. 2. – 444 с. ; 2005. – Т. 3. – 525 с. ; 2005. – Т. 4. – 496 с.

5. Boiko J., Pyatin I., Karpova L., Eromenko O. (2021) Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate. In: Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_4

6. Пятін І.С. Дослідження систем зв'язку з сигналами F-OFDM/ І.С. Пятін, В.Є. Гавронський, В.І. Лужанський, В.О Михальчук // Вісник ХНУ. - 2021. - №5. – С. 170-176.

7. Boiko J. Investigation of signals distortion during interpolation in SDR transmitters with QPSK modulation /J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko, I. Parkhomey//Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління», 2019 – №1 (34). – С. 5-15.

8. Бойко Ю. М. Підвищення завадостійкості блоків оброблення сигналів засобів телекомунікацій на основі модифікованих схем синхронізації / Ю. М. Бойко // Вісник Національного технічного університету України "Київський

політехнічний інститут". Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування. - 2015. - Вип. 61. - С. 91-107. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2015_61_11.

9. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толюпа. – Київ : Логос, 2018. – 227 с. URL: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6291>.

10. Бойко Ю. М. Синтез і аналіз інформаційно-управляючих систем синхронізації засобів телекомунікацій / Ю. М. Бойко // Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідом. науч.-техн. зб. / Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". – Київ, 2017. – Вип. 1'(30). – С. 8-28. DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.30.2017.117700>.

11. M. A. Ilgaz and B. Batagelj, "Opto-electronic oscillator in the mm-W range for 5G wireless and mobile networks: Design challenges and possible solutions," 2017 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2017, pp. 1-5, doi: 10.23919/ONDM.2017.7958522.

12. Пятін І.С. Моделювання цифрової системи зв'язку з завадостійким кодуванням / І.С. Пятін, В.В. Сергеев // Вісник ХНУ. Технічні науки № 6, 2017 - С. 89-91.

13. Бойко Ю.М. Моделі систем завадостійкого кодування у телекомунікаціях / Ю.М. Бойко, І.С. Пятін// Вісник ХНУ. - 2020. - №4. - С. 174-183.

14. Кваліфікаційний проєкт : методичні вказівки щодо його підготовки та виконання здобувачами вищої освіти (ОР «бакалавр») спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / уклад.: С. К. Підченко, А. А. Таранчук, В. І. Стецюк, О. С. Пивовар. Хмельницький: ХНУ, 2021. – 71 с.

15. Бойко Ю.М. Текстові документи. Загальні вимоги СОУ 207.01:2017 / Ю.М. Бойко, Г.В. Красильникова, Л.І. Першина, Т.Ф. Косянчук. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – 45 с.

					КвРТР.2019022.01.03 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		65

Позначення	Найменування		Кількість	Примітка
Конденсатори				
C1, C3	К10-42, 70 пФ 50В, E24, ±20%	ОЖО.460.116 ТУ	2	
C2	К10-42, 39 пФ 50В, E24, ±20%	ОЖО.460.116 ТУ	1	
C4	К10-42, 510 пФ 50В, E24, ±20%	ОЖО.460.116 ТУ	1	
C5	К10-42, 100 пФ 50В, E24, ±20%	ОЖО.460.116 ТУ	1	
C6	К10-42, 0,1 мкФ 50В, E24, ±20%	ОЖО.460.116 ТУ	1	
C7, C9	К50-40, 2000 мкФ 16В, E24, ±20%	ОЖО.460.116 ТУ	2	
C8	К50-40, 4700 пФ 16В, E24, ±20%	ОЖО.460.116 ТУ	1	
Котушки індуктивності				
L1	КПТР 050901.005, 4 мкГн		1	
L2	КПТР 050901.005, 1,6 мкГн		1	
L3-L4	КПТР 050901.005, 8 мкГн		2	
Резистори				
R1	МЛТ-0,125; 2,2 кОм; E24; ±10%	ОЖО.461.513 ТУ	1	
R2	МЛТ-0,125; 430 Ом; E24; ±1%	ОЖО.461.513 ТУ	1	
R3, R13	МЛТ-0,125; 10 кОм; E6; ±20%	ОЖО.461.513 ТУ	2	
R4, R5	МЛТ-0,125; 1 кОм; E24; ±10%	ОЖО.461.513 ТУ	2	
R6	МЛТ-0,125; 15 кОм; E24; ±10%	ОЖО.461.513 ТУ	1	
R7	МЛТ-0,125; 33 кОм; E24; ±10%	ОЖО.461.513 ТУ	1	
R8	МЛТ-0,125; 200 Ом; E24; ±10%	ОЖО.461.513 ТУ	1	
R9	МЛТ-0,125; 390 Ом; E24; ±10%	ОЖО.461.513 ТУ	1	
R10	МЛТ-0,125; 3 кОм; E24; ±10%	ОЖО.461.513 ТУ	1	
R11	МЛТ-0,125; 1,6 кОм; E24; ±10%	ОЖО.461.513 ТУ	1	
R12	МЛТ-0,125; 100 Ом; E24; ±10%	ОЖО.461.513 ТУ	1	

КвРТР.2019022.01.03 ПЕЗ

Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Волинська О.В.	<i>[Підпис]</i>				
Перевірів		Яновицький О.	<i>[Підпис]</i>				
Н. контр.		Корещька Л. О.	<i>[Підпис]</i>	13.06.22			
Затв.		Мартинюк В.В.	<i>[Підпис]</i>	13.06.22			

Генератор надвисоких частот
Перелік елементів

ХНУ, гр.ТР1с-19-1

Хмельницький національний університет

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Генератор надвисоких частот

Виконав: Студент гр. ТР1с-19-1
Волинець Олександр Володимирович

Керівник: к.т.н., доцент
Яновицький Олександр.Костянтинівич

Метою кваліфікаційної роботи є проектування і розрахунок генератора надвисоких частот. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- виконати огляд принципів побудови сучасних генераторів сигналів надвисоких частот;
- визначити структурну схему генератора надвисоких частот, вибрати елементну базу;
- виконати розрахунок генератора надвисоких частот.

Генератори надвисоких частот використовують для генерації носійної частоти в передавачах, у якості гетеродина в приймачах телекомунікаційних пристроїв

Структурна схема генератора надвисоких частот

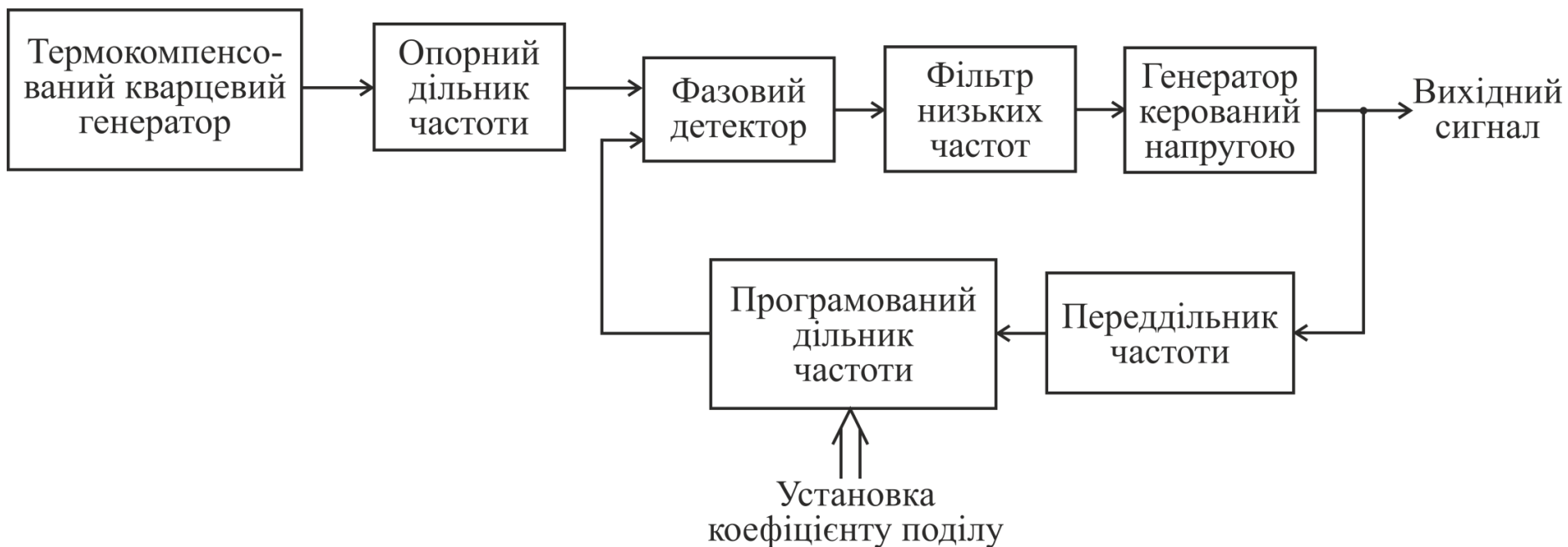


Рисунок 3.1 – Структурна схема генератора надвисоких частот

Структурна схема генератора керованого напругою

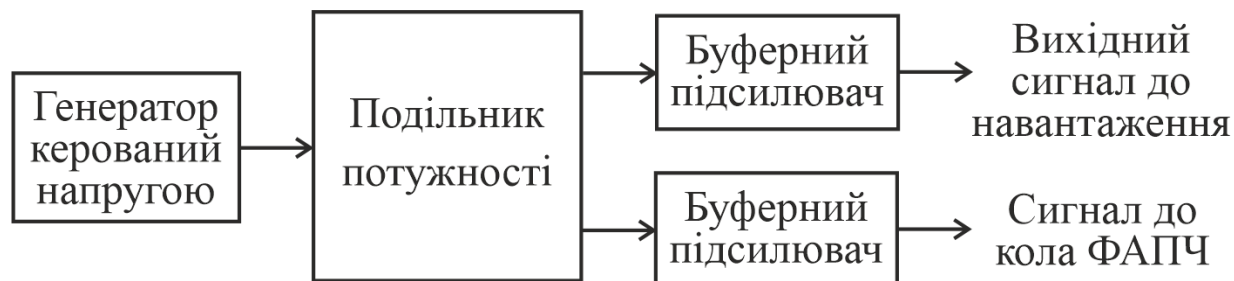


Рисунок 4.1 – Структурна схема генератора керованого напругою

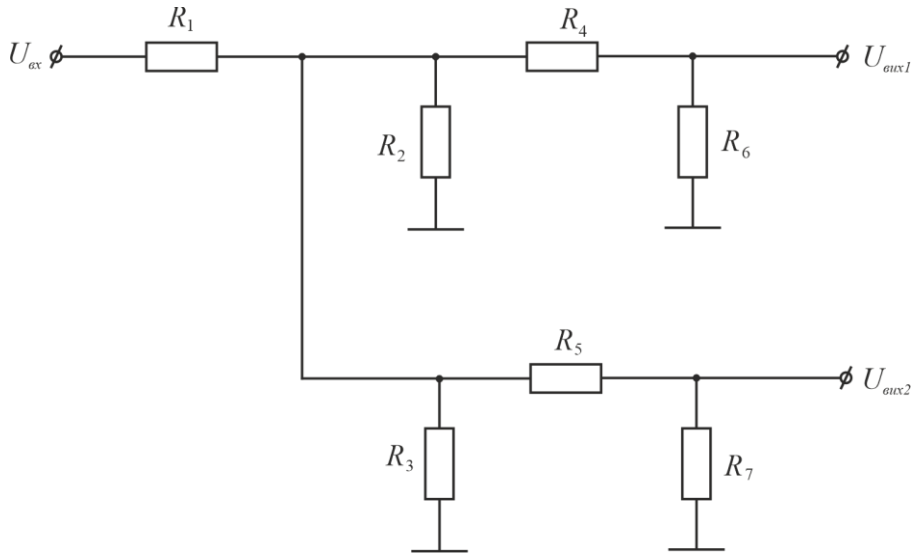


Рисунок 5.1 – Схема дільника потужності

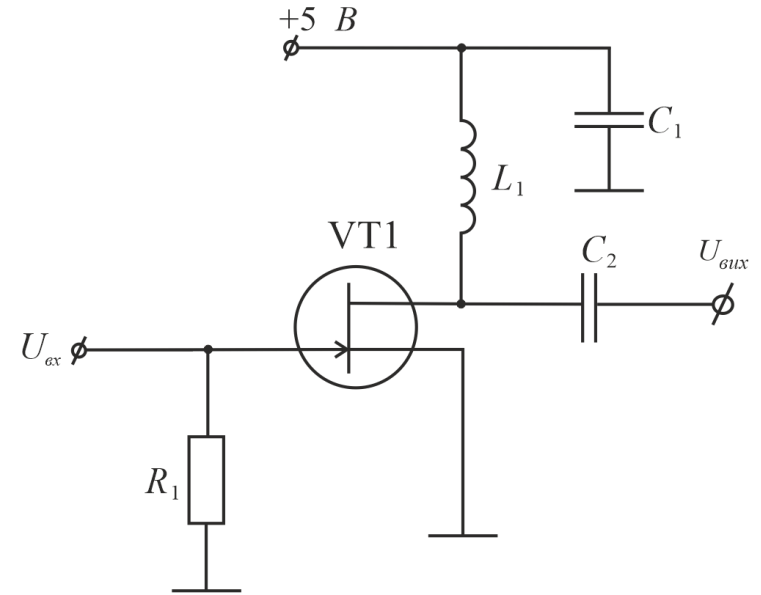


Рисунок 5.2 – Схема буферного підсилювача

Принципова схема генератора надвисоких частот

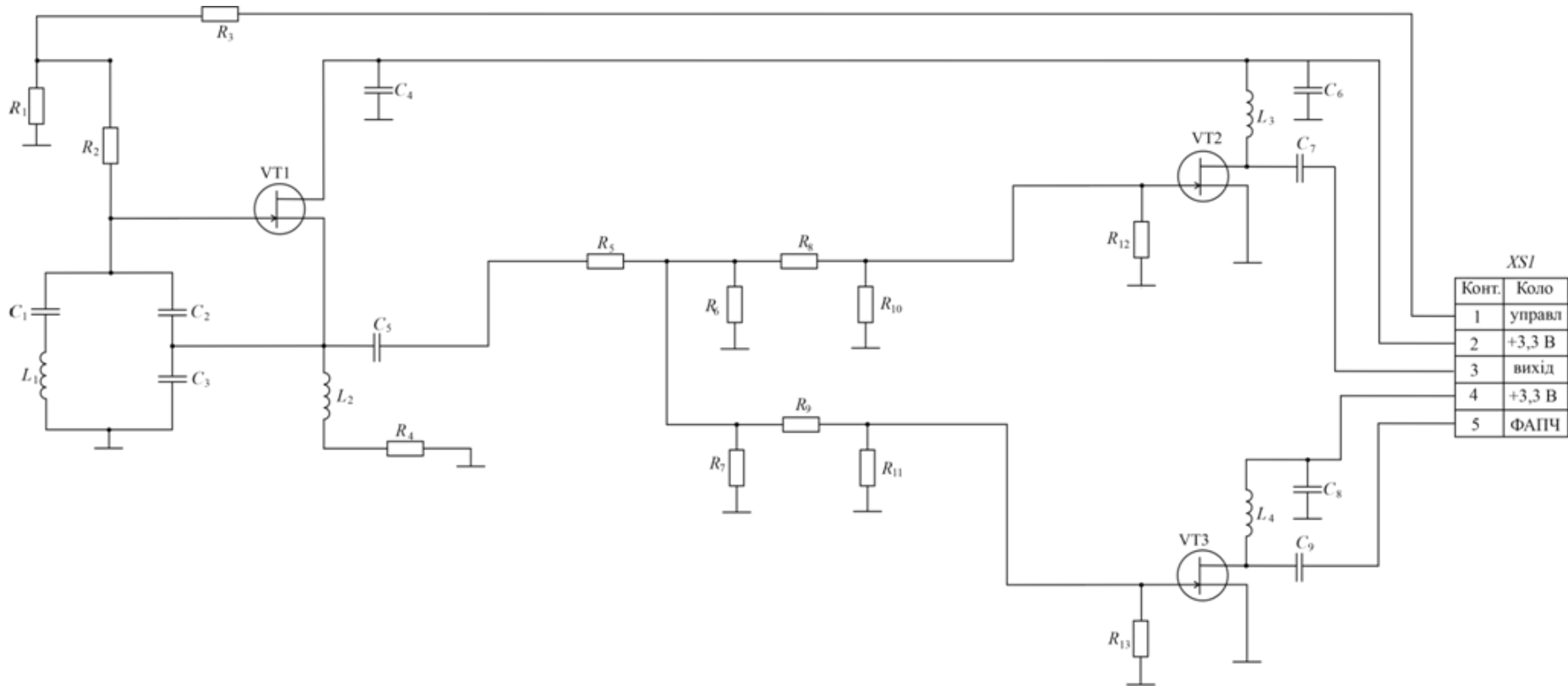


Рисунок 6.1 – Принципова схема генератора надвисоких частот

Частоту коливань можна встановлювати підбором індуктивності котушки L1. Електрична перебудова частоти здійснюється зміною напруги зміщення на затворі джерелом V2.

ВИСНОВКИ

1. В результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблена структурна схема і принципова схема генератора надвисоких частот
2. Польовий транзистор з затвором на бар'єрі Шотткі (ПТШ) - напівпровідниковий прилад, що має контакти на зовнішній поверхні кристала напівпровідника n-типу і здатний підсилювати і генерувати електромагнітні коливання практично в усьому НВЧ діапазоні з малими власними шумами. ПТШ має менший розкид електричних параметрів. Струм тече не через р-n-переходи, а між омічними контактами однорідного середовища каналу. Завдяки цьому ПТШ мають високу лінійність передавальної характеристики, менший рівень шумів, більшу потужність.
3. Проведений розрахунок генератора надвисоких частот. Генератори, керовані напругою (ГКН), охоплені петлею фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), входять у склад синтезаторів частот. Визначена електрична схема ГКН, обрані параметри елементів.

МІНІСТЕРСТВО ОВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Волинець Олександр Володимирович

Тема: Генератор надвисоких частот

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 2 Кількість сторінок записки 67

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень виконано проєктування і розрахунок генератора надвисоких частот, розроблена структурна і принципова схеми пристрою, обрана елементна база

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Дипломна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: Перший розділ присвячено аналізу методів побудови генераторів надвисоких частот. На основі аналізу обраний метод побудови, сформульовані вимоги до генератора. У другому розділі розглянуті принципи і структурні схеми побудови надвисокочастотних генераторів. Генератори, керовані напругою (ГКН), охоплені петлею фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), входять у склад синтезаторів частот. У третьому розділі визначена електрична схема ГКН, обрані параметри елементів. Генератори надвисоких частот функціонують на ефекті негативного диференційного опору активного двополюсника на робочій частоті. Генератор складається з малощумного цифрового фазово-частотного детектора, прецизійного зарядового насоса, програмованого еталонного дільника, програмованих лічильників А і В та двомодульного попереднього дільника. Фазовий шум, міра чистоти сигналу гетеродина, є єдиною найважливішою характеристикою у розділі гетеродина радіоприймачів, що мають пряме відношення до чутливості приймача. Це відношення до вихідної потужності несучої потужності шуму у смузі шириною 1 Гц при заданому зміщенні від несучої. Виражений як логарифмічного відношення, фазовий шум вимірюється в дБн/Гц. Фазовий шум, як правило, вимірюється аналізатором спектра.

4. Позитивні сторони роботи: Генератор надвисоких частот виконано на основі польового транзистора з бар'єром Шоттки, що забезпечує його роботу в діапазоні надвисоких частот

5. Негативні сторони роботи: не в достатній мірі проведено розробка конструкторської документації, наявні стилістичні недоліки

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: - Робота виконана згідно вимог ЄСКД

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на достатньому науковому рівні

8. Інші зауваження: -

9. Оцінка дипломної роботи: Розглянувши представлену роботу, вважаю, що робота заслуговує оцінку добре

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Мішан Віктор Володимирович, Хмельницький національний університет

« » 2022р.


підпис

Завідувачу кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ХНУ

Мартинюку Валерію Володимировичу

здобувача вищої освіти, студента Волиня

Олександра Володимировича, факультету

інформаційних технологій, 3-го курсу,

група ТР1с-19-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу мого кваліфікаційного проєкту виконаного за темою «Радіоприймальний пристрій з цифровою фільтрацією» для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

30.05.2022

дата


підпис

РІШЕННЯ КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Генератор надвисоких частот

Автор: Волинець Олександр Володимирович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к.т.н., доцент Яновицький Олександр Костянтинович

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	-
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
5	Інше:	-

Підтвердження: Виявленні запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), складають 0,67% та мають посилання на приведенний список літературних джерел.

«10» червня 2022 р.

Науковий керівник

Яновицький О.К.

Завідувач кафедрою АКІТ

Мартинюк В.В.

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 0.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибка в документах: 10%

ID: 104990 Название: Бакалаврська кваліфікаційна робота Добавлено в БД: 2022-06-10 Авторы: Волпнець О.В. Руководитель: Яновський О.К. Консультанты: Оponentы:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	90241	738	494 (1%)	10 (1%)

Источник плагиата			
ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы



Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

Дата перевірки:
09.06.2022 21:12:42 EEST

Дата звіту:
09.06.2022 21:14:22 EEST

ID перевірки:
1011527416

Тип перевірки:
Doc vs Internet

ID користувача:
100005862

Назва документа: Волинець-антиплаг

Кількість сторінок: 65 Кількість слів: 12630 Кількість символів: 96693 Розмір файлу: 1.02 MB ID файлу: 1011400688

0.67%
Схожість