

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Бакалавр

Освітній рівень

Формування сигналів у бездротових системах зв'язку

Назва теми

КПТР.022076.01.05 ПЗ

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва галузі

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

Освітня програма «Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі»

програма

Назва освітньої програми

Виконав:

здобувач 4 курсу, група ТР2-22-1



підпис

Максим МАМЧУР

Ініціали, прізвище

Керівник: к. техн. наук, доцент



підпис

Віктор МІШАН

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, професор



підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

«8» червня 2026р.

Хмельницький національний університет

Факультет	інформаційних технологій
Кафедра	телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій
Освітній рівень:	бакалавр
Галузь знань:	17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність:	172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма:	Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ТМІТ

Сергій ПІДЧЕНКО

«23» СІЧНЯ 2026 р.


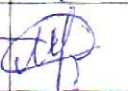


**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ**

МАМЧУРУ Максиму Юрійовичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- 1 Тема роботи: «Формування сигналів у бездротових системах зв'язку»
керівник роботи: МІШАН Віктор Володимирович, к. техн. наук, доцент
Затверджено наказом по університету від «20» січня 2026р. № 7
- 2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 02 червня 2026 року
- 3 Вихідні дані до роботи: літературні та нормативні джерела з радіотехніки та бездротових систем зв'язку, технічна документація на мікроконтролер STM32 і синтезатор частоти ADF4350, параметри ЛЧМ сигналу (центральна частота 900 МГц, девіація 200 кГц, тривалість 1 мс), вимоги до спектральних характеристик і завадостійкості системи.
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 1. Аналіз бездротових систем зв'язку та методів формування сигналів.
 2. Теоретичні основи та розрахунок параметрів формування сигналів.
 3. Проектування структурної та принципової електричної схеми пристрою.
 4. Розробка програмного забезпечення та дослідження роботи пристрою.
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):
 1. Структурна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу.
 2. Функціональна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу.
 3. Принципова схема синтезатора частоти.

6 Консультанти розділів кваліфікаційного проекту

Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	СТЕЦЮК Віктор к.т.н., доцент		
Антиплагіат	ПИВОВАР Олег к.т.н., доцент		

7 Дата видачі завдання 09 лютого 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційний проект	09.02.2026р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційний проект	15.02.2026р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.03.2026р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2026р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2026р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2026р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційного проекту	10.05.2026р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційного проекту	15.05.2026р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційного проекту	20.05.2026р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційного проекту	28.05.2026р.	виконано

Здобувач


28.05.26р
(підпис, дата)

Максим МАМЧУР

Науковий керівник


2.06.26р
(підпис, дата)

Віктор МИШАН



АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проекту: «Формування сигналів у бездротових системах зв'язку»

Автор проекту: МАМЧУР Максим Юрійович

Керівник проекту: МІШАН Віктор Володимирович, к. техн. наук, доцент.

Пояснювальна записка: 66 сторінок, 27 рисунків, 40 джерел.

Графічна частина: технічні креслення.

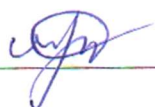
КЛЮЧОВІ СЛОВА: СИСТЕМА РАДІОТЕХНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ, РАДІОЛОКАЦІЯ, РАДІОСИГНАЛ, ФАЗОВАНА АНТЕННА РЕШІТКА, ЦИФРОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ, ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ/ШУМ, ЧУТЛИВІСТЬ ПРИЙМАЧА, ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ.

Об'єктом дослідження є формування та модуляції сигналів у бездротових системах зв'язку.

Метою кваліфікаційного проекту є проектування пристрою формування сигналів для бездротових систем зв'язку, розробка його структурної та принципової схеми, а також реалізація алгоритмів програмного синтезу сигналів із заданими параметрами.

Кваліфікаційний проєкт присвячений дослідженню та проектуванню пристрою формування сигналів у бездротових системах зв'язку. У роботі проведено аналіз сучасних методів модуляції та синтезу радіосигналів, розроблено структурну та принципову електричну схему генератора широкосмугових сигналів на базі мікроконтролера STM32 та PLL-синтезатора частоти. Виконано розрахунок енергетичних параметрів сигналу та реалізовано програмний алгоритм формування ЛЧМ сигналу. Результатом роботи є комплект конструкторської документації для реалізації пристрою.

02.06.2026 р.



Поз.	Формат	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
			Документація загальна		
1	A4	КПТР. 022076.01.05 ПЗ	Пояснювальна записка	1	66 арк.
			Документація графічна		
2	A3	КПТР. 022076.01.05 Е1	Формування сигналів у бездротових системах зв'язку		
			Структурна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу	1	
3	A3	КПТР. 022076.01.05 Е2	Формування сигналів у бездротових системах зв'язку		
			Функціональна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу	1	
4	A3	КПТР.022076.01.05 Е3	Формування сигналів у бездротових системах зв'язку		
			Принципова схема синтезатора частоти	1	
				1	
КПТР.022153.01.09 ВП					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	
Розроб.		Мамчур М.Ю.		1.06.20	
Перевір.		Мішан В.В.		2.05.20	
Н. контр.		Стещок В.І.		2.06.20	
Затв.		Підченко С.К.		7.06.20	
Формування сигналів у бездротових системах зв'язку					Лім.
Відомість проекту					Аркуш
					Аркушів
					1
					1
					ХНУ, гр. ТР2-22-1

ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1. АНАЛІЗ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ТА МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ.....	7
1.1 Класифікація бездротових систем.....	7
1.2 Основні види модуляції (FSK, PSK, QAM, ЛЧМ, OFDM)	11
1.3 Спектральні та енергетичні характеристики сигналів	18
1.4 Висновки до першого розділу.....	22
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ.....	23
2.1 Математична модель ЛЧМ.....	23
2.2 Розрахунок спектральної ширини	25
2.3 Розрахунок енергетичних параметрів сигналу	29
2.4 Аналіз співвідношення сигнал/шум	32
2.6 Висновки до другого розділу	35
3. ПРОЄКТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ	36
3.1 Розробка структурної схеми пристрою.....	36
3.2 Обґрунтування вибору архітектури формування сигналу	38
3.3 Вибір мікроконтролера.....	41
3.4 Принципова схема синтезатора частоти	43
3.5 Реалізація ЛЧМ сигналу	46
3.6 Схема живлення та розв'язка PLL.....	50

КІТР.022076.01.05 ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Формування сигналів у бездротових системах зв'язку Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акроніви	
Розроб.		Мамчур М.Ю.		1.06.20				2	67
Перевір.		Мішан В.В.		2.05.20					
Реценз.									
Н. Контр.		Стецюк В.		7.06.20					
Затверд.		Підченко С.К.		7.06.20				ХНУ, зр. ТР2-22-1	

3.7 Висновки до третього розділу.....	52
4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПРИБОРУ.....	54
4.1 Архітектура програмного забезпечення	54
4.2 Реалізація алгоритму формування ЛЧМ сигналу	56
4.3 Розрахунок та програмна реалізація кроку перебудови.....	61
4.4 Моделювання та аналіз спектральних характеристик	63
4.5 Висновки до четвертого розділу.....	65
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	68

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

PLL	–	Phase-Locked Loop (система фазового автопідстроювання частоти)
RF	–	Radio Frequency (радіочастота)
SNR	–	Signal-to-Noise Ratio (відношення сигнал/шум)
SPI	–	Serial Peripheral Interface (послідовний периферійний інтерфейс)
АЦП	–	Аналого-цифровий перетворювач
БПЛА	–	Безпілотний літальний апарат
ЛЧМ	–	Лінійно-частотна модуляція
МК	–	Мікроконтролер
ПЗ	–	Програмне забезпечення
РЛС	–	Радіолокаційна система
РЛС	–	Радіолокаційна система
РЧ	–	Радіочастота
ФАПЧ	–	Фазове автопідстроювання частоти
ЦОС	–	Цифрова обробка сигналів

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						4
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку бездротових технологій особливої актуальності набувають системи дистанційного керування та оповіщення, які забезпечують оперативну передачу сигналів тривоги та керуючих команд на відстані. Такі системи застосовуються у сфері охорони об'єктів, цивільної безпеки, автоматизованих технологічних процесах, а також у складі комплексів моніторингу інженерної інфраструктури. Використання радіоканалу дозволяє реалізувати мобільні, енергоефективні та масштабовані рішення без прокладання додаткових кабельних ліній зв'язку.

Сучасний розвиток телекомунікаційних технологій характеризується стрімким зростанням кількості бездротових систем зв'язку, які використовуються у різноманітних галузях – від цивільних телекомунікацій і систем Інтернету речей до спеціалізованих систем радіомоніторингу, навігації та радіолокації. Ефективність функціонування таких систем значною мірою визначається характеристиками сигналів, що використовуються для передавання інформації. Тому питання формування сигналів із заданими спектральними, енергетичними та часовими параметрами є одним із ключових у сучасній радіоелектроніці.

Особливе місце серед сигналів, що застосовуються у бездротових системах зв'язку, займають лінійно-частотно модульовані (ЛЧМ) сигнали. Вони широко використовуються у радіолокаційних системах, системах радіомоніторингу, широкосмугових системах зв'язку та вимірювальних комплексах. Основною перевагою таких сигналів є значний часо-частотний добуток, що забезпечує високу роздільну здатність, підвищену завадостійкість та можливість ефективної кореляційної обробки сигналів.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З розвитком цифрових технологій з'явилася можливість реалізації генераторів складних сигналів із використанням програмно-керованих синтезаторів частоти та мікроконтролерів. Використання сучасних інтегральних мікросхем, зокрема синтезаторів частоти з фазовою автопідстройкою частоти (PLL), дозволяє формувати сигнали з високою точністю, стабільністю частоти та широкими можливостями програмного налаштування параметрів. Такий підхід дає змогу створювати компактні та енергоефективні пристрої формування сигналів, що відповідають вимогам сучасних радіотехнічних систем.

Актуальність теми кваліфікаційного проекту зумовлена необхідністю розробки ефективних методів формування широкосмугових сигналів у бездротових системах зв'язку, що забезпечують високі спектральні та енергетичні характеристики, а також можливість програмного керування параметрами сигналу.

Метою кваліфікаційного проекту є дослідження методів формування сигналів у бездротових системах зв'язку та розробка пристрою формування лінійно-частотно модульованого сигналу на основі програмно керованого синтезатора частоти.

Об'єктом дослідження є процес формування сигналів у бездротових системах зв'язку.

Практична цінність роботи полягає у розробці програмно-керованого генератора ЛЧМ сигналів на основі сучасних мікроелектронних компонентів, який може бути використаний у бездротових системах зв'язку, радіомоніторингу, радіолокації та вимірювальних системах.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ БЕЗДРОВОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ТА МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ

1.1 Класифікація бездротових систем

Бездротові системи зв'язку є невід'ємною складовою сучасної телекомунікаційної інфраструктури та забезпечують передачу інформації без використання фізичних провідників. Передача сигналів здійснюється за допомогою електромагнітних хвиль у визначених частотних діапазонах, що регламентуються міжнародними та національними стандартами. Розвиток бездротових технологій обумовлений потребою у мобільності, гнучкості розгортання мереж та можливості швидкої організації зв'язку в різних умовах експлуатації.

Сучасні бездротові системи характеризуються великою різноманітністю архітектурних рішень, принципів доступу до каналу, методів модуляції та сфер застосування. Їх класифікація може здійснюватися за кількома основними ознаками, що дозволяє систематизувати існуючі технології та визначити їх особливості.

Однією з ключових ознак є радіус дії мережі. Залежно від зони покриття бездротові системи поділяються на персональні, локальні, міські та глобальні. Персональні мережі орієнтовані на з'єднання пристроїв у межах декількох метрів і використовуються переважно для передачі даних між мобільними пристроями, сенсорами та побутовою електронікою. Локальні мережі забезпечують покриття в межах будівель або окремих об'єктів інфраструктури. Міські системи зв'язку призначені для роботи в масштабах населеного пункту, тоді як глобальні мережі забезпечують широке покриття з використанням розгалуженої базової інфраструктури та супутникових технологій. Такий поділ

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

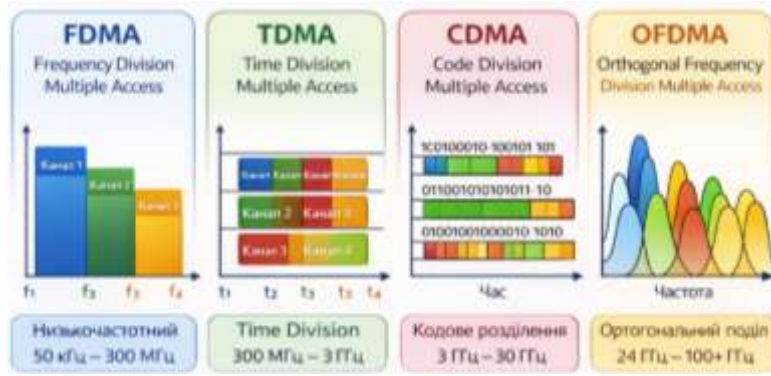


Рисунок 1.3 – Основні методи множинного доступу до каналу зв’язку

На рисунку 1.3 наведено принципові відмінності між методами множинного доступу. Частотний поділ передбачає виділення окремих смуг частот, часовий – розподіл у часовій області, кодовий – використання ортогональних кодів, а OFDMA реалізує поділ за допомогою ортогональних піднесучих.

Окремо бездротові системи класифікуються за типом застосованої модуляції. Історично перші системи використовували аналогові методи модуляції, однак сучасні мережі майже повністю перейшли до цифрових методів, які забезпечують вищу спектральну ефективність, кращу завадостійкість та можливість використання алгоритмів корекції помилок. Вибір методу модуляції визначає структуру передавача та приймача, вимоги до синтезу частоти, ширину спектра сигналу та енергетичні характеристики системи.

Таким чином, бездротові системи зв’язку являють собою складні технічні комплекси, що поєднують радіочастотні, цифрові та програмні рішення. Їх різноманітність зумовлена широким спектром застосувань – від персональних мереж та сенсорних систем до високошвидкісних глобальних телекомунікацій. Постійне зростання вимог до швидкості передачі даних, енергоефективності та спектральної ефективності стимулює розвиток нових методів формування та обробки сигналів, що розглядаються у наступних підрозділах.

1.2 Основні види модуляції (FSK, PSK, QAM, ЛЧМ, OFDM)

Процес модуляції є фундаментальним елементом функціонування будь-якої бездротової системи зв'язку. Передача інформації у радіоканалі неможлива без перенесення низькочастотного інформаційного сигналу на високочастотну несучу, що забезпечує ефективне випромінювання та поширення електромагнітної хвилі у просторі. Вибір типу модуляції визначає спектральні характеристики сигналу, енергетичну ефективність системи, завадостійкість та складність апаратної реалізації.

У сучасних телекомунікаційних системах переважають цифрові методи модуляції, які дозволяють значно підвищити спектральну ефективність та інтегрувати алгоритми корекції помилок, адаптивного кодування і цифрової обробки сигналів.

Частотна маніпуляція (FSK) є одним із базових методів цифрової модуляції, при якому інформація передається шляхом дискретної зміни частоти несучого сигналу. Кожному логічному стану відповідає певне значення частоти. Такий принцип формування сигналу є відносно простим з точки зору схемотехнічної реалізації.

FSK характеризується високою стійкістю до амплітудних перешкод, оскільки інформація закодована саме у зміні частоти. Це робить метод доцільним для використання у системах з низькою швидкістю передачі даних, зокрема в телеметрії, бездротових датчиках, IoT-пристроях.

Проте через використання декількох частот сигнал займає більшу смугу спектра, що знижує спектральну ефективність.

На рисунку 1.4 представлено часову реалізацію сигналу з частотною маніпуляцією (FSK). У верхній частині зображено бінарну інформаційну послідовність, яка є вхідним сигналом модулятора. Кожному логічному стану

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

відповідає певне значення частоти несучого коливання: для передачі логічної «1» використовується частота f_1 , а для логічного «0» – частота f_2 .

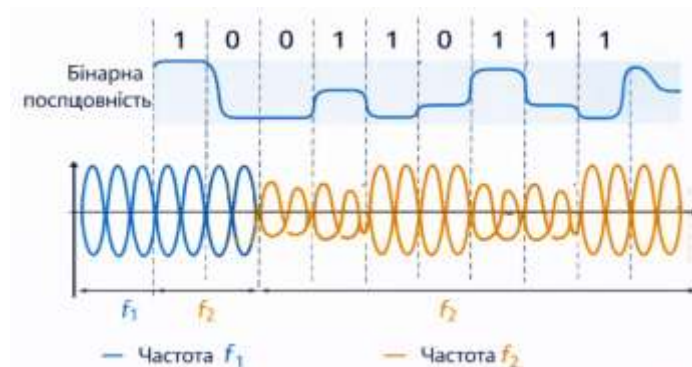


Рисунок 1.4 – Часове представлення сигналу FSK

У нижній частині рисунка 1.4 показано сформований радіосигнал, частота якого змінюється дискретно в моменти зміни біта. Вертикальні штрихові лінії відображають інтервали символів, протягом яких частота сигналу залишається сталою. Таким чином, інформація передається не зміною амплітуди чи фази, а зміною частоти несучої хвилі.

З рисунка 1.4 видно, що при переході між логічними станами відбувається стрибкоподібна зміна частоти, що є характерною ознакою двійкової FSK. Такий принцип формування забезпечує відносно високу завадостійкість сигналу до амплітудних спотворень, однак призводить до збільшення займаної смуги частот у порівнянні з фазовими методами модуляції.

Фазова маніпуляція (PSK) базується на зміні фази несучої хвилі відповідно до переданої інформації. У найпростішому випадку (BPSK) використовуються два значення фази, що відповідають двом логічним станам. У більш складних варіантах (QPSK, 8PSK) кількість фазових станів збільшується, що дозволяє передавати більше інформації за один символ.

Фазові методи забезпечують кращу спектральну ефективність у порівнянні з FSK, оскільки зміна фази не потребує значного розширення смуги частот.

Разом із тим, PSK є більш чутливим до фазових спотворень та нестабільності генератора.

Принцип фазової маніпуляції та відповідне сигнальне сузір'я для BPSK наведено на рисунку 1.5.

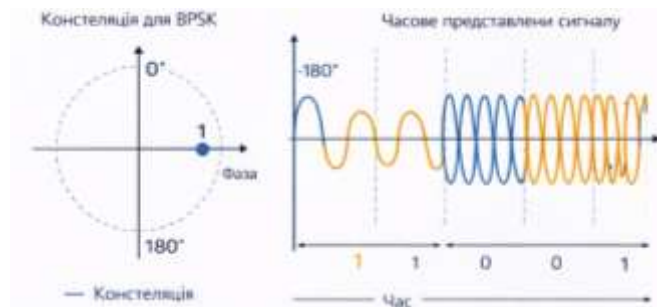


Рисунок 1.5 – Сузір'я та часовий вигляд сигналу PSK

На рисунку 1.5 зліва зображено сигнальне сузір'я для двійкової фазової маніпуляції (BPSK). Кожному логічному значенню відповідає певний фазовий стан несучого колювання: логічній «1» відповідає фаза 0° , а логічному «0» – фаза 180° . Точки сузір'я розташовані на комплексній площині та мають однакову амплітуду, відрізняючись лише фазою сигналу.

У правій частині рисунка 1.5 представлено часову реалізацію сигналу PSK. Видно, що при зміні логічного стану відбувається зміна фази несучого сигналу без зміни його амплітуди та частоти. Вертикальні штрихові лінії позначають межі символів, у межах яких фаза залишається сталою.

Таким чином, інформація передається виключно за рахунок фазових зсувів, що забезпечує більш вузьку смугу спектра у порівнянні з частотною маніпуляцією, але потребує стабільного генератора та точного фазового синхронізування на приймальній стороні.

Квадратурна амплітудна модуляція (QAM) поєднує зміну амплітуди та фази сигналу. Інформація передається шляхом формування точок у сигнальному

просторі (сузір'ї). Кількість точок визначає порядок модуляції: 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM тощо.

Зі збільшенням кількості рівнів підвищується пропускна здатність каналу, однак зростають вимоги до співвідношення сигнал/шум. QAM широко використовується у високошвидкісних системах – Wi-Fi, LTE, 5G.

Приклад сигнального сузір'я квадратурної амплітудної модуляції наведено на рисунку 1.6.

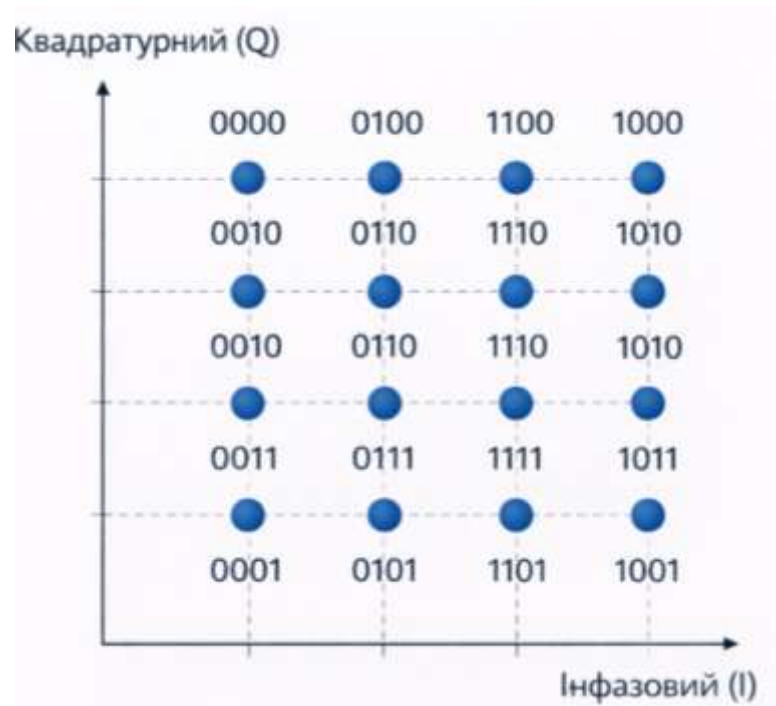


Рисунок 1.6 – Приклад сигнального сузір'я QAM

На рисунку 1.6 зображено сигнальне сузір'я квадратурної амплітудної модуляції (QAM). Точки сузір'я розташовані на комплексній площині з координатами I (інфазна складова) та Q (квадратурна складова). Кожна точка відповідає певній комбінації бітів і визначається конкретними значеннями амплітуди та фази сигналу.

На відміну від фазової маніпуляції, де змінюється лише фаза, у QAM змінюються одночасно дві складові сигналу, що дозволяє збільшити кількість можливих станів. Наприклад, у 16-QAM використовується 16 точок сузір'я, що

дає можливість передавати 4 біти на один символ, а у 64-QAM — вже 6 бітів на символ.

Зі збільшенням кількості точок сузір'я зростає пропускна здатність каналу, однак зменшується відстань між точками, що підвищує чутливість до шумів та перешкод. Таким чином, для реалізації високорівневих QAM необхідне високе співвідношення сигнал/шум та точна синхронізація приймача.

Сигнальне сузір'я є зручним графічним інструментом для аналізу завадостійкості, спектральної ефективності та ймовірності помилки в цифрових системах зв'язку.

Лінійно-частотна модуляція (ЛЧМ) характеризується безпервною лінійною зміною частоти сигналу протягом визначеного інтервалу часу. Такий сигнал займає широку смугу частот, що підвищує його стійкість до завад та дозволяє застосовувати методи кореляційної обробки.

Перевагою ЛЧМ є можливість отримання високої роздільної здатності у радіолокаційних та вимірювальних системах. Крім того, принцип розширення спектра забезпечує кращу завадостійкість у порівнянні з вузькосмуговими сигналами.

На рисунку 1.7 представлено зміну миттєвої частоти ЛЧМ сигналу в часі, що ілюструє принцип формування сигналу з лінійним законом зміни частоти.

На рисунку 1.7 зображено залежність миттєвої частоти лінійно-частотно модульованого (ЛЧМ) сигналу від часу. По горизонтальній осі відкладено час, а по вертикальній – частоту сигналу. Частота змінюється лінійно від мінімального значення f_{min} до максимального f_{max} протягом інтервалу часу від t_1 до t_2 .

Такий характер зміни частоти відповідає так званому «chirp»-сигналу, в якому миттєва частота зростає (або зменшується) за лінійним законом. Ширина займаної смуги визначається різницею між f_{max} та f_{min} , а тривалість імпульсу визначає швидкість зміни частоти.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

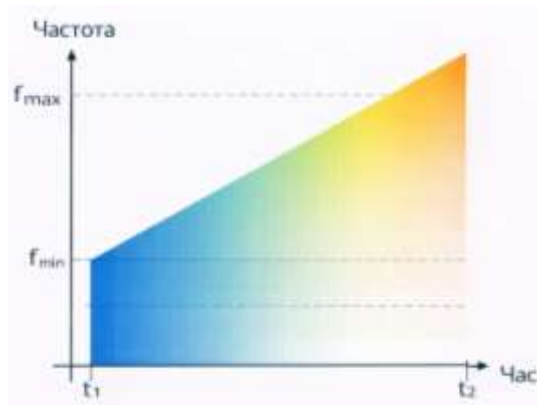


Рисунок 1.7 – Часово-частотна характеристика ЛЧМ сигналу

Лінійна зміна частоти забезпечує розширення спектра сигналу, що підвищує його завадостійкість та дозволяє використовувати ефективні методи кореляційної обробки на приймальній стороні. Завдяки цим властивостям ЛЧМ сигнали широко застосовуються в радіолокаційних системах, вимірювальних комплексах та широкосмугових бездротових технологіях.

Математично ЛЧМ сигнал може бути описаний як гармонічне коливання з лінійно змінною миттєвою частотою:

$$s(t) = A \cos \left(2\pi \left(f_0 t + \frac{kt^2}{2} \right) \right),$$

де A – амплітуда сигналу; f_0 – початкова частота; k – швидкість зміни частоти (коефіцієнт девіації); t – час.

Миттєва частота такого сигналу визначається як похідна фази за часом:

$$f(t) = f_0 + kt.$$

Коефіцієнт k пов'язаний із шириною спектра сигналу:

$$k = \frac{\Delta f}{T},$$

де $\Delta f = f_{max} - f_{min}$ – девіація частоти; T – тривалість сигналу.

Таким чином, ширина займаної смуги безпосередньо визначається параметрами девіації частоти та тривалості імпульсу.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) є багатонесучим методом модуляції, що передбачає передачу даних одночасно на великій кількості ортогональних піднесучих. Кожна піднесуча може модулюватися незалежно (QAM або PSK). Завдяки ортогональності спектри піднесучих перекриваються без взаємних перешкод, що забезпечує високу спектральну ефективність.

OFDM є стійким до багатопроменевого поширення сигналу, що особливо важливо у міських умовах. Саме тому цей метод став основою сучасних стандартів бездротового зв'язку.



Рисунок 1.8 – Спектральна структура сигналу OFDM

На рисунку 1.8 зображено спектральну структуру сигналу з ортогональним частотним поділом (OFDM). По горизонтальній осі відкладено частоту, а по вертикальній – потужність спектральних складових. Кожна окрема крива відповідає одній піднесучій частоті, які разом формують загальний широкосмуговий сигнал.

Особливістю OFDM є те, що піднесучі розташовані таким чином, що їх спектри частково перекриваються, однак залишаються ортогональними. Це означає, що максимум спектра однієї піднесучої припадає на нульові значення сусідніх піднесучих, що забезпечує відсутність взаємних інтерференцій між каналами.

Загальна займана смуга частот визначається кількістю піднесучих та інтервалом між ними. Кожна піднесуча може незалежно модулюватися за допомогою QAM або PSK, що дозволяє гнучко адаптувати швидкість передачі даних відповідно до умов каналу зв'язку.

Завдяки багатонесучій структурі OFDM забезпечує високу спектральну ефективність та стійкість до багатопроменевого поширення сигналу. Саме тому цей метод широко використовується у сучасних системах бездротового зв'язку, таких як Wi-Fi, LTE та 5G.

Розглянуті методи модуляції демонструють різні підходи до формування сигналів у бездротових системах зв'язку. Вибір конкретного методу визначається компромісом між спектральною ефективністю, енергетичними витратами, складністю реалізації та вимогами до якості каналу зв'язку.

Прості методи, такі як FSK, доцільні для систем з невисокою швидкістю передачі та обмеженими апаратними ресурсами. Фазові та квадратурні методи забезпечують вищу пропускну здатність, тоді як OFDM є оптимальним для широкосмугових високошвидкісних мереж.

Таким чином, аналіз різних способів модуляції формує теоретичну основу для подальшого проектування пристрою формування сигналів у бездротових системах зв'язку.

1.3 Спектральні та енергетичні характеристики сигналів

Ефективність функціонування будь-якої бездротової системи зв'язку значною мірою визначається спектральними та енергетичними характеристиками сформованого сигналу. Саме ці параметри визначають ширину займаної смуги частот, рівень випромінюваної потужності, завадостійкість та пропускну здатність каналу.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спектральні характеристики сигналу описують його розподіл у частотній області. Будь-який часовий сигнал має відповідний спектр, який визначається його амплітудно-частотною структурою. Чим складніша форма сигналу у часовій області, тим ширшою є його спектральна складова.

Для ілюстрації взаємозв'язку між часовим та частотним представленням сигналу наведено рисунок 1.9.

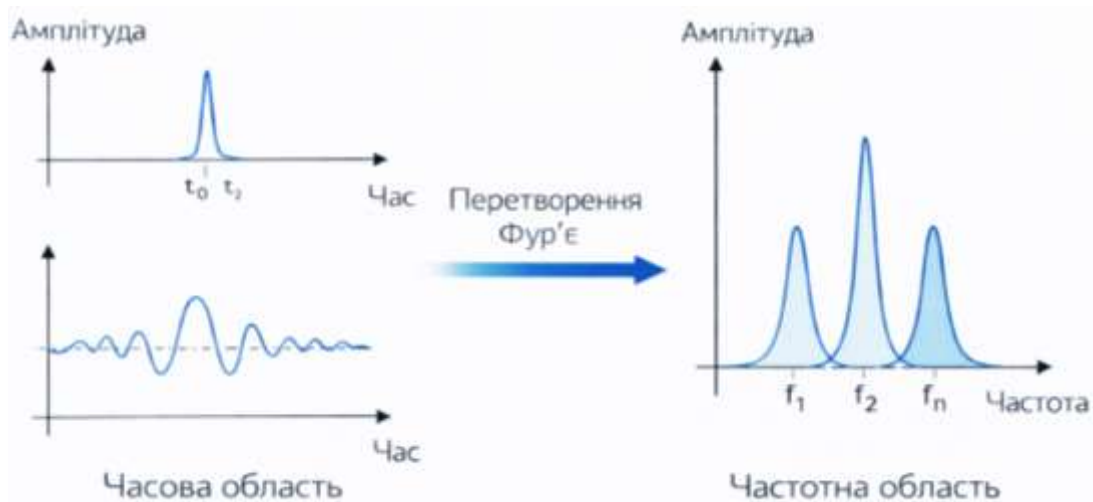


Рисунок 1.9 – Часове та частотне представлення сигналу

Як видно з рисунка 1.9, сигнал у часовій області може мати імпульсний або періодичний характер, тоді як у частотній області він представлений набором спектральних складових. Ширина спектра визначається швидкістю зміни сигналу: чим коротший імпульс або швидша зміна параметрів, тим ширший спектр.

Спектральна ширина сигналу. У цифрових системах зв'язку ширина спектра безпосередньо пов'язана зі швидкістю передачі символів. Зі збільшенням швидкості передачі зростає ширина займаної смуги частот. При цьому важливо мінімізувати позасмугові випромінювання, щоб уникнути взаємних завад між каналами.

На рисунку 1.10 показано приклад спектра цифрового сигналу.



Рисунок 1.10 – Спектральна густина потужності цифрового сигналу

Основна енергія сигналу зосереджена у головній пелюстці спектра, тоді як бічні пелюстки формують позасмугові випромінювання. Для зменшення впливу бічних пелюсток застосовуються фільтри та методи формування імпульсів.

Енергетичні характеристики сигналу. Енергетичні параметри визначають здатність сигналу протидіяти шумам та перешкодам у каналі зв'язку. Основними характеристиками є потужність сигналу, енергія біта та співвідношення сигнал/шум (SNR).

Середня потужність сигналу визначає рівень випромінюваної енергії та безпосередньо впливає на дальність зв'язку. Проте збільшення потужності обмежується нормативними вимогами та енергоспоживанням передавача.

Одним із ключових показників цифрових систем є відношення енергії біта до спектральної густини шуму. Саме цей параметр визначає ймовірність помилки прийому. Зі зростанням цього співвідношення покращується якість зв'язку.

На рисунку 1.11 показано вплив співвідношення сигнал/шум на якість прийому.

З рисунка 1.11 видно, що при низькому рівні SNR точки сигнального сузір'я розсіюються, що призводить до збільшення ймовірності помилки. При

1.4 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено огляд сучасних бездротових систем зв'язку та методів формування сигналів, що застосовуються в них. Проаналізовано класифікацію бездротових мереж за радіусом дії, частотним діапазоном функціонування, способом доступу до каналу та видом модуляції. Встановлено, що розвиток телекомунікаційних технологій спрямований на підвищення спектральної ефективності, пропускної здатності та енергоефективності систем зв'язку.

Розглянуто основні цифрові методи модуляції – FSK, PSK, QAM, ЛЧМ та OFDM. Показано, що прості методи модуляції характеризуються високою надійністю та відносною простотою реалізації, тоді як багаторівневі та багатонесучі методи забезпечують суттєве підвищення швидкості передачі даних і ефективніше використання частотного ресурсу. Водночас зростання спектральної ефективності супроводжується підвищенням вимог до стабільності генераторів, синхронізації та співвідношення сигнал/шум.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ

2.1 Математична модель ЛЧМ

Лінійно-частотна модуляція (ЛЧМ) є одним із найбільш поширених способів формування широкосмугових сигналів. Її особливістю є безперервна лінійна зміна миттєвої частоти в межах заданого інтервалу часу. Такий підхід дозволяє реалізувати принцип розширення спектра, підвищити завадостійкість та покращити кореляційні властивості сигналу.

Гармонічний сигнал із змінною частотою можна представити у вигляді:

$$s(t) = A \cos \varphi(t),$$

де A – амплітуда сигналу, $\varphi(t)$ – фаза сигналу.

Для ЛЧМ сигналу фаза змінюється за квадратичним законом:

$$\varphi(t) = 2\pi \left(f_0 t + \frac{kt^2}{2} \right),$$

де f_0 – початкова частота, k – швидкість зміни частоти (градієнт частоти).

Тоді математична модель ЛЧМ сигналу має вигляд:

$$s(t) = A \cos \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{kt^2}{2} \right) \right].$$

Миттєва частота визначається як похідна фази за часом:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}.$$

Після диференціювання отримуємо:

$$f(t) = f_0 + kt.$$

Отже, миттєва частота змінюється лінійно з часом, що і визначає назву сигналу – лінійно-частотно модульований.

Часово-частотна залежність ЛЧМ сигналу наведена на рисунку 2.1.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

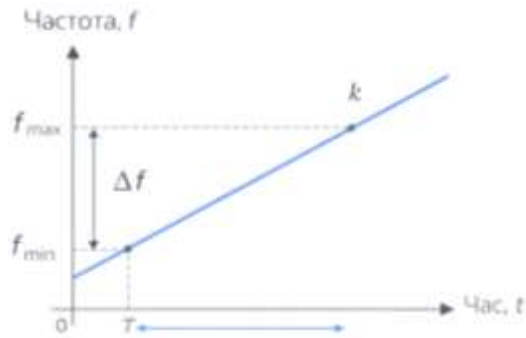


Рисунок 2.1 – Залежність миттєвої частоти ЛЧМ сигналу від часу

На рисунку 2.1 зображено зміну миттєвої частоти ЛЧМ сигналу протягом часу його існування. Частота змінюється від мінімального значення f_{min} до максимального f_{max} за лінійним законом. Кут нахилу прямої визначається коефіцієнтом k , який характеризує швидкість перебудови частоти.

Тривалість сигналу позначається T , а ширина спектра визначається як:

$$\Delta f = f_{max} - f_{min}.$$

Коефіцієнт зміни частоти пов'язаний із цими параметрами співвідношенням:

$$k = \frac{\Delta f}{T}.$$

Таким чином, при фіксованій тривалості сигналу збільшення девіації частоти призводить до розширення спектра.

Енергія сигналу визначається як:

$$E = \int_0^T s^2(t) dt.$$

Для гармонічного сигналу зі сталою амплітудою середня потужність дорівнює:

$$P = \frac{A^2}{2}.$$

Тоді енергія ЛЧМ сигналу за час T :

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

$$E = \frac{A^2}{2} T.$$

Збільшення тривалості сигналу при незмінній амплітуді призводить до зростання енергії, що позитивно впливає на завадостійкість.

Спектр ЛЧМ сигналу має наближено рівномірний розподіл у межах смуги Δf . На рисунку 2.2 наведено приклад спектральної структури ЛЧМ сигналу.

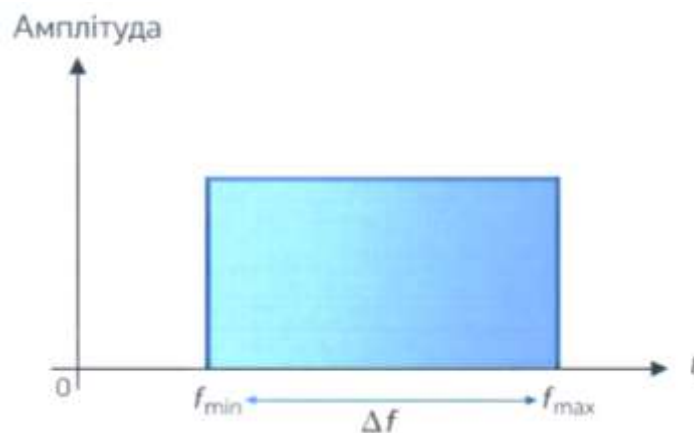


Рисунок 2.2 – Спектральна характеристика ЛЧМ сигналу

На рисунку 2.2 показано, що енергія ЛЧМ сигналу розподілена в межах заданої смуги частот. На відміну від вузькосмугових гармонічних сигналів, спектр ЛЧМ є розширеним і близьким до прямокутної форми. Така особливість забезпечує високу завадостійкість та ефективність кореляційної обробки.

2.2 Розрахунок спектральної ширини

Після отримання математичної моделі ЛЧМ сигналу (підрозділ 2.1) необхідно визначити його практичні параметри для реалізації у пристрої формування сигналів бездротової системи зв'язку.

Основними параметрами, що визначають спектральну ширину сигналу, є:

- початкова частота f_0 ;
- тривалість сигналу T ;
- девіація частоти Δf ;

- швидкість зміни частоти k .

Вибір робочих параметрів сигналу

Для прикладу проектування приймемо такі вихідні дані:

Робоча частота системи:

$$f_0 = 900 \text{ МГц}$$

Тривалість сигналу:

$$T = 1 \text{ мс}$$

Запланована девіація частоти:

$$\Delta f = 200 \text{ кГц}$$

Обрана девіація забезпечує формування широкосмугового сигналу при збереженні допустимої займаної смуги частот.

Розрахунок швидкості зміни частоти

Згідно з отриманим у підрозділі 2.1 співвідношенням:

$$\Delta f = kT,$$

звідки

$$k = \frac{\Delta f}{T}.$$

Підставляючи числові значення, отримаємо:

$$k = \frac{200 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^8 \text{ Гц/с.}$$

Отримане значення визначає швидкість перебудови частоти генератора.

Важливою характеристикою сигналу є добуток тривалості сигналу на ширину спектра:

$$BT = \Delta f \cdot T.$$

де $B = \Delta f$ – ширина спектра сигналу (Гц); T – тривалість сигналу (с)

Підставимо значення:

$$BT = 200 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 200.$$

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки $BT \gg 1$, сформований сигнал є широкопуговим та має добрі кореляційні властивості.

На рисунку 2.3 показано формування спектральної ширини при заданих параметрах.

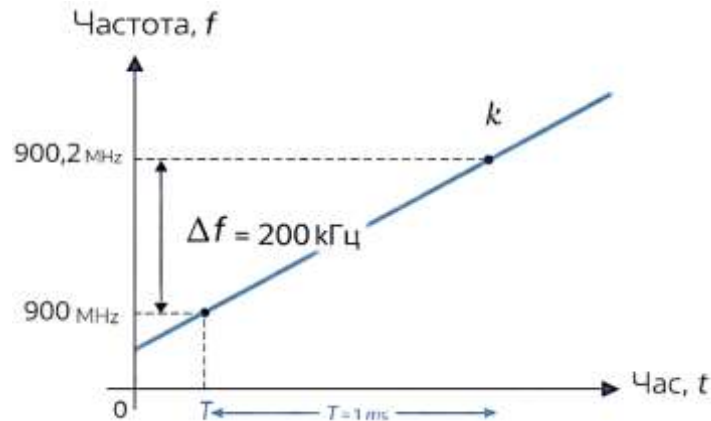


Рисунок 2.3 – Формування спектральної ширини ЛЧМ сигналу

Отримані параметри підтверджують, що сигнал має розширений спектр та може бути використаний у бездротових системах зв'язку з підвищеними вимогами до завадостійкості.

Визначення займаної смуги частот

Повна займана смуга сигналу визначається як:

$$B = \Delta f.$$

У нашому випадку:

$$B = 200 \text{ кГц.}$$

Таким чином, сформований сигнал займає смугу 200 кГц навколо робочої частоти 900 МГц.

Параметри лінійно-частотно модульованого сигналу істотно впливають на його спектральні, енергетичні та кореляційні характеристики, а також на ефективність використання радіочастотного ресурсу. Основними параметрами, що визначають властивості ЛЧМ сигналу, є тривалість сигналу T та девіація

частоти Δf . Саме ці величини визначають спектральну ширину сигналу, його енергетичний потенціал та можливості подальшої кореляційної обробки.

Збільшення тривалості сигналу при фіксованій девіації частоти призводить до зростання енергії сигналу, оскільки енергія пропорційна тривалості випромінювання. При цьому ширина спектра сигналу залишається практично незмінною, оскільки вона визначається переважно величиною девіації частоти. Таким чином, збільшення тривалості сигналу дозволяє підвищити енергетичний потенціал передавання без розширення займаної смуги частот. Це позитивно впливає на дальність та надійність приймання сигналу, а також сприяє покращенню співвідношення сигнал/шум.

У свою чергу, збільшення девіації частоти при фіксованій тривалості сигналу призводить до розширення спектра сигналу. Чим більшою є девіація частоти, тим ширшою стає спектральна смуга сигналу. Це забезпечує покращення кореляційних властивостей сигналу та підвищення його завадостійкості, оскільки широкосмугові сигнали менш чутливі до вузькосмугових завад та шумів. Крім того, збільшення девіації частоти сприяє підвищенню роздільної здатності системи при обробці сигналів.

Разом з тим, розширення спектральної смуги сигналу потребує використання більшої частини радіочастотного ресурсу, що може бути обмежувальним фактором у практичних системах зв'язку. У сучасних бездротових системах ефективного використання частотного спектра є важливим завданням, тому збільшення девіації частоти повинно здійснюватися з урахуванням допустимої смуги пропускання каналу зв'язку та вимог електромагнітної сумісності.

Таким чином, вибір параметрів тривалості сигналу T та девіації частоти Δf є компромісом між спектральною ефективністю, енергетичним потенціалом сигналу та його завадостійкістю. Оптимальне поєднання цих параметрів дозволяє забезпечити необхідні характеристики сигналу при мінімальному використанні радіочастотного ресурсу.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У результаті виконаних розрахунків було визначено спектральну ширину ЛЧМ сигналу, а також швидкість зміни частоти (швидкість чірпу), необхідну для його формування. Отримані значення параметрів визначають режим роботи генератора сигналу та використовуються як вихідні дані для подальших розрахунків. Зокрема, визначені параметри будуть застосовані під час аналізу енергетичних характеристик сигналу та оцінювання його ефективності у наступному підрозділі.

2.3 Розрахунок енергетичних параметрів сигналу

Після вибору параметрів ЛЧМ сигналу необхідно оцінити енергетичні характеристики радіолінії, тобто визначити, який рівень потужності повинен забезпечувати передавач пристрою формування сигналів, щоб на вході приймача був отриманий сигнал достатнього рівня для надійної демодуляції.

Енергетичні параметри сигналу в бездротових системах зв'язку зазвичай оцінюють через енергетичний баланс (link budget), який враховує потужність передавача, підсилення антен та втрати на поширення.

Модель радіолінії та рівняння Фріса. Для попередньої оцінки приймемо модель поширення у вільному просторі. У цьому випадку потужність на вході приймача визначається рівнянням Фріса у логарифмічній формі:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{FS},$$

де P_{Tx} – потужність передавача (дБм);

P_{Rx} – потужність на вході приймача (дБм);

G_{Tx} , G_{Rx} – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен (дБі);

L_{FS} – втрати у вільному просторі (дБ).

Втрати у вільному просторі:

$$L_{FS} = 32,44 + 20\log_{10}(f_{MHz}) + 20\log_{10}(R_{km}),$$

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де f_{MHz} – частота (МГц); R_{km} – відстань (км).

Структура енергетичного балансу (передавач–канал–приймач) показана на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Енергетичний баланс радіолінії

На рисунку 2.5 наведено загальну схему енергетичного балансу: сигнал формується передавачем з потужністю P_{Tx} , далі враховується підсилення передавальної антени G_{Tx} , втрати поширення в каналі L_{FS} , а також підсилення приймальної антени G_{Rx} . Результатом є рівень потужності P_{Rx} на вході приймача, який визначає можливість надійного прийому та подальшої обробки сигналу.

Вихідні дані для розрахунку

Для прикладного розрахунку приймаємо:

Робоча частота:

$$f = 900 \text{ МГц}$$

- Відстань:

$$R = 10 \text{ км}$$

- Підсилення антен (типові невеликі антени):

$$G_{Tx} = 2 \text{ дБі}, G_{Rx} = 2 \text{ дБі}$$

- Потужність передавача (для оцінки):

$$P_{Tx} = 30 \text{ дБм (1 Вт)}$$

Розрахунок втрат у вільному просторі

Обчислимо L_{FS} :

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. $20\log_{10}(900)$:

$$\log_{10}(900) = \log_{10}(9 \cdot 10^2) = \log_{10}(9) + 2 \approx 0,9542 + 2 = 2,9542$$

$$20 \cdot 2,9542 = 59,084 \text{ дБ}$$

2. $20\log_{10}(10) = 20 \cdot 1 = 20 \text{ дБ}$

Тоді:

$$L_{FS} = 32,44 + 59,084 + 20 = 111,524 \text{ дБ.}$$

Розрахунок потужності на вході приймача

Підставимо у рівняння Фріса:

$$P_{Rx} = 30 + 2 + 2 - 111,524 = -77,524 \text{ дБм.}$$

Отже, при потужності передавача 1 Вт і заданих параметрах каналу очікуваний рівень сигналу на вході приймача становить приблизно:

$$P_{Rx} \approx -77,5 \text{ дБм.}$$

Вплив смуги приймача на шумову потужність показано на рисунку 2.6.

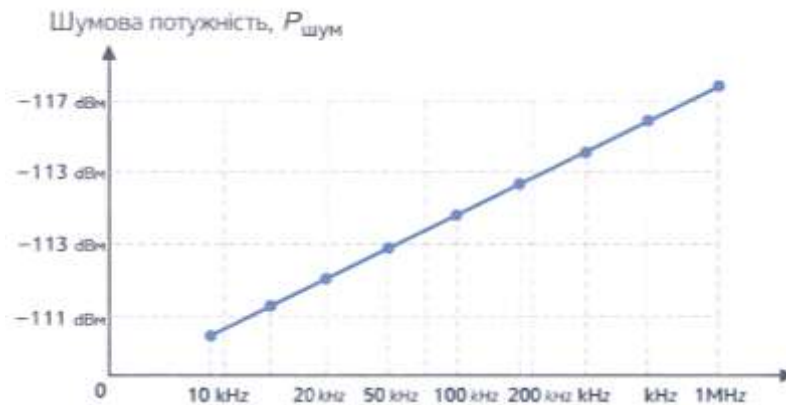


Рисунок 2.6 – Залежність шумової потужності від ширини смуги приймача

На рисунку 2.6 показано, що зі збільшенням ширини смуги приймача зростає і шумова потужність, оскільки приймач «збирає» шум із ширшого частотного інтервалу. Це означає, що при широкосмугових сигналах (зокрема

ЛЧМ) необхідно або підвищувати енергетику сигналу, або застосовувати кореляційні методи обробки для покращення завадостійкості.

Отже, виконано розрахунок енергетичних параметрів радіолінії для пристрою формування ЛЧМ сигналу. Для частоти 900 МГц та відстані 10 км при потужності передавача 1 Вт і підсиленні антен по 2 дБі отримано рівень сигналу на вході приймача приблизно $-77,5$ дБм. Подальша оцінка можливості надійного прийому потребує аналізу співвідношення сигнал/шум, що розглядається у наступному підрозділі.

2.4 Аналіз співвідношення сигнал/шум

Одним із ключових параметрів, що визначає якість функціонування бездротової системи зв'язку, є співвідношення сигнал/шум (SNR, Signal-to-Noise Ratio). Навіть за умови достатнього рівня потужності передавача корисний сигнал може бути спотворений або втрачений, якщо рівень шуму в приймальному тракті є порівняним із рівнем сигналу. Саме тому оцінка співвідношення сигнал/шум є завершальним етапом енергетичного розрахунку радіолінії.

Співвідношення сигнал/шум визначається як відношення потужності корисного сигналу до потужності шуму в смузі приймача:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

У логарифмічній формі, що традиційно використовується в радіотехніці, це співвідношення записується як різниця рівнів у децибелах:

$$SNR_{dB} = P_{Rx} - P_{noise}$$

Таким чином, для визначення SNR необхідно знати два параметри: рівень прийнятого сигналу та шумову потужність у смузі пропускання приймача.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Розрахунок шумової потужності

Шум у приймальному тракті має переважно теплову природу та зумовлений хаотичним рухом носіїв заряду в електронних компонентах. Його спектральна густина при стандартній температурі 290 К становить приблизно – 174 дБм/Гц. Повна шумова потужність залежить від ширини смуги пропускання приймача і визначається співвідношенням:

$$P_{noise(dBm)} = -174 + 10\log_{10}(B) + NF,$$

де B – ширина смуги приймача (Гц), а NF – коефіцієнт шуму приймального тракту.

У нашому випадку ширина спектра сформованого ЛЧМ сигналу становить:

$$B = 200 \text{ кГц} = 2 \cdot 10^5 \text{ Гц.}$$

Обчислимо логарифмічну складову:

$$10\log_{10}(2 \cdot 10^5).$$

Оскільки

$$\log_{10}(2 \cdot 10^5) = \log_{10}(2) + 5 \approx 0,301 + 5 = 5,301,$$

отримуємо:

$$10 \cdot 5,301 = 53,01 \text{ дБ.}$$

Приймаючи типовий коефіцієнт шуму приймача $NF = 5\text{дБ}$, знаходимо шумову потужність:

$$P_{шум} = -174 + 53,01 + 5 \approx -116 \text{ дБм.}$$

Визначення співвідношення сигнал/шум

Згідно з попереднім підрозділом, рівень прийнятого сигналу становить приблизно:

$$P_{Rx} \approx -77,5 \text{ дБм.}$$

Тоді співвідношення сигнал/шум дорівнює:

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$SNR = -77,5 - (-116) = 38,5 \text{ дБ.}$$

Отримане значення є достатньо високим для більшості сучасних цифрових методів модуляції. Наприклад, для бінарної фазової маніпуляції (BPSK) достатнім є SNR близько 8–10 дБ, тоді як для більш складних методів, таких як QAM, вимоги можуть становити 15–20 дБ залежно від порядку модуляції. Таким чином, запас у понад 30 дБ свідчить про високий рівень енергетичної надійності радіолінії.

Вплив ширини смуги на SNR

Оскільки шумова потужність прямо пропорційна ширині смуги B , збільшення спектральної ширини сигналу призводить до зростання рівня шуму на вході приймача. Це означає, що при формуванні широкосмугових сигналів необхідно або забезпечувати достатній енергетичний запас, або застосовувати методи узгодженої (кореляційної) обробки, що дозволяють ефективно виділяти корисний сигнал на фоні шуму.

Зв'язок між співвідношенням сигнал/шум і ймовірністю бітової помилки показано на рисунку 2.7.

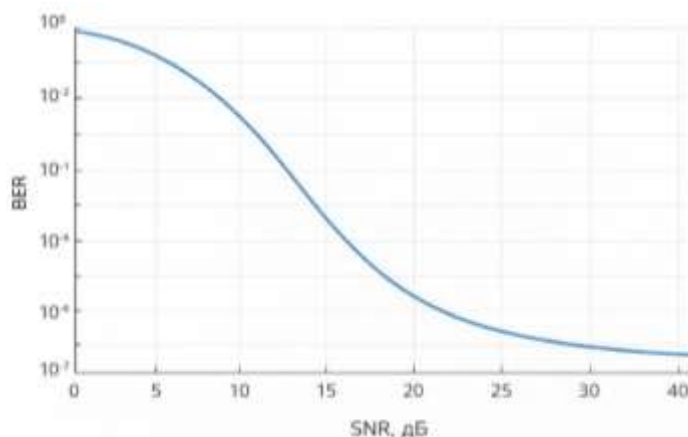


Рисунок 2.7 – Залежність ймовірності бітової помилки від співвідношення сигнал/шум

З рисунка 2.7 видно, що зі зростанням SNR імовірність помилки зменшується експоненційно. При значеннях SNR понад 20 дБ ймовірність помилки стає дуже малою, що забезпечує стабільну передачу інформації.

Проведений аналіз показав, що при обраних параметрах ЛЧМ сигналу та потужності передавача 1 Вт співвідношення сигнал/шум становить приблизно 38 дБ. Це значення значно перевищує мінімально необхідний рівень для коректної демодуляції, що свідчить про достатній енергетичний запас системи. Отримані результати підтверджують можливість стабільної роботи пристрою формування сигналів у заданих умовах.

2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі розглянуто математичну модель лінійно-частотно модульованого сигналу та виконано розрахунок його основних параметрів для застосування у бездротовій системі зв'язку. Визначено залежність миттєвої частоти від часу та встановлено взаємозв'язок між тривалістю сигналу, девіацією частоти та спектральною шириною.

У результаті розрахунків отримано спектральну ширину 200 кГц та часо-смуговий добуток $BT = 200$, що підтверджує широкосмуговий характер сигналу. Проведений енергетичний аналіз радіолінії показав достатній рівень прийнятої потужності та співвідношення сигнал/шум для надійного прийому.

Отримані результати обґрунтовують вибір параметрів формування ЛЧМ сигналу та створюють основу для подальшого проектування структурної схеми пристрою.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ПРОЄКТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ

3.1 Розробка структурної схеми пристрою

На основі теоретичних положень та розрахунків, виконаних у розділі 2, розроблено структурну схему пристрою формування лінійно-частотно модульованого сигналу для бездротової системи зв'язку. Структурна схема відображає функціональні блоки системи та їх взаємодію без деталізації елементної бази.

Формування ЛЧМ сигналу передбачає керовану перебудову частоти у заданому діапазоні з визначеною швидкістю, що описується законом:

$$f(t) = f_0 + kt,$$

де f_0 – початкова частота,

k – швидкість зміни частоти,

t – час.

Для реалізації цього процесу пристрій містить:

- цифровий блок керування,
- вузол синтезу частоти,
- підсилювальний тракт,
- систему живлення.

Такий закон зміни частоти забезпечує формування сигналу з рівномірним розподілом спектральної енергії в межах заданої смуги, що є характерною особливістю ЛЧМ сигналів та визначає їх ефективність у системах зв'язку та радіолокації.

Для реалізації зазначеного процесу у структурі пристрою передбачено кілька основних функціональних блоків. Центральним елементом є цифровий

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

блок керування, який формує керуючі сигнали та задає параметри ЛЧМ, зокрема початкову частоту, ширину смуги та тривалість імпульсу. На основі цих даних здійснюється керування вузлом синтезу частоти, який безпосередньо формує радіочастотний сигнал із заданим законом перебудови.

Далі сформований сигнал надходить до підсилювального тракту, де забезпечується необхідний рівень потужності для подальшої передачі в ефір або по каналу зв'язку. Також у складі пристрою передбачено систему живлення, яка забезпечує стабільну роботу всіх функціональних вузлів та підтримує задані електричні параметри.

Таким чином, запропонована структурна схема забезпечує повний цикл формування ЛЧМ сигналу – від цифрового керування параметрами до отримання підсиленого вихідного радіосигналу. Структурна схема пристрою наведена на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Структурна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу

Мікроконтролер формує алгоритм перебудови частоти та керує синтезатором через цифровий інтерфейс. Синтезатор генерує радіочастотний сигнал, який підсилюється до необхідного рівня та подається на антену. Така

архітектура забезпечує стабільність частоти, програмну гнучкість та можливість масштабування системи.

Для наочності принцип роботи пристрою представлено у вигляді функціональної схеми (рис. 3.2).

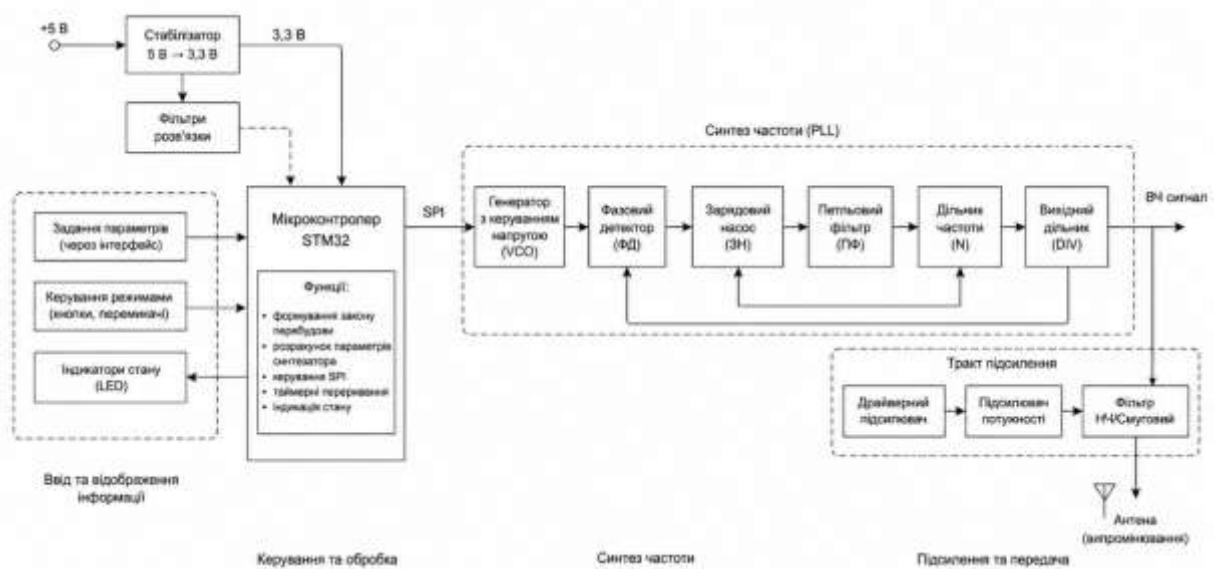


Рисунок 3.2 – Функціональна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу

Функціональна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу відображає основні вузли системи та їх взаємодію. Вона містить блок формування керуючого сигналу на основі мікроконтролера, вузол генерації частотно-модульованого сигналу, а також підсилювальний каскад для забезпечення необхідного рівня вихідної потужності. Схема дозволяє наочно простежити процес формування ЛЧМ сигналу від задаючого сигналу до вихідного радіочастотного сигналу.

3.2 Обґрунтування вибору архітектури формування сигналу

Реалізація закону зміни частоти $f(t)$, який визначає форму лінійно-частотно модульованого сигналу, може здійснюватися як аналоговим, так і

цифровим способом. Вибір методу реалізації безпосередньо впливає на точність формування сигналу, стабільність його параметрів та можливість гнучкого налаштування характеристик системи.

Аналоговий підхід передбачає безпосереднє керування частотою генератора шляхом зміни керуючої напруги на вході генератора, керованою напругою (VCO). У такому випадку закон зміни частоти формується за допомогою аналогових схем, наприклад генератора пилкоподібної або трикутної напруги. Незважаючи на відносну простоту реалізації, цей підхід має низку суттєвих недоліків. Зокрема, точність формування сигналу обмежується нестабільністю параметрів електронних компонентів, впливом температурних змін, дрейфом характеристик елементів та наявністю шумів. Крім того, аналоговий спосіб ускладнює точне відтворення складних законів перебудови частоти та не забезпечує достатньої повторюваності характеристик сигналу.

У даній роботі обрано цифровий метод формування сигналу на основі синтезатора частоти з фазовою автопідстройкою частоти (PLL). Такий підхід дозволяє формувати сигнал із високою точністю та стабільністю параметрів, а також забезпечує можливість програмного керування законом зміни частоти. Цифрове керування дозволяє реалізувати складні профілі перебудови частоти, змінювати параметри сигналу в реальному часі та забезпечувати високу повторюваність характеристик при багаторазовому відтворенні сигналу.

Використання PLL-синтезатора забезпечує низку важливих переваг, серед яких:

- висока частотна точність, що визначається стабільністю опорного генератора;
- стабільність параметрів сигналу при зміні температури та умов експлуатації;

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– можливість програмної зміни профілю перебудови частоти, що дозволяє формувати різні типи сигналів;

– повторюваність характеристик сигналу, що є важливим для систем вимірювання та радіомоніторингу.

Як основний елемент синтезу частоти використано інтегральну мікросхему ADF4350, яка поєднує у своєму складі фазову автопідстройку частоти (PLL) та інтегрований генератор, керований напругою (VCO). Мікросхема забезпечує формування сигналів у широкому діапазоні частот і дозволяє здійснювати точне програмне налаштування вихідної частоти шляхом конфігурації внутрішніх регістрів.

Керування синтезатором частоти здійснюється за допомогою мікроконтролера STM32, який передає дані до синтезатора через послідовний інтерфейс SPI. Мікроконтролер формує послідовність команд, що визначають параметри роботи синтезатора, зокрема значення коефіцієнтів дільників, режим роботи та частоту вихідного сигналу. Послідовна зміна цих параметрів у часі дозволяє реалізувати необхідний закон перебудови частоти $f(t)$ та сформувати ЛЧМ сигнал.

Для забезпечення високої частотної стабільності синтезатора використано термостабілізований кварцовий генератор (ТСХО) з опорною частотою 25 МГц. Використання ТСХО дозволяє значно зменшити вплив температурних змін на частоту опорного сигналу, що безпосередньо впливає на точність формування вихідної частоти синтезатора.

Таким чином, обрана архітектура на основі цифрового керування PLL-синтезатором частоти забезпечує високу точність формування сигналу, стабільність параметрів та можливість гнучкого програмного налаштування характеристик сигналу. Це робить її оптимальним рішенням для реалізації генераторів широкосмугових сигналів у сучасних бездротових системах зв'язку,

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де важливими є точність, надійність та можливість адаптації параметрів сигналу до умов роботи системи.

3.3 Вибір мікроконтролера

Мікроконтролер у розроблюваному пристрої виконує функцію цифрового керування синтезатором частоти, забезпечуючи формування необхідного закону зміни частоти $f(t)$ для реалізації лінійно-частотно модульованого сигналу. Основним завданням мікроконтролера є формування послідовності команд, що визначають параметри роботи синтезатора, а також забезпечення точної часової синхронізації перебудови частоти відповідно до заданого алгоритму.

Мікроконтролер генерує керуючі дані, які передаються до регістрів конфігурації PLL-синтезатора, що дозволяє змінювати значення коефіцієнтів дільників та, відповідно, вихідну частоту генератора. Завдяки цьому реалізується програмне формування профілю перебудови частоти, що є основою створення ЛЧМ сигналу.

Основними вимогами до мікроконтролера у даній системі є:

- наявність апаратного інтерфейсу SPI, необхідного для передачі конфігураційних даних до синтезатора частоти;
- достатня тактова частота, яка забезпечує можливість швидкої перебудови частоти та формування сигналу з необхідною швидкістю зміни параметрів;
- стабільна робота таймерів, що дозволяє реалізувати точне керування часовими інтервалами перебудови частоти;
- низьке енергоспоживання, що є важливим для портативних або автономних радіоелектронних пристроїв.

У роботі доцільно використано мікроконтролер сімейства STM32, який характеризується високою продуктивністю, наявністю розвиненої периферії та гнучкими можливостями налаштування. Мікроконтролери даного сімейства

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

мають апаратні модулі SPI, високоточні таймери, достатній обсяг пам'яті програм та даних, а також забезпечують стабільну роботу в широкому діапазоні умов експлуатації. Це дозволяє реалізувати алгоритми формування сигналів із високою точністю та мінімальними затримками.

Взаємодія мікроконтролера із синтезатором частоти наведена на рис.3.3. На даній схемі показано процес передавання конфігураційних даних від мікроконтролера до синтезатора через послідовний інтерфейс SPI. Передавання здійснюється шляхом послідовного запису даних до внутрішніх регістрів синтезатора, які визначають режим його роботи та параметри формування сигналу.

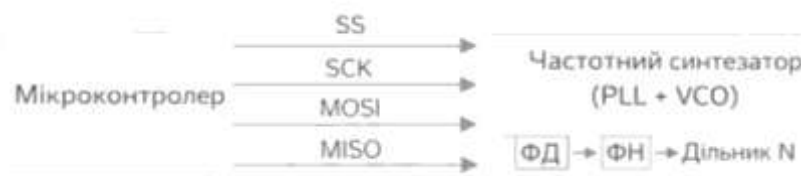


Рисунок 3.3 – Взаємодія мікроконтролера із синтезатором частоти

Через інтерфейс SPI передаються значення основних параметрів синтезатора, зокрема INT, FRAC та MOD, які визначають коефіцієнти ділення у петлі фазової автопідстройки частоти. Саме ці параметри задають значення вихідної частоти синтезатора відповідно до співвідношення між опорною частотою та коефіцієнтами ділення PLL. Послідовна зміна цих параметрів у часі дозволяє реалізувати необхідний закон перебудови частоти та сформувати лінійно-частотно модульований сигнал.

Таким чином, використання мікроконтролера STM32 у поєднанні із синтезатором частоти дозволяє реалізувати гнучку програмно-керовану систему формування сигналів, що забезпечує високу точність частоти, стабільність параметрів та можливість оперативної зміни характеристик сигналу відповідно до вимог бездротових систем зв'язку.

Синтезатор частоти на основі PLL. Ключовим вузлом пристрою є синтезатор частоти, побудований на основі фазової автопідстройки частоти. Його функціональна структура наведена на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 – Структурна схема синтезатора частоти на основі PLL

Синтезатор складається з опорного генератора, фазового детектора, петльового фільтра, VCO та програмованого дільника частоти.

У сталому режимі роботи виконується співвідношення:

$$f_{out} = N \cdot f_{ref},$$

де f_{ref} – опорна частота, N – коефіцієнт поділу.

Зміна коефіцієнта поділу дозволяє програмно перебудовувати частоту відповідно до закону формування ЛЧМ сигналу.

3.4 Принципова схема синтезатора частоти

Реалізація синтезатора частоти виконана на базі інтегральної мікросхеми ADF4350, яка є широкосмуговим дробовим синтезатором частоти з фазовою автопідстройкою частоти (ФАПЧ) та вбудованим генератором, керованим напругою (VCO). Дана мікросхема широко застосовується в сучасних радіоелектронних системах завдяки можливості формування стабільних високочастотних сигналів у широкому діапазоні частот.

Синтезатор ADF4350 дозволяє формувати сигнали у діапазоні приблизно від 35 МГц до 4,4 ГГц, що робить його придатним для використання у системах радіомоніторингу, радіолокації, телекомунікаційних пристроях та вимірювальній апаратурі. Основою роботи мікросхеми є принцип фазового автопідстроювання частоти, при якому вихідна частота формується шляхом порівняння фази сигналу опорного генератора з фазою сигналу, отриманого після ділення частоти генератора, керованого напругою. У разі виникнення розбіжності між фазами формується сигнал помилки, який через петлю зворотного зв'язку коригує частоту VCO до моменту досягнення фазового синхронізму.

До складу мікросхеми ADF4350 входять такі основні функціональні блоки:

- фазово-частотний детектор;
- зарядовий насос;
- програмований дільник частоти;
- вбудований генератор, керований напругою;
- вихідні буферні каскади;
- інтерфейс керування SPI для програмування параметрів синтезатора.

Керування роботою мікросхеми здійснюється за допомогою послідовного інтерфейсу SPI, через який передаються дані до внутрішніх регістрів конфігурації. Це дозволяє програмно задавати необхідну вихідну частоту, режим роботи дільників, параметри зарядового насоса та інші характеристики роботи синтезатора. Завдяки цьому забезпечується гнучкість налаштування та можливість швидкої перебудови частоти відповідно до вимог системи.

У розроблюваній системі радіотехнічного моніторингу синтезатор ADF4350 використовується для формування стабільного високочастотного сигналу, який може застосовуватися як локальний генератор у приймальному тракті або як джерело сигналу для тестування та калібрування окремих вузлів

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

системи. Висока стабільність частоти, малий рівень фазових шумів та можливість точного налаштування частоти роблять цю мікросхему ефективним рішенням для використання у радіотехнічних пристроях.

Принципова електрична схема реалізації синтезатора частоти на базі мікросхеми ADF4350 наведена на рисунку 3.5. На схемі представлено підключення опорного генератора, елементів фільтра петлі ФАПЧ, ліній керування інтерфейсу SPI, а також вихідних каскадів формування високочастотного сигналу. Така структура забезпечує стабільну роботу синтезатора та можливість його інтеграції до складу підсистеми радіотехнічного моніторингу.

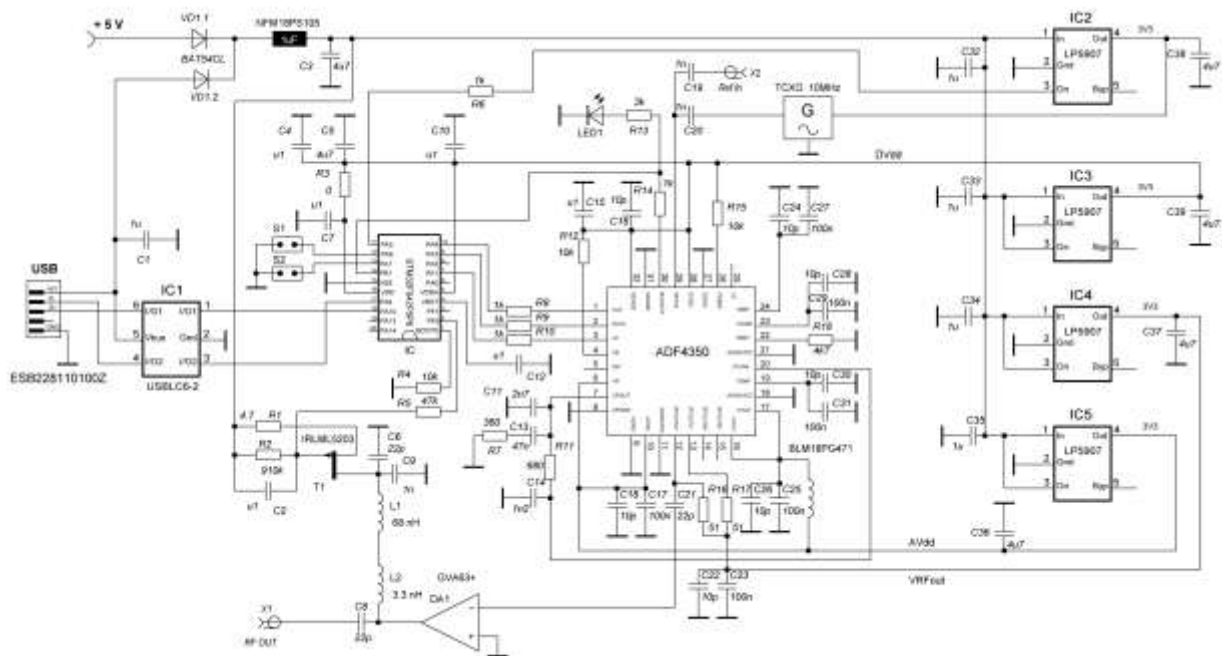


Рисунок 3.5 – Принципова схема синтезатора частоти

Вихідна частота визначається співвідношенням:

$$f_{out} = \frac{f_{PFD}}{DIV} \left(INT + \frac{FRAC}{MOD} \right).$$

Керування параметрами здійснюється мікроконтролером через SPI, що дозволяє реалізувати дискретну перебудову частоти.

3.5 Реалізація ЛЧМ сигналу

Формування лінійно-частотно модульованого сигналу у розроблюваній системі здійснюється шляхом програмної зміни коефіцієнта поділу PLL-синтезатора частоти з певним часовим кроком Δt . Такий підхід дозволяє реалізувати закон лінійної зміни частоти у часі, який є характерним для ЛЧМ сигналів. Керування параметрами синтезатора виконується мікроконтролером, що послідовно змінює значення регістрів PLL через інтерфейс SPI, забезпечуючи поступове збільшення або зменшення частоти вихідного сигналу.

У процесі роботи мікроконтролер формує послідовність значень частоти, які записуються у регістри синтезатора. Кожне нове значення частоти встановлюється через певний часовий інтервал Δt , у результаті чого формується ступінчаста апроксимація лінійної залежності частоти від часу. Якщо крок перебудови частоти є достатньо малим, така апроксимація практично не впливає на спектральні характеристики сигналу, і сформований сигнал наближається до ідеального ЛЧМ сигналу.

Для прикладу у даній роботі розглядається формування сигналу з такими параметрами:

$f_0 = 900$ МГц – початкова частота сигналу;

$\Delta f = 200$ кГц – девіація частоти;

$T = 1$ мс – тривалість сигналу.

Важливою характеристикою ЛЧМ сигналу є швидкість перебудови частоти, яка визначає швидкість зміни миттєвої частоти сигналу у часі. Вона визначається відношенням девіації частоти до тривалості сигналу:

$$k = \frac{\Delta f}{T}.$$

Для наведених параметрів швидкість перебудови частоти становить:

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

$$k = \frac{200 \text{ кГц}}{1 \text{ мс}} = 2 \times 10^8 \text{ Гц/с.}$$

Це означає, що миттєва частота сигналу змінюється лінійно у часі із заданою швидкістю, утворюючи характерну «частотну пилку», яка і формує ЛЧМ сигнал.

Практична реалізація такого сигналу здійснюється шляхом дискретної зміни частоти з невеликим кроком. Кожне нове значення частоти встановлюється через певний часовий інтервал Δt , що визначається можливостями мікроконтролера та швидкістю обміну даними через інтерфейс SPI. При достатньо малому значенні Δt ступінчаста зміна частоти наближається до безперервної лінійної залежності.

Таким чином, програмне керування синтезатором частоти дозволяє реалізувати гнучкий алгоритм формування ЛЧМ сигналу, змінювати його параметри (початкову частоту, девіацію, тривалість сигналу) та адаптувати характеристики сигналу відповідно до вимог бездротових систем зв'язку.

Процес реалізації формування ЛЧМ сигналу шляхом дискретної перебудови частоти синтезатора наведено на рисунку 3.6, де показано зміну частоти у часі та послідовність її крокової перебудови.

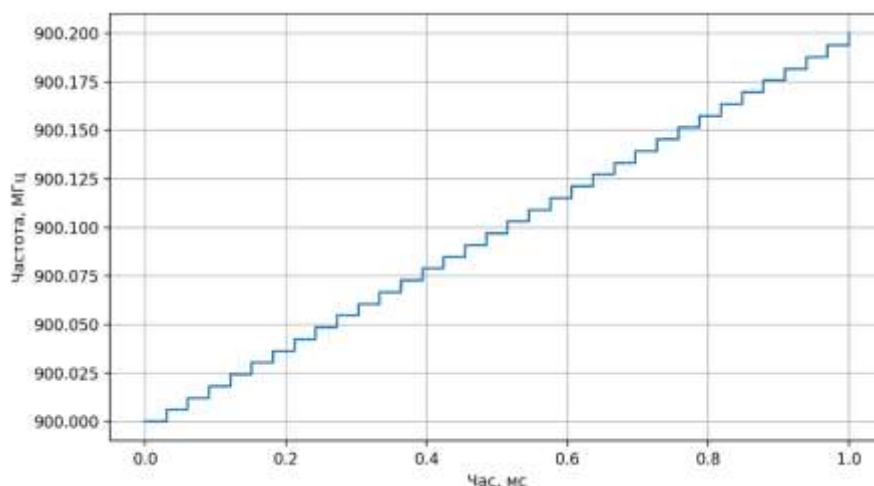


Рисунок 3.6 – Ступінчаста апроксимація ЛЧМ сигналу

Частота сформованого сигналу змінюється дискретними кроками приблизно 6,1 кГц з часовим інтервалом близько 30 мкс. Такий підхід реалізує ступінчасту апроксимацію лінійного закону зміни частоти, що дозволяє сформувати лінійно-частотно модульований сигнал із заданими параметрами. Послідовна зміна значень частоти здійснюється шляхом програмного оновлення регістрів синтезатора через інтерфейс SPI, що забезпечує реалізацію необхідного профілю перебудови частоти. Незважаючи на дискретний характер перебудови, при достатньо малому кроці зміни частоти така апроксимація практично не впливає на спектральні характеристики сигналу та дозволяє отримати сигнал, близький до ідеального ЛЧМ.

Сформований синтезатором сигнал має відносно невеликий рівень потужності, який є недостатнім для безпосереднього використання у передавальному тракті. Тому для забезпечення необхідного рівня випромінюваної потужності використовується тракт підсилення, що складається з декількох каскадів підсилення. Основною метою підсилювального тракту є підвищення рівня сигналу до значення, достатнього для подальшої передачі або випромінювання антеною.

Як правило, підсилювальний тракт містить попередній (драйверний) каскад та кінцевий підсилювальний каскад. Попередній каскад виконує функцію підсилення сигналу до рівня, необхідного для ефективного керування кінцевим підсилювачем потужності. Кінцевий каскад забезпечує формування необхідної вихідної потужності сигналу та передачу його до антенної системи або наступного функціонального вузла.

Основними вимогами до підсилювального тракту у даній системі є:

- вихідна потужність до 1 Вт, що забезпечує достатній рівень сигналу для передачі;

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- робота у діапазоні частот близько 900 МГц, який відповідає робочому діапазону системи;
- висока лінійність підсилення, що дозволяє мінімізувати спотворення сигналу та зберегти його спектральні характеристики;
- температурна стабільність, яка забезпечує сталість параметрів підсилювача при зміні температурних умов експлуатації.

Особлива увага при проектуванні підсилювального тракту приділяється збереженню форми сигналу та запобіганню виникненню нелінійних спотворень, які можуть призвести до розширення спектра сигналу та появи паразитних випромінювань. Для цього використовуються підсилювачі з достатнім запасом по лінійності, а також відповідні схеми узгодження та фільтрації.

Крім того, при розробці підсилювального тракту враховуються питання узгодження імпедансів між каскадами, що дозволяє забезпечити максимальну передачу потужності між елементами тракту та зменшити втрати сигналу. Також передбачаються елементи стабілізації режимів роботи активних компонентів та засоби тепловідведення для забезпечення надійної роботи підсилювача.

Структурна схема підсилювального тракту наведена на рисунку 3.7. На цій схемі показано взаємозв'язок основних функціональних вузлів, зокрема синтезатора сигналу, попереднього підсилювального каскаду, кінцевого підсилювача потужності та вихідного узгоджувального кола. Така структура дозволяє забезпечити необхідний рівень підсилення сигналу та стабільну роботу передавального тракту в заданому частотному діапазоні.



Рисунок 3.7 – Структурна схема тракту підсилення сигналу

На рисунку 3.7 наведено функціональну схему тракту підсилення сигналу в складі радіочастотного каналу. Схема включає вузол живлення ФАПЧ, що забезпечує стабілізовану напругу 3,3 В із застосуванням лінійного стабілізатора та багатоступеневої фільтрації для зменшення фазових шумів. Також наведено підсилювальний тракт, який містить драйверний каскад і кінцевий підсилювач потужності. Тракт працює на частоті 900 МГц і забезпечує вихідну потужність до 1 Вт при високій лінійності підсилення.



Рисунок 3.7 – Функціональна схема тракту підсилення сигналу

3.6 Схема живлення та розв'язка PLL

Стабільність роботи синтезатора частоти значною мірою залежить від якості джерела живлення, оскільки будь-які пульсації або шум у лінії живлення безпосередньо впливають на параметри фазової автопідстройки частоти (PLL) та можуть призводити до збільшення фазового шуму вихідного сигналу. Особливо

чутливими до шумів є генератор, керований напругою (VCO), та зарядовий насос PLL, робота яких визначає стабільність і чистоту спектра сформованого сигналу.

Для забезпечення необхідної стабільності у розроблюваній системі використано лінійний стабілізатор напруги 3,3 В з низьким рівнем власних шумів. Лінійні стабілізатори, на відміну від імпульсних, мають значно менший рівень високочастотних перешкод, що робить їх більш придатними для живлення високочастотних синтезаторів та аналогових вузлів радіочастотного тракту.

Рівень шумової напруги на виході стабілізатора визначається сумарним впливом пульсацій джерела живлення та власних шумів стабілізатора. Узагальнено шумову складову можна оцінити за співвідношенням:

$$U_{noise} = \sqrt{U_{ripple}^2 + U_{reg}^2}.$$

Для додаткового зниження шумів у ланцюгах живлення застосовується локальна фільтрація за допомогою конденсаторів розв'язки, які розміщуються безпосередньо біля виводів мікросхем. У схемі використовуються керамічні конденсатори 100 нФ, що ефективно пригнічують високочастотні перешкоди, а також конденсатори більшої ємності 1–10 мкФ, призначені для фільтрації низькочастотних складових пульсацій.

Ефективність фільтрації конденсатора визначається його комплексним імпедансом, який залежить від частоти сигналу. Імпеданс конденсатора визначається співвідношенням:

$$Z_c = \frac{1}{2\pi f C}.$$

З наведеної залежності видно, що зі зростанням частоти імпеданс конденсатора зменшується, що робить його ефективним елементом для відведення високочастотних шумів у землю. Саме тому у високочастотних

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

схемах зазвичай застосовується комбінація конденсаторів різної ємності, яка забезпечує ефективне придушення шумів у широкому діапазоні частот.

Крім локальних конденсаторів розв'язки, у системі застосовано багатоступеневу фільтрацію живлення, що включає використання фільтрувальних елементів у різних вузлах схеми. Такий підхід дозволяє ізолювати чутливі радіочастотні компоненти від перешкод, які можуть виникати у цифровій частині пристрою, зокрема від мікроконтролера та інтерфейсних ліній.

У результаті застосування багатоступеневої системи фільтрації живлення досягається зменшення фазового шуму синтезатора, підвищується стабільність частоти та покращуються спектральні характеристики сформованого сигналу. Це є особливо важливим для систем бездротового зв'язку, де якість сигналу та стабільність його параметрів безпосередньо впливають на ефективність роботи всієї радіотехнічної системи.

3.7 Висновки до третього розділу

У третьому розділі виконано проектування структурної та принципової електричної схеми пристрою формування лінійно-частотно модульованого сигналу для бездротових систем зв'язку. Обґрунтовано вибір архітектури формування сигналу на основі цифрового керування PLL-синтезатором, що забезпечує високу стабільність частоти, програмну гнучкість та повторюваність параметрів.

Розроблено структурну схему пристрою, визначено функціональні вузли та їх взаємодію. Як основний елемент синтезу частоти обрано мікросхему ADF4350 у поєднанні з мікроконтролером STM32 та термостабілізованим опорним генератором 25 МГц. Показано можливість реалізації ЛЧМ сигналу шляхом програмної зміни коефіцієнта поділу PLL.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Розроблено принципову електричну схему синтезатора частоти, підсилювального тракту та системи живлення з багатоступеневою фільтрацією. Особливу увагу приділено розв'язці живлення PLL та VCO з метою зменшення фазового шуму та паразитних спектральних складових.

Отримані технічні рішення забезпечують формування стабільного ЛЧМ сигналу з необхідною девіацією частоти та достатнім рівнем вихідної потужності, що відповідає вимогам до сучасних бездротових систем зв'язку.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						53
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПРИСТРОЮ

4.1 Архітектура програмного забезпечення

Програмне забезпечення пристрою формування ЛЧМ сигналу реалізоване на базі мікроконтролера STM32 та побудоване за модульним принципом. Такий підхід забезпечує структурованість коду, зручність налагодження, масштабованість та можливість подальшого розширення функціоналу.

Архітектура прошивки розділена на функціональні блоки, кожен з яких виконує окрему задачу в процесі формування сигналу. Взаємодія між модулями здійснюється через чітко визначені інтерфейси, що дозволяє відокремити логіку керування синтезатором від алгоритмічної частини формування ЛЧМ.

Структура програмної архітектури наведена на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Архітектура програмного забезпечення

Згідно з рисунком 4.1, програмне забезпечення включає модуль ініціалізації апаратних ресурсів, модуль керування PLL-синтезатором, таймерну підсистему та алгоритмічний модуль формування закону перебудови частоти.

Структура прошивки STM32. Прошивка організована за класичною моделлю вбудованих систем із процедурою початкової ініціалізації та безперервним виконанням основного циклу. Ключові події формування сигналу відбуваються у перериваннях таймера, що забезпечує стабільність часових інтервалів перебудови.

Основний цикл програми виконує фонові операції, тоді як зміна частоти здійснюється строго з визначеним періодом, що мінімізує часову нестабільність та джитер.

Модуль ініціалізації. Після подачі живлення виконується конфігурація системного тактового генератора, налаштування портів введення-виведення та ініціалізація інтерфейсу SPI для обміну з синтезатором ADF4350. Також здійснюється конфігурація апаратного таймера, який формує часовий інтервал перебудови частоти.

Стабільність системного такту є критично важливою, оскільки період таймера безпосередньо визначає рівномірність формування частотного свіпу.

Модуль керування PLL-синтезатором. Керування синтезатором частоти здійснюється шляхом передачі 32-бітних конфігураційних слів у регістри ADF4350 через інтерфейс SPI. Програмний модуль виконує обчислення параметрів INT, FRAC та MOD відповідно до заданої частоти, після чого формує повний набір регістрів R5–R0.

Оновлення частоти відбувається після запису регістру R0, що відповідає вимогам протоколу конфігурації ADF4350. Такий підхід забезпечує детерміновану зміну частоти та відтворюваність параметрів сигналу.

Таймерна система. Формування ЛЧМ сигналу потребує стабільного часового інтервалу між кроками перебудови. Для цього використовується апаратний таймер STM32, який генерує переривання з періодом

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

$$\Delta t = \frac{T}{N},$$

де T – тривалість свіпу, N – кількість дискретних кроків перебудови.

Використання апаратного таймера дозволяє мінімізувати похибки, пов'язані з виконанням програмного коду, та забезпечити рівномірність формування частотної характеристики.

Алгоритм перебудови частоти. Алгоритм реалізує ступінчасту апроксимацію лінійної залежності

$$f(t) = f_0 + kt.$$

На початковому етапі обчислюється крок перебудови частоти Δf_{step} та кількість кроків. Після цього через кожний часовий інтервал Δt виконується оновлення коефіцієнта поділу PLL, що призводить до зміни вихідної частоти синтезатора.

Після досягнення верхньої межі частоти алгоритм може або повернутися до початкової частоти, або перейти до зворотного свіпу, формуючи трикутний закон перебудови.

Такий підхід забезпечує гнучкість налаштування параметрів сигналу без зміни апаратної конфігурації пристрою.

Запропонована архітектура програмного забезпечення забезпечує детермінованість процесу формування ЛЧМ сигналу, стабільність часових інтервалів перебудови та можливість точного керування параметрами синтезатора частоти. Реалізована структура узгоджується з апаратною архітектурою пристрою та забезпечує формування сигналу з параметрами, визначеними у попередніх розділах.

4.2 Реалізація алгоритму формування ЛЧМ сигналу

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Реалізація лінійно-частотно модульованого сигналу в розробленому пристрої здійснюється програмним шляхом на основі цифрового керування PLL-синтезатором ADF4350. На відміну від аналогових методів, програмна реалізація дозволяє точно контролювати параметри перебудови частоти, забезпечити повторюваність характеристик та реалізувати різні профілі модуляції без зміни апаратної частини.

Згідно з теоретичною моделлю, наведеною у другому розділі, частотна залежність ЛЧМ сигналу описується рівнянням

$$f(t) = f_0 + kt,$$

де f_0 – початкова частота, $k = \frac{\Delta f}{T}$ – швидкість перебудови, T – тривалість світла.

У реальній цифровій системі безперервна функція замінюється дискретною послідовністю частотних кроків, що формує ступінчасту апроксимацію лінійної характеристики.

Логічна структура програмної реалізації наведена на рисунку 4.2.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

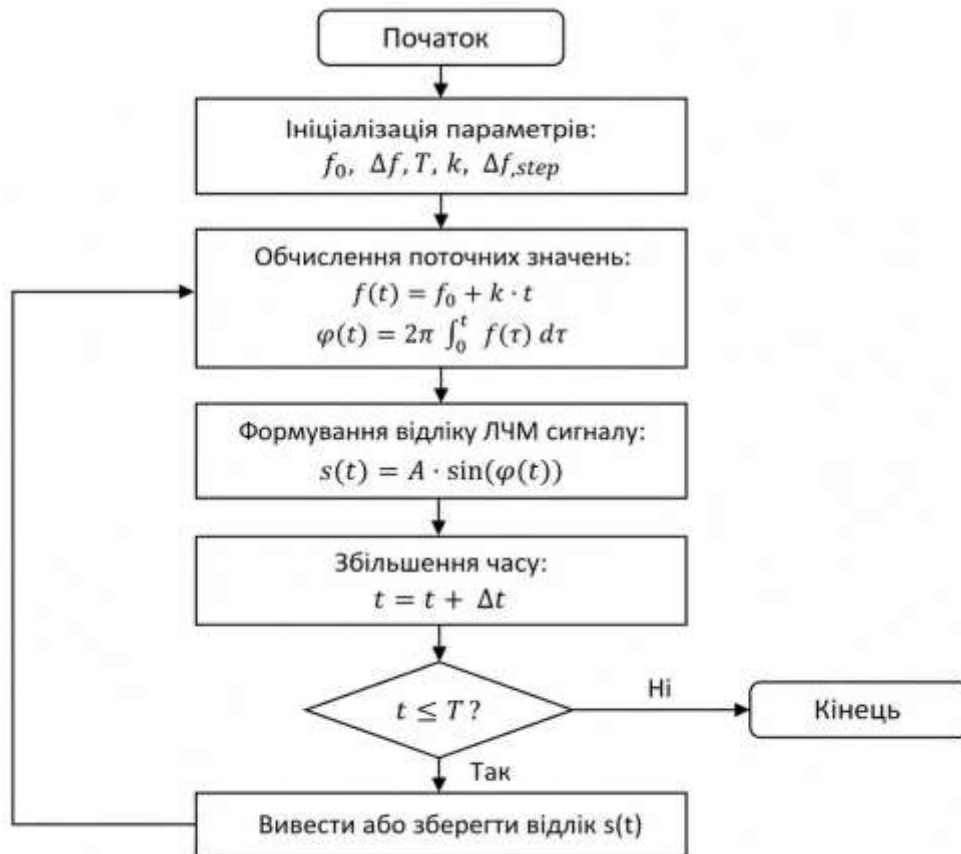


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритму формування ЛЧМ сигналу

Алгоритм починається з ініціалізації апаратних ресурсів мікроконтролера та синтезатора частоти. Далі виконується обчислення параметрів перебудови: початкової частоти, девіації, тривалості свіпу та швидкості зміни частоти. Після цього здійснюється розрахунок регістрів PLL, передача їх через SPI та перехід до циклічного оновлення частоти.

Обчислення регістрів ADF4350. Вихідна частота синтезатора визначається співвідношенням

$$f_{\text{вих}} = \frac{f_{\text{ФД}}}{DIV} \left(INT + \frac{FRAC}{MOD} \right),$$

де $f_{\text{ФД}}$ – частота фазового детектора, DIV – вихідний дільник, INT – ціла частина коефіцієнта, $FRAC$ та MOD – дробові параметри.

При використанні опорної частоти 25 МГц і коефіцієнті поділу $R=1$ маємо

$$f_{\text{фд}} = 25 \text{ МГц.}$$

Для кожного кроку перебудови програмний модуль виконує:

1. Обчислення необхідної частоти f_i .
2. Визначення коефіцієнта N .
3. Розкладання N на INT та FRAC/MOD.
4. Формування 32-бітних слів для регістрів R0–R5.
5. Передачу регістрів у синтезатор.

Таким чином забезпечується точна перебудова частоти відповідно до заданого алгоритму.

Часовий крок перебудови. Часовий інтервал між змінами частоти визначається апаратним таймером STM32. Якщо тривалість свіпу становить T , а кількість дискретних кроків – N , то

$$\Delta t = \frac{T}{N}.$$

У розробленій системі для параметрів

$$\Delta f = 200 \text{ кГц, } T = 1 \text{ мс,}$$

при кроці частоти близько 6,1 кГц кількість кроків становить приблизно 33, що відповідає часовому інтервалу

$$\Delta t \approx 30 \text{ мкс.}$$

Формування перебудови в обробнику переривання таймера забезпечує рівномірність зміни частоти та мінімізує часову нестабільність.

Ступінчаста апроксимація ЛЧМ сигналу. Оскільки PLL-синтезатор працює з дискретним кроком частоти, сформований сигнал має ступінчастий характер. Частота змінюється серією малих інкрементів, що апроксимують лінійну залежність.

Чим менший крок перебудови Δf_{step} , тим ближче форма сигналу до ідеального ЛЧМ. При достатньо малому кроці спектральні відхилення стають

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

незначними, а енергетичний розподіл у смузі практично відповідає теоретичному.

Ступінчаста апроксимація є прийнятною для більшості практичних застосувань у бездротових системах зв'язку, оскільки похибка апроксимації суттєво менша за вплив фазового шуму та інших апаратних факторів.

Реалізований алгоритм формування ЛЧМ сигналу забезпечує програмно керовану перебудову частоти з детермінованими часовими інтервалами. Використання дробового режиму синтезу ADF4350 дозволяє отримати малий крок перебудови та забезпечити високу точність формування сигналу.

Таким чином, програмна реалізація повністю узгоджується з теоретичними положеннями, розглянутими у попередніх розділах, та забезпечує формування ЛЧМ сигналу із заданими параметрами.

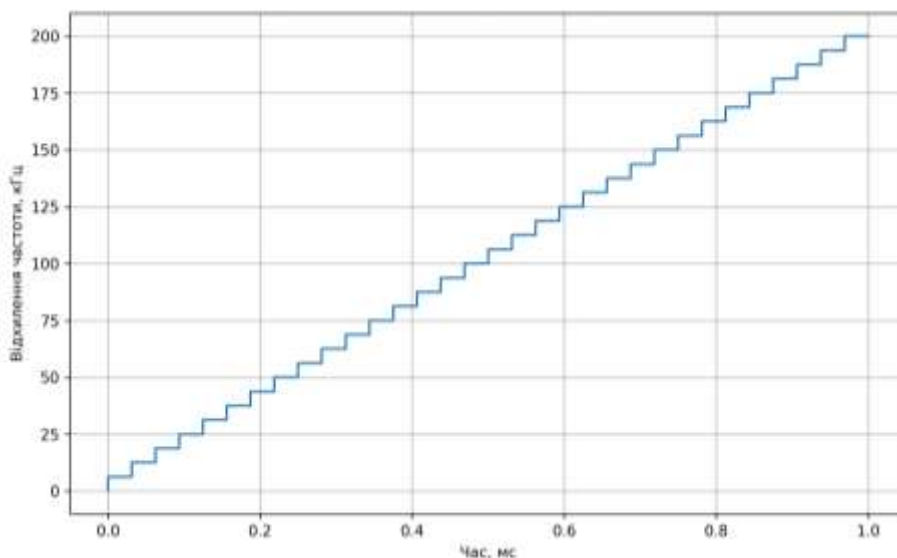


Рисунок 4.3 – Часова діаграма перебудови частоти

На рисунку 4.3 наведено часову діаграму перебудови частоти при формуванні ЛЧМ сигналу. Частота змінюється дискретними кроками у межах девіації 200 кГц протягом інтервалу 1 мс. Кожний крок відповідає оновленню регістрів PLL-синтезатора через інтервал приблизно 30 мкс.

Ступінчастий характер залежності обумовлений дискретною природою перебудови синтезатора ADF4350. При достатньо малому кроці перебудови форма сигналу наближається до ідеальної лінійної характеристики, що забезпечує формування ЛЧМ сигналу із заданими параметрами.

4.3 Розрахунок та програмна реалізація кроку перебудови

Одним із ключових параметрів формування лінійно-частотно модульованого сигналу є крок перебудови частоти. Величина цього кроку визначає точність апроксимації ідеальної лінійної характеристики, рівень спектральних відхилень та якість сформованого сигналу.

У синтезаторі частоти ADF4350 мінімальний крок перебудови визначається частотою фазового детектора f_{PFD} та значенням параметра MOD у дробовому режимі синтезу. Роздільна здатність перебудови частоти визначається співвідношенням

$$\Delta f_{min} = \frac{f_{PFD}}{MOD}$$

При використанні опорної частоти 25 МГц та значенні $MOD = 4095$ мінімальний крок становить

$$\Delta f_{min} \approx \frac{25 \cdot 10^6}{4095} \approx 6104 \text{ Гц.}$$

Отже, синтезатор забезпечує дискретну зміну частоти з кроком приблизно 6,1 кГц.

Визначення програмного кроку перебудови. Для заданих параметрів ЛЧМ сигналу

$$\Delta f = 200 \text{ кГц, } T = 1 \text{ мс,}$$

кількість кроків перебудови визначається як

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

$$N = \frac{\Delta f}{\Delta f_{min}}$$

Підставляючи числові значення, отримуємо

$$N \approx \frac{200 \cdot 10^3}{6104} \approx 33.$$

Таким чином, для реалізації заданої девіації необхідно виконати приблизно 33 послідовні зміни частоти.

Часовий інтервал між оновленнями регістрів синтезатора становить

$$\Delta t = \frac{T}{N} \approx 30 \text{ мкс.}$$

Це значення використовується при налаштуванні апаратного таймера STM32.

Квантування частоти та похибка апроксимації. Оскільки перебудова здійснюється дискретними кроками, виникає ефект квантування частоти. Реальна частота може відрізнятись від теоретично розрахованої на величину, що не перевищує половини мінімального кроку перебудови.

Графічна інтерпретація процесу квантування наведена на рисунку 4.4.

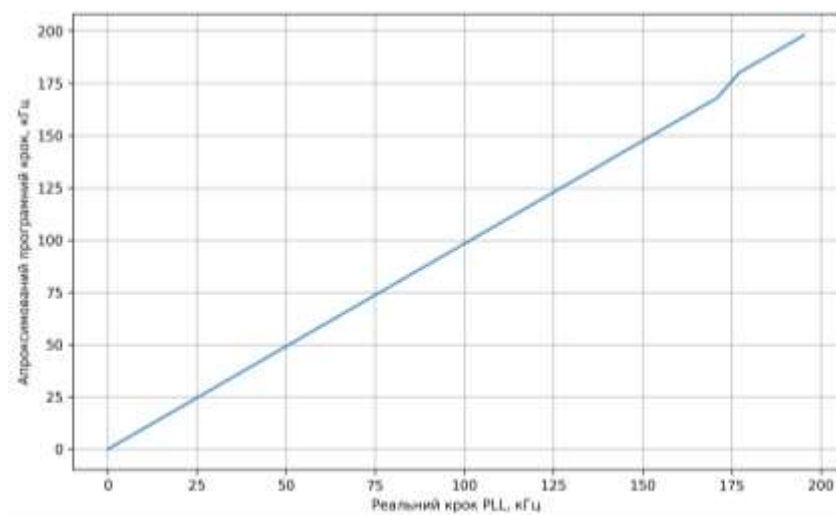


Рисунок 4.4 – Квантування кроку перебудови частоти

На графіку показано залежність між реальним кроком PLL та програмно заданим кроком перебудови. Видно, що при використанні дробового режиму синтезу відхилення є незначним і не впливає суттєво на форму ЛЧМ сигналу.

4.4 Моделювання та аналіз спектральних характеристик

Метою даного підрозділу є дослідження спектральних характеристик сформованого лінійно-частотно модульованого сигналу та оцінка впливу дискретної перебудови частоти на його частотний спектр. Моделювання виконано для параметрів, визначених у попередніх розділах: девіація частоти 200 кГц та тривалість свіпу 1 мс.

Відомо, що спектр ідеального ЛЧМ сигналу у межах девіації Δf має майже рівномірний енергетичний розподіл. Теоретично ширина спектра визначається співвідношенням

$$B \approx \Delta f,$$

де B – ефективна ширина спектра.

Для дослідження було сформовано комплексний ЛЧМ сигнал у базовій смузі та виконано його перетворення Фур'є. Отриманий спектр наведено на рисунку 4.5.

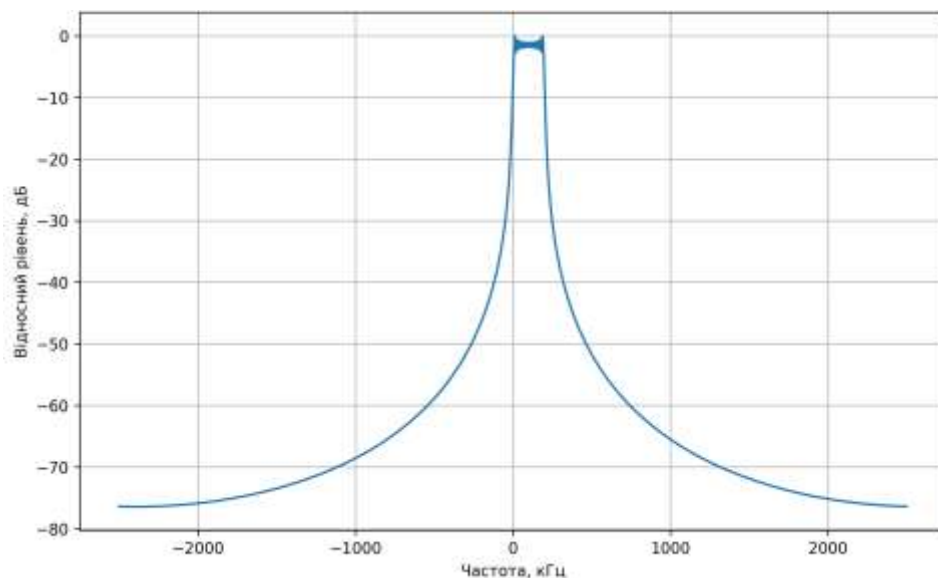


Рисунок 4.5 – Змодельований спектр ЛЧМ сигналу

З графіка видно, що основна енергія сигналу зосереджена в межах ± 100 кГц від центральної частоти, що відповідає загальній девіації 200 кГц. У середині смуги спостерігається відносно рівномірний розподіл спектральної густини потужності, що характерно для ЛЧМ сигналів.

Вплив дискретної перебудови. У реальному пристрої перебудова частоти здійснюється дискретними кроками приблизно 6,1 кГц. Це призводить до появи незначних спектральних відхилень у вигляді слабких побічних складових. Рівень цих складових визначається:

- величиною кроку перебудови;
- швидкістю свіпу;
- параметрами петльового фільтра PLL;
- фазовим шумом VCO.

Чим менший крок перебудови, тим ближче спектральна характеристика до спектра ідеального ЛЧМ сигналу.

Оцінка енергетичного розподілу. Часо-частотний добуток для сформованого сигналу становить

$$BT = \Delta f \cdot T = 200 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 200.$$

Значення $BT \gg 1$ свідчить про широкосмуговий характер сигналу та забезпечує підвищену завадостійкість у бездротових системах зв'язку.

Енергетичний розподіл у межах смуги є достатньо рівномірним, що підтверджує коректність реалізації алгоритму перебудови частоти.

Моделювання показало, що сформований ЛЧМ сигнал має спектральні характеристики, близькі до теоретичних. Ширина спектра відповідає розрахованій девіації частоти, а вплив дискретної перебудови є незначним при використанні дробового режиму синтезу ADF4350.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Отримані результати підтверджують можливість практичної реалізації ЛЧМ сигналу із заданими параметрами на основі розробленої програмно-апаратної архітектури.

4.5 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі виконано розробку програмного забезпечення пристрою формування лінійно-частотно модульованого сигналу та проведено моделювання його спектральних характеристик. Обґрунтовано архітектуру прошивки мікроконтролера STM32, що включає модуль ініціалізації апаратних ресурсів, підсистему керування PLL-синтезатором, таймерну систему та алгоритм перебудови частоти.

Розроблено алгоритм формування ЛЧМ сигналу на основі програмної зміни коефіцієнта поділу PLL-синтезатора ADF4350. Проведено розрахунок мінімального кроку перебудови частоти та визначено часовий інтервал оновлення регістрів, що забезпечує реалізацію заданої девіації частоти 200 кГц протягом 1 мс. Показано, що дискретна перебудова з кроком близько 6 кГц дозволяє отримати ступінчасту апроксимацію, достатньо близьку до ідеального лінійного закону зміни частоти.

За результатами моделювання встановлено, що спектральна ширина сформованого сигналу відповідає теоретичному значенню, а розподіл енергії в межах смуги є рівномірним. Вплив дискретності перебудови на спектральні характеристики є незначним при використанні дробового режиму синтезу.

Отримані результати підтверджують коректність обраних програмних та апаратних рішень і демонструють можливість формування ЛЧМ сигналу із заданими параметрами для застосування у бездротових системах зв'язку.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційному проєкті запропоновано та обґрунтовано принципи формування сигналів у бездротових системах зв'язку на прикладі реалізації лінійно-частотно модульованого сигналу. Проведене дослідження дозволило проаналізувати сучасні підходи до формування широкосмугових сигналів, визначити їх основні параметри та запропонувати практичну реалізацію генератора ЛЧМ сигналів на базі сучасних мікроелектронних компонентів.

У першому розділі виконано аналіз сучасних бездротових систем зв'язку та методів формування сигналів. Розглянуто класифікацію бездротових систем, особливості їх функціонування та основні вимоги до сигналів, що використовуються у таких системах. Досліджено основні види цифрової модуляції, зокрема FSK, PSK, QAM, OFDM, а також сигнали з лінійною частотною модуляцією. Проведено аналіз їх спектральних та енергетичних характеристик, визначено переваги та обмеження використання кожного типу сигналів. У результаті аналізу встановлено, що ЛЧМ сигнал є ефективним для широкосмугових систем завдяки значному часо-частотному добутку, високій завадостійкості та можливості ефективної кореляційної обробки.

У другому розділі розглянуто теоретичні основи формування ЛЧМ сигналу. Наведено математичну модель сигналу та виконано розрахунок його основних параметрів. Зокрема, визначено спектральну ширину сигналу, швидкість зміни частоти та енергетичні характеристики. Також виконано аналіз співвідношення сигнал/шум та оцінено вплив основних параметрів сигналу на його спектральні та енергетичні властивості. Отримані результати підтвердили відповідність вибраних параметрів вимогам до бездротових систем зв'язку та показали можливість формування сигналу з необхідними характеристиками.

У третьому розділі здійснено проєктування структурної та принципової електричної схеми пристрою формування ЛЧМ сигналу. Розроблено структурну схему пристрою та обґрунтовано вибір основних функціональних вузлів. В

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

якості основи генератора сигналу обрано архітектуру з цифровим керуванням PLL-синтезатором частоти ADF4350 із використанням мікроконтролера STM32 та термостабілізованого опорного генератора частотою 25 МГц, що забезпечує високу стабільність формованого сигналу. Крім того, розроблено підсилювальний тракт та систему живлення з багатоступеневою розв'язкою, що дозволяє знизити рівень шумів, покращити стабільність роботи та підвищити якість сформованого сигналу.

У четвертому розділі розроблено алгоритм програмного формування ЛЧМ сигналу та реалізовано програмне керування синтезатором частоти. Виконано розрахунок кроку перебудови частоти та досліджено спектральні характеристики сформованого сигналу методом моделювання. Показано, що використання ступінчастої апроксимації частотної характеристики з кроком близько 6 кГц забезпечує формування сигналу з дев'ятицією 200 кГц протягом 1 мс із незначними спектральними відхиленнями від ідеальної моделі. Результати моделювання підтвердили можливість формування сигналу з необхідними параметрами за допомогою програмного керування синтезатором частоти.

Отримані результати підтверджують можливість практичної реалізації програмно керованого генератора ЛЧМ сигналів для бездротових систем зв'язку. Запропоновані технічні рішення забезпечують високу частотну стабільність, програмну гнучкість та відповідність спектральним вимогам сучасних радіотехнічних систем. Використання сучасних мікроконтролерів та інтегральних синтезаторів частоти дозволяє створювати компактні, енергоефективні та функціонально гнучкі пристрої формування сигналів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленого підходу для створення генераторів широкосмугових сигналів у системах радіомоніторингу, радіолокації, телекомунікаційних комплексах та інших радіотехнічних системах, де необхідне формування сигналів із заданими спектральними характеристиками та високою стабільністю частоти.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

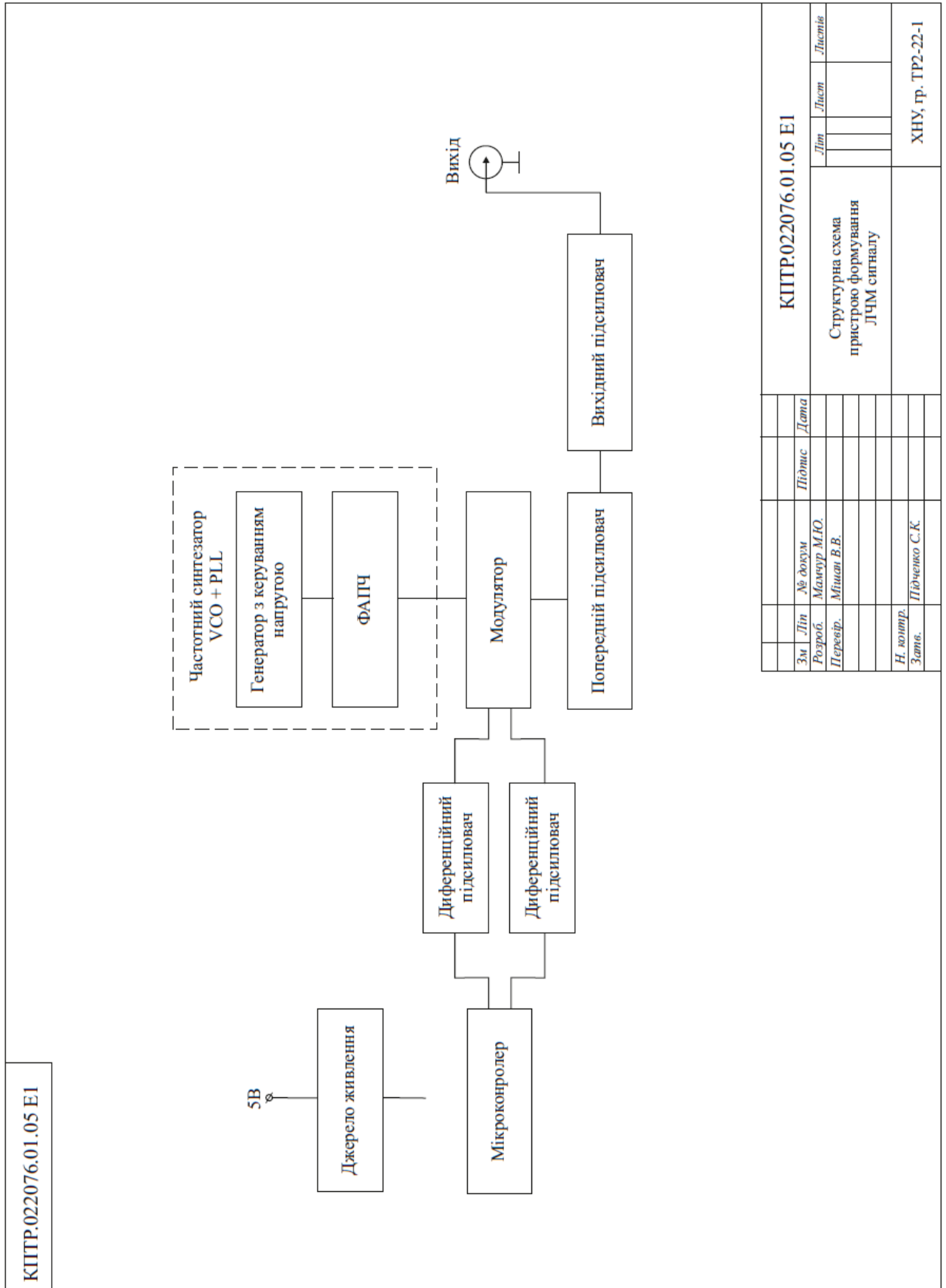
21. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for IoT // Sensors. – 2016.
22. Sanchez-Iborra R., Cano M.-D. State of the Art in LP-WAN Solutions for IoT // Sensors. – 2016.
23. Weinstein S., Ebert P. Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform // IEEE Trans. Commun. – 1971.
24. Nee R., Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications. – Artech House, 2000.
25. Li Y., Stuber G. OFDM for Wireless Communications. – Springer, 2006.
26. Wang T., et al. Chirp Spread Spectrum Modulation for Wireless Communication Systems // IEEE Communications Magazine. – 2018.
27. Cook C. E., Bernfeld M. Radar Signals: An Introduction to Theory and Application. – Academic Press, 1967.
28. Levanon N., Mozeson E. Radar Signals. – Wiley, 2004.
29. Skolnik M. Introduction to Radar Systems. – McGraw-Hill, 2001.
30. Rappaport T. Wireless Communications: Principles and Practice. – 2nd ed. – Prentice Hall, 2002.
31. Couch L. W. Digital and Analog Communication Systems. – Pearson, 2013.
32. Best R. Phase-Locked Loops: Design, Simulation and Applications. – McGraw-Hill, 2007.
33. Banerjee D. PLL Performance, Simulation and Design. – National Semiconductor, 2006.
34. IEEE Standard 802.11 – Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications.
35. IEEE Standard 802.15.4 – Low-Rate Wireless Personal Area Networks.
36. ETSI EN 300 220 – Short Range Devices; Radio equipment operating in the 25 MHz to 1000 MHz range.
37. ITU-R Recommendation SM.328 – Spectra and bandwidth of emissions.
38. ITU-R Recommendation SM.1541 – Unwanted emissions in the out-of-band domain.
39. Батигін В. В. Цифрова обробка сигналів у радіотехнічних системах. – Одеса: ОНАЗ ім. Попова, 2019.
40. Грабовський О. В. Синтез та аналіз широкосмугових радіосигналів. – Київ: НТУУ «КПІ», 2020.

					КПТР.022076.01.05 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

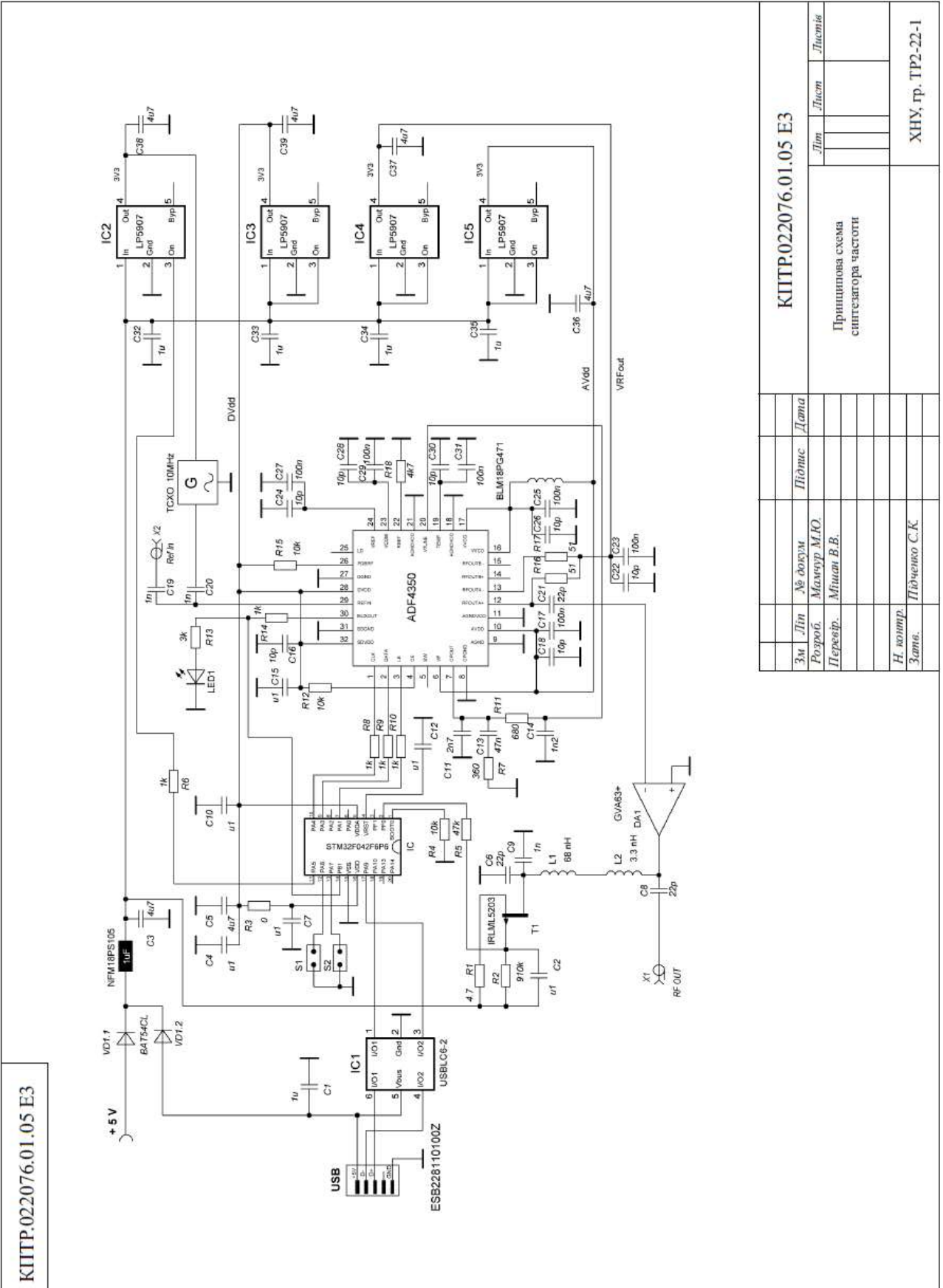
Додаток А

Структурна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу



Додаток В

Принципова схема синтезатора частоти



КІПТ.022076.01.05 E3		Лист	Листів
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис
Розроб.	Машур М.Ю.		
Пересір.	Мішан В.В.		
Н. конст.	Підченко С.К.		
Зам.			
Принципова схема синтезатора частоти			
ХНУ, гр. ТР2-22-1			

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Кваліфікаційний проект

ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ У БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

Виконав:
здобувач 3 курсу, група TP2-22-1

Максим МАМЧУР

Науковий керівник:
к.т.н., доцент

Віктор МИШАН

2



Мета, об'єкт, актуальність

Мета робота

спроектувати пристрій формування сигналів із розробкою схем та програмних алгоритмів синтезу

Об'єкт дослідження

процеси формування та модуляції сигналів у бездротових системах зв'язку

Актуальність теми:

сучасні бездротові системи зв'язку потребують ефективного формування та модуляції сигналів для забезпечення надійності й завадостійкості

3

Аналіз бездротових систем зв'язку

Основні напрямки класифікації:

- за зоною покриття;
- за частотним діапазоном;
- за методом доступу;
- за типом модуляції

Особливості сучасних систем:

- мобільність та гнучкість мереж;
- висока швидкість передачі даних;
- цифрові методи обробки сигналів;
- підвищена спектральна ефективність

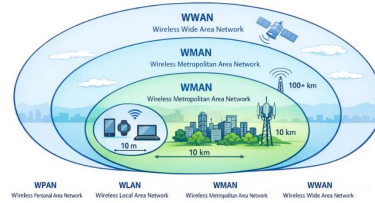


Рис. 1 – Класифікація бездротових систем за зоною покриття

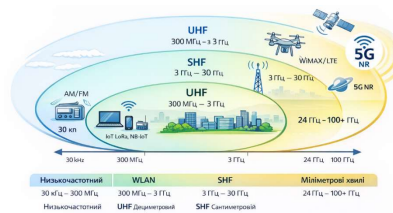


Рис.2 – Частотні діапазони, що використовуються у бездротових системах зв'язку

4

Структурна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу

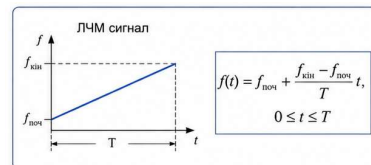


Рис. 3 – Структурна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу

5

Функціональна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу

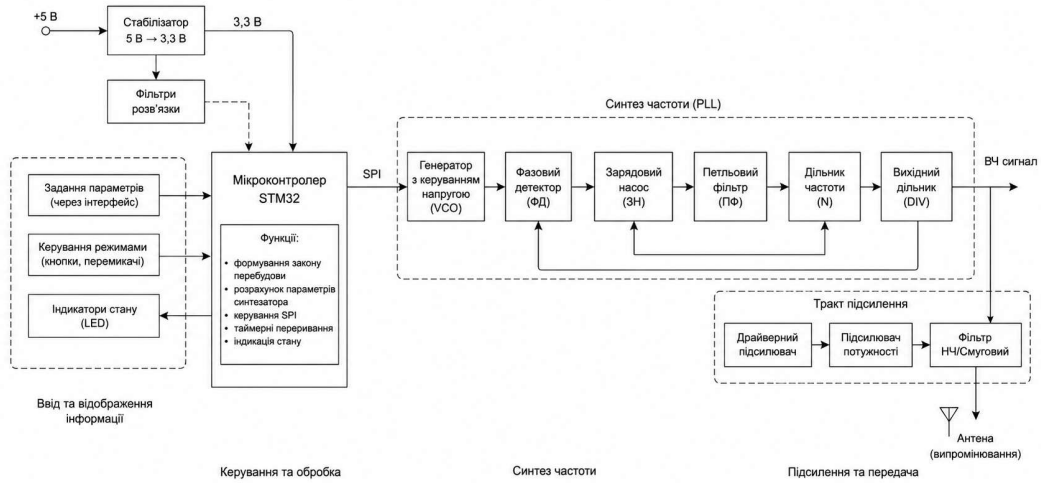


Рис. 4 – Функціональна схема пристрою формування ЛЧМ сигналу

6

Математична модель лінійно-частотна модуляція

Гармонічний сигнал: $s(t) = A \cos \varphi(t)$

Фаза ЛЧМ сигналу: $\varphi(t) = 2\pi \left(f_0 t + \frac{kt^2}{2} \right)$

Модель сигналу: $s(t) = A \cos \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{kt^2}{2} \right) \right]$

Миттєва частота: $f(t) = f_0 + kt$

Коефіцієнт зміни частоти: $k = \frac{\Delta f}{T}$

Потужність: $P = \frac{A^2}{2}$

ЛЧМ сигнал – сигнал із лінійною зміною частоти у часі

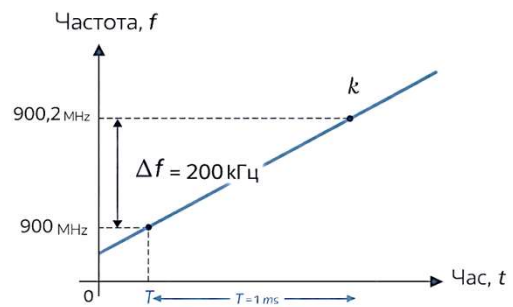


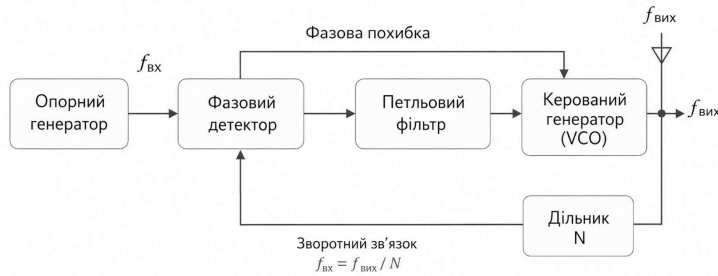
Рис. 5 – Формування спектральної ширини ЛЧМ сигналу

7

Синтезатора частоти на основі ФАПЧ

PLL

Phase-Locked Loop
фазова автопідстройка частоти



Основне співвідношення PLL

$$f_{\text{вих}} = N \cdot f_{\text{вх}} \quad (1)$$

- Керування частотою через зміну коефіцієнту поділу N

Рис. 6 – Структурна схема синтезатора частоти на основі ФАПЧ

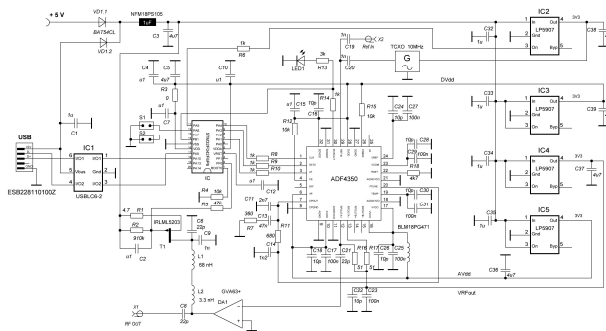
- ФАПЧ забезпечує фазову автопідстройку частоти
- Система працює у замкненому контурі зворотного зв'язку
- Формування вихідної частоти через дільник частоти



8

Структура керування та реалізація синтезу частоти

Керування синтезатором STM32



- TCXO
- +
- ADF4350
- +
- петльовий фільтр



Плата STM32 з STM32F407VET6



Рис. 7 – Принципова схема синтезатора частоти

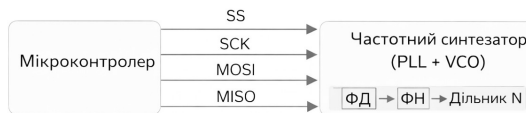


Рисунок 3.2 – Взаємодія мікроконтролера із синтезатором частоти

9

Принцип формування ЛЧМ сигналу



Параметри ЛЧМ сигналу

- $f_0 = 900$ МГц – початкова частота сигналу
- $\Delta f = 200$ кГц – девіація частоти
- $T = 1$ мс – тривалість сигналу

Швидкість перебудови: $k = \frac{\Delta f}{T}$

$$k = \frac{200 \text{ кГц}}{1 \text{ мс}} = 2 \times 10^8 \text{ Гц/с}$$

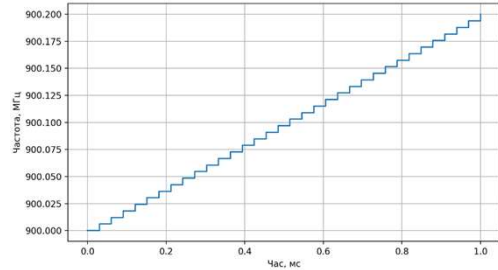


Рис. 8 – Ступінчаста апроксимація ЛЧМ сигналу

- ЛЧМ формується **дискретною перебудовою частоти**
- Зміна коефіцієнта PLL через **SPI**
- Крок перебудови: Δt
- Ступінчаста апроксимація → наближення до лінійного закону

10

Підсилювальний тракт та живлення системи



Підсилювальний тракт

- Драйверний каскад
- Кінцевий підсилювач потужності
 - Робоча частота: 900 МГц
 - Вихідна потужність: до 1 Вт
 - Висока лінійність підсилення

Живлення ФАПЧ

- Лінійний стабілізатор 3,3 В
- Конденсатори розв'язки 100 нФ та 1–10 мкФ
- Багатоступенева фільтрація
- Зменшення фазового шуму
- Стабільне живлення ФАПЧ



Рис. 9 – Структурна схема тракту підсилення сигналу

11

Архітектура ПЗ та керування ФАПЧ

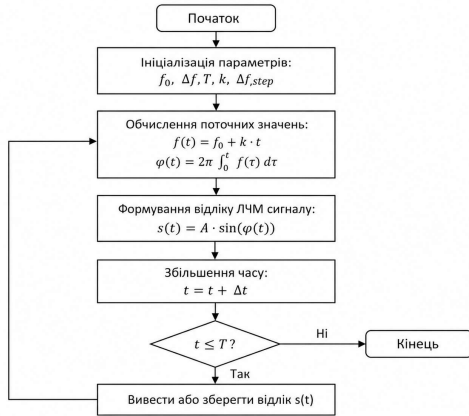


Рис. 11 – Блок-схема алгоритму формування ЛЧМ сигналу

що робить програма

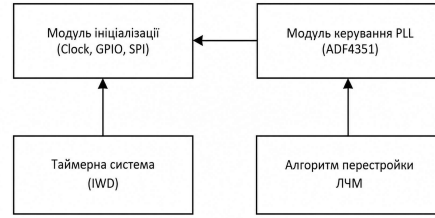


Рис. 10 – Архітектура програмного забезпечення STM32

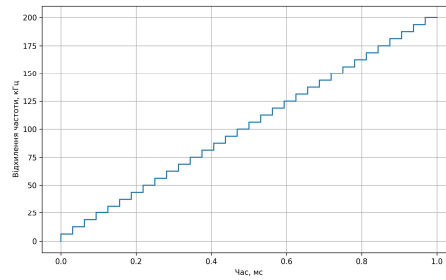


Рис. 12 – Часова діаграма перебудови частоти

як це виглядає в часі



12

Спектральні характеристики

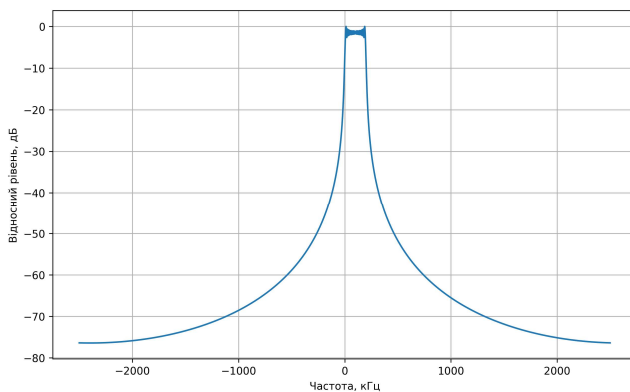


Рис. 13 – Змодельований спектр ЛЧМ сигналу

Основні результати моделювання:

- Параметри сигналу:
 - $\Delta f = 200$ кГц
 - $T = 1$ мс
- Теоретична ширина спектра:
 - $B \approx \Delta f$
- Основна енергія зосереджена в межах ± 100 кГц
- Крок перебудови частоти $\approx 6,1$ кГц
- Часо-частотний добуток:

$$BT = \Delta f \cdot T = 200 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 200$$

- Спектр близький до теоретичного ЛЧМ сигналу



13



14

Висновки

Представлена система забезпечує точне та гнучке формування ЛЧМ сигналів для сучасних бездротових технологій



У результаті виконання кваліфікаційного проєкту:

- проведено аналіз сучасних бездротових систем зв'язку;
- розроблено структурну та функціональну схеми пристрою формування ЛЧМ сигналів;
- реалізовано систему синтезу частоти на базі ADF4351 та STM32;
- розроблено алгоритм програмної перебудови частоти для формування ЛЧМ сигналу;
- виконано моделювання спектральних характеристик сигналу;
- підтверджено можливість формування ЛЧМ сигналу з центральною частотою 900 МГц, дев'ятью 200 кГц та тривалістю 1 мс

Поставлена мета роботи досягнута повністю



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!



ВІДГУК

на кваліфікаційний проект

студента групи ТР2-22-1 Максима МАМЧУРА

«Формування сигналів у бездротових системах зв'язку»

Кваліфікаційний проект присвячений актуальній інженерно-технічній проблемі – створенню пристрою формування сигналів для бездротових систем зв'язку. У роботі виконано аналіз сучасних методів модуляції та синтезу радіосигналів, розроблено структурну та принципову електричну схему генератора широкосмугових сигналів на базі мікроконтролера STM32 та PLL-синтезатора частоти. Проведено розрахунок енергетичних параметрів сигналу та реалізовано програмний алгоритм формування ЛЧМ сигналу.

У процесі виконання кваліфікаційного проекту студент продемонстрував високий рівень володіння теоретичним матеріалом, здатність до аналітичного мислення, уміння застосовувати сучасні методи цифрової обробки сигналів та інженерні засоби проектування. Особливо слід відзначити комплексний підхід до створення системи, який охоплює як математичне моделювання сигналів, так і практичну реалізацію генератора ЛЧМ сигналів із використанням сучасних мікроелектронних компонентів.

У конструкторському розділі розроблено структурну та принципову схему пристрою, обґрунтовано вибір функціональних вузлів, реалізовано підсилювальний тракт та систему живлення з багатоступеневою розв'язкою, що забезпечує стабільність роботи та зниження рівня шумів. У дослідницькій частині виконано моделювання спектральних характеристик сигналу, підтверджено відповідність параметрів вимогам сучасних бездротових систем зв'язку.

Оформлення пояснювальної записки відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт. Структура проекту є логічною, виклад матеріалу – послідовний, з належним рівнем технічної грамотності. Отримані результати мають як наукову новизну, так і прикладне значення.

Кваліфікаційний проект виконано на високому технічному рівні, має безперечну актуальність у сфері сучасних бездротових систем зв'язку, а студент Максим МАМЧУР заслуговує оцінки «відмінно».

Керівник:

к. т.н, доцент



Віктор МІШАН

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Дипломник: МАМЧУР Максим Юрійович

Тема роботи: Формування сигналів у бездротових системах зв'язку

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційного проекту

Кількість листів креслень 4 Кількість сторінок записки 66

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Кваліфікаційний проєкт присвячений дослідженню та проєктуванню пристрою формування сигналів у бездротових системах зв'язку. У роботі проведено аналіз сучасних методів модуляції та синтезу радіосигналів, розроблено структурну та принципову електричну схему генератора широкосмугових сигналів на базі мікроконтролера STM32 та PLL-синтезатора частоти. Виконано розрахунок енергетичних параметрів сигналу та реалізовано програмний алгоритм формування ЛЧМ сигналу. Результатом роботи є комплект конструкторської документації для практичної реалізації пристрою.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Каліфікаційний проєкт відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: Робота виконана з використанням сучасних наукових підходів та інженерних методів. У першому розділі наведено аналіз сучасних бездротових систем зв'язку та методів формування сигналів, розглянуто класифікацію систем та основні вимоги до сигналів. У другому розділі розроблено математичну модель ЛЧМ сигналу та виконано розрахунок його параметрів. У третьому розділі здійснено проєктування структурної та принципової електричної схеми пристрою, обґрунтовано вибір функціональних вузлів. У четвертому розділі розроблено алгоритм програмного формування сигналу та проведено моделювання його спектральних характеристик.

4. Позитивні сторони роботи: Робота присвячена актуальній темі створення пристроїв формування сигналів для сучасних бездротових систем зв'язку. Відзначається комплексний підхід до аналізу, проєктування та моделювання, обґрунтований вибір елементної бази, застосування сучасних мікроконтролерів та інтегральних синтезаторів частоти. Практичне значення отриманих

результатів полягає у можливості використання розробленого пристрою в системах радіомоніторингу, радіолокації та телекомунікаційних комплексах.

5. Негативні сторони роботи: Робота виконана на високому рівні, однак потребує уточнення окремих параметрів спектральних характеристик сигналу та більш детального аналізу довготривалої стабільності роботи пристрою. У пояснювальній записці трапляються незначні стилістичні та форматувальні недоліки.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Графічне оформлення та пояснювальна записка відповідають вимогам до кваліфікаційних робіт

7. Відгук про роботу в цілому: У цілому кваліфікаційний проєкт виконаний якісно, демонструє вміння студента працювати з сучасними технічними рішеннями, застосовувати інженерні методи аналізу та проєктування. Робота має практичну значущість, відповідає поставленій меті та заслуговує позитивної оцінки.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка дипломної роботи: Кваліфікаційний проєкт відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки «відмінно», а її автору Максиму МАМЧУРУ, присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Електронні комунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Тзла Тар
Володимир Володимирович, к. т. н., викладач кафедри фізики,
математики та інформатики, ХНУ

« 5 » червня 2026р.

підпис

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій
д.т.н., професору ПІДЧЕНКУ Сергію
здобувача вищої освіти
Максима МАМЧУРА
ФІТ, гр. ТР2-22-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу мого кваліфікаційного проєкту для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом мого кваліфікаційного проєкта «Формування сигналів у бездротових системах зв'язку» в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія мого кваліфікаційного проєкту збігається (ідентична) з друкованою.

28 травня 2026 р.
дата


підпис

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-16.718

Максимальне співпадіння з одним документом 2.0%

Словники перевірки: UA, US, RU. Помилка в документах: 10%

ID: 273209 Назва: Формування сигналів у бездротових системах зв'язку Додано в БД: 2026-06-02 Автор: Мамчур Максим Юрійович Керівник: Мішан Віктор Володимирович Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	78098	690	2582 (3%)	46 (7%)

Джерело плагиату

ID	Опис	Наявність плагиату в документі	
		Символи	Лексеми

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: БКР_Максим МАМЧУР_ТР2-22-1

Співавтор:

Назва: Формування сигналів у бездротових системах зв'язку

Науковий керівник: Віктор МПШАН, к.т.н., доц.

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1: 4.47%

Коефіцієнт подібності 2: 0.78%

Мікропробіли: 1

Заміна букв: 40

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-03 08:02:00.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32, ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42, ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Дата 03.06.26р

експерт



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційного проєкту: Формування сигналів у бездротових системах зв'язку

Автор: МАМЧУР Максим Юрійович

Освітня програма Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Керівник кваліфікаційного проєкту: к.т.н., доцент Віктор МІШАН

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	+
1.2	Виявлені запозичення не є академічним 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.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
2	Інші види порушень академічної доброчесності	-

Підтвердження:

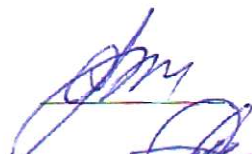
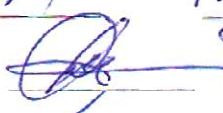

Виявлені запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), коефіцієнти подібності складають 4,7% та 0,7%, а також мають посилання на приведений список літературних джерел.

«3» червня 2026 р.

Завідувач кафедри ТМІТ

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційного проєкту

Міщенко О.К.
Стецюк В.І.
Мішан В.В.