

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

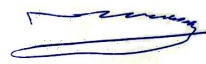
Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем
(повна назва кафедри)

"На правах рукопису"
УДК 654.022

"До захисту допущено"

Завідувач кафедри



С.А. Найда
(ініціали, прізвище)

"8" грудня 2020 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 171 Електроніка (Електронні системи мультимедія та засоби Інтернету речей)
(код і назва)

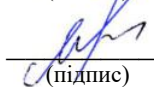
на тему: "Універсальний приймально-передавальний пристрій із застосуванням технології SDR"

Виконав: студент II курсу, групи ДВ-92мп
(шифр групи)

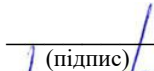
Титаренко Ольга Олександрівна
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

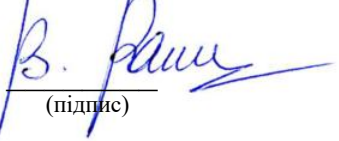
Керівник к.т.н., доц. Макаренко В. В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Рецензент зав. відділом і-ту Кібернетики НАН України,
професор, д.т.н., Романов В.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент 
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського"**

Інститут (факультет) _____ електроніки _____
(повна назва)


Кафедра _____ акустичних та мультимедійних електронних систем _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

Спеціальність 171 Електроніка (Електронні системи мультимедія та засоби Інтернету речей) _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 С.А. Найда
(імена, прізвище)

“ 8 ” грудня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Титаренко Ользі Олександрівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: "Універсальний приймально-передавальний пристрій із застосуванням технології SDR"

науковий керівник дисертації Макаренко Володимир Васильович, к.т.н., доц,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від "05" листопада 2020 р. №3241-с

2. Строк подання студентом дисертації 01 грудня 2020 року

3. Об'єкт дослідження прийомопередавачі із застосуванням технології SDR

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) структурні схеми прийомопередавачів для системи SDR, трансивер ADF7023.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Дослідити принцип роботи прийомопередавачів з використанням технології SDR. 2. Розробити структурну та функціональну схему прийомопередавача. 3. Обґрунтувати вибір компонентів для реалізації принципової схеми прийомопередавального тракту. 4. Розробити принципову схему прийомопередавального тракту.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу презентація з наведеними результатами дослідження, 19 слайдів; схеми прийомопередавача: структурна, функціональна та принципова.

7. Орієнтовний перелік опубліковано одну статтю за темою магістерської дисертації у фахових виданнях та участь у 3 конференціях з опублікуванням 3 тез доповідей у міжнародних науково-практичних конференціях студентів.

8. Консультанти розділів дисертації*


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 2 вересня 2020 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Написання першого розділу	30.09.2020	Виконано
	Написання другого розділу	26.10.2020	Виконано
	Написання третього розділу	11.11.2020	Виконано
	Написання четвертого розділу	19.11.2020	Виконано
	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	20.11.2020	Виконано
	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	22.11.2020	Виконано

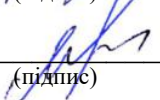
Студент


(підпис)

О. О. Титаренко

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи


(підпис)

В. В. Макаренко

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

РЕФЕРАТ

Титаренко О.О. Універсальний приймально-передавальний пристрій із застосуванням технології SDR: магістерська дис.: 171 Електроніка. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 106 с.

Ключові слова: software-defined radio, програмовані радіосистеми, прийомопередавач, портативна радіостанція.

Актуальність дослідження. Розвиток стандартів зв'язку сприяв необхідності створення універсальних приймально-передавальних пристроїв. Застосування технології SDR в прийомопередавачах дозволяє вирішити проблеми:

- сумісності безпроводових стандартів зв'язку в межах однієї радіосистеми;
- оперативної зміни функцій прийомопередавача програмно без зміни апаратної частини пристрою.

Метою дослідження є розробка універсального прийомопередавача із застосуванням технології SDR. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз та моделювання роботи трансивера за різних умов розповсюдження сигналів;
- розробити структурну, функціональну та принципову схеми прийомопередавача.

Об'єкт дослідження – однокристальні прийомопередавачі.

Предмет дослідження – структурні схеми прийомопередавачів для систем SDR.

Методи дослідження – теоретичний та практичний аналіз прийомопередавачів із застосуванням технології SDR.

Наукова новизна одержаних результатів: запропонований прийомопередавач із застосуванням технології SDR.

Практична значення одержаних результатів: розроблений прийомопередавач дозволяє змінювати налаштування в залежності від оточуючої обстановки, що дозволяє забезпечити надійний зв'язок в умовах промислової забудови.

Апробація результатів дисертації: у роботі здійснено моделювання роботи прийомопередавача із застосуванням технології SDR в середовищі ADIsimSRD Design Studio.

SUMMARY

The master's thesis considers the features of SDR technology and the principles of construction of transceivers using SDR technology.

To build the structural and functional schemes of the transceiver using SDR technology, a single-crystal transceiver ADF7023 implemented according to the superheterodyne scheme with digital signal processing in the intermediate frequency path was chosen.

Using the software environment ADIsimSRD Design Studio simulated the operation of the transceiver ADF7023 under different conditions of signal propagation. Based on the simulation and comparative analysis of the parameters of different transceivers, a schematic diagram of the transceiver is developed.

The choice of components with low power consumption for long-term operation of the transceiver from an autonomous power supply is justified.

Analysis of the implementation of the idea of a startup project showed that the potential market is attractive for entry and has a positive trend. The need for multifunctional low-power and compact transceivers with the ability to pre-test and model the propagation of signals is relevant for industrial automation, small businesses and research organizations.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	8
Вступ.....	10
1 Аналітичний огляд	11
1.1 Особливості технології SDR	11
1.2 Принцип роботи прийомопередавачів з використанням технології SDR.....	13
1.3 Структурні схеми прийомопередавачів для системи SDR.....	16
1.4 Основні вимоги до приймально-передавальних трактів SDR-пристроїв.....	23
Висновки до розділу	26
2 Розробка функціональної схеми прийомопередавача.....	27
2.1 Структурна схема прийомопередавача.....	27
2.2 Функціональна схема прийомопередавача.....	29
Висновки до розділу	32
3 Обґрунтування вибору компонентів для реалізації прийомопередавача.....	33
3.1 Обґрунтування вибору мікросхеми прийомопередавача.....	33
3.2 Моделювання роботи прийомопередавача.....	38
3.3 Розробка принципової схеми прийомопередавального тракту.....	56
3.3.1 Вибір мікроконтролера	56
3.3.2 Вибір мікросхеми інтерфейса USB	58
3.3.3 Вибір LCD дисплея	58
3.3.4 Вибір підсилювачів для мікрофону та гучномовця.....	59
3.3.5 Вибір структури та елементів джерела живлення	59
3.3.5.1 Вибір акумулятора	59
3.3.5.2 Вибір стабілізаторів напруги	62
Висновки до розділу	64
4 Розроблення стартап-проекту	65

4.1. Опис ідеї проекту	65
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	66
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	67
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	74
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	77
Висновки до розділу	80
Висновки	81
Перелік джерел посилань	83
Додаток А Abstract	85
Додаток Б Технічне завдання.....	90
Додаток В Схема електрична структурна.....	94
Додаток Г Схема електрична функціональна	97
Додаток Д Перелік елементів.....	99
Додаток Е Схема електрична принципова	105

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АМ	– амплітудна модуляція;
АМн	– амплітудна маніпуляція;
АРП	– автоматичне регулювання підсилення;
АЦП	– аналого-цифровий перетворювач;
ВхФ	– вхідний фільтр;
ГКН	– генератор керований напругою;
ДОН	– джерело опорної напруги;
МК	– мікрофон;
МП	– мікрофонний підсилювач;
ПВЧ	– підсилювач високої частоти;
ПП	– підсилювач потужності;
ППЧ	– підсилювач проміжної частоти;
ПЧ	– проміжна частота;
СФ	– смуговий фільтр;
СЧ	– синтезатор частоти;
ФД	– фазовий детектор;
ФМ	– фазова модуляція;
ФНЧ	– фільтр нижніх частот;
ЦАП	– цифро-аналоговий перетворювач;
ЦОС	– цифрова обробка сигналу;
ЦП	– центральний процесор;
ЦСП	– цифровий сигнальний процесор;
ЧМ	– частотна модуляція;
ASK	– Amplitude Shift Keying;
BER	– Bit Error Rate;
DSP	– Digital Signal Processor;
FPGA	– Field-Programmable Gate Array;

- FSK – Frequency Shift Keying;
- JTRS – Joint Tactical Radio System;
- LCD – Liquid crystal display;
- LTE – Long-Term Evolution;
- OOK – On/Off Keying;
- QAM – Quadrature Amplitude Modulation;
- QPSK – Quadrature Phase Shift Keying;
- SCA – Software Communications Architecture;
- SDR – Software-Defined Radio;

ВСТУП

Концепція Інтернету речей (IoT – Internet Of Things) передбачає використання глобальної мережі Інтернет для вирішення задач моніторингу, вимірювання, управління і об'єднання пристроїв для обміну інформацією. Істотне зростання числа об'єднаних в мережу приладів стало можливим завдяки розвитку безпроводових технологій. Для реалізації безпроводового зв'язку у мережі сенсорів необхідно використовувати прийомопередавачі, що з одного боку мають дуже низьке енергоспоживання, а з іншого – забезпечують достатню потужність для здійснення зв'язку на великій відстані.

На сьогоднішній день "Інтернет речей" має попит в таких областях, як медицина, безпека, промислова автоматизація, інтелектуальні мережі, віддалене управління об'єктами, інженерні та охоронні системи будівель. Всі ці області застосування вимагають наявності високоінтегрованих компонентів передачі та прийому, що здатні забезпечити низьке енергоспоживанням для збільшення терміну роботи, передавання даних з високою вірогідністю, здатність працювати в неліцензованому діапазоні частот, простоту і надійність експлуатації, можливість масштабування без значних додаткових витрат та відповідність міжнародним стандартам. Рішення всіх перерахованих задач є обов'язковою умовою для конкурентоспроможності виробу на ринку Інтернет речей.

Особливість програмно-визначуваних систем підтримувати одночасно декілька стандартів зв'язку надає можливість створювати універсальні приймально-передавальні пристрої. Таким чином на одній апаратній платформі можливо поєднати декілька протоколів зв'язку. Розвиток однокристальних інтегрованих мікросхем трансиверів з низьким енергоспоживанням, доступною ціною, сприяє створенню компактних портативних прийомопередавачів. Використання програмного моделювання дозволяє скоротити час розробки радіосистеми та загальну вартість готового пристрою.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Особливості технології SDR

Експотенціальний розвиток стандартів і протоколів зв'язку, як для цивільного, так і для військового застосування, сприяв необхідності створення багатостандартних систем зв'язку широкого призначення. Вирішення даного питання можливе завдяки використанню технології програмно-визначуваного радіо (Software-Defined Radio – SDR) в радіосистемах, що підтримують існуючі та нові стандарти зв'язку.

Основна концепція технології SDR полягає в тому, що всі функції радіосистеми можуть бути повністю визначені програмним забезпеченням без зміни конфігурації апаратної частини.

Програмно-визначувана радіосистема – це поєднання апаратного та програмного забезпечення, що дозволяє користувачу програмно встановлювати/змінювати робочі параметри: форму сигналу, потужність, чутливість, метод модуляції/демодуляції, діапазон частот і т.д.

Апаратна частина програмно-визначуваних радіосистем, як правило, побудована за допомогою цифрових сигнальних процесорів (Digital Signal Processor – DSP), програмованої інтегральної схеми (Field-Programmable Gate Array – FPGA), процесорів загального призначення (General Purpose Processor – GPP), системи на кристалі (System-on-a-Chip – SoC), аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворювачів – перелічені елементи дозволяють вносити зміни в налаштуваннях радіосистеми шляхом оновлення програмного забезпечення без додаткових витрат на нове обладнання.

Важливою складовою програмно-визначуваних радіосистем є програмне забезпечення. Для стандартизації розробки програмно-визначуваних радіосистем Міністерством охорони Сполучених Штатів Америки було розроблено відкриту архітектуру SCA – Software Communication Architecture. Архітектура SCA надає набір правил для взаємодії та уніфікації програмного забезпечення і апаратних платформ різних радіосистем. Сьогодні використання принципів відкритої

архітектури SCA в програмно-визначуваних радіосистемах, дозволяє підвищити сумісність між SDR-пристроями та надає радіосистемі масштабованості [1].

Технологія SDR використовується в:

- системах спеціального зв'язку (американська військова радіосистема Joint Tactical Radio System);
- супутникових комунікаціях (глобальна навігаційна супутникова система GNSS);
- стільникових технологіях;
- телекомунікаційних системах;
- Інтернет речах (Internet of Things – IoT);
- автомобільних системах зв'язку (V2V – Vehicle-to-vehicle).

Застосування технології SDR в вище перерахованих сферах, стало можливим завдяки розвитку радіочастотних інтегральних схем (Radio Frequency Integrated Circuit – RFIC) та відносно недорогих програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) з цифровими сигнальними процесорами таких компаній як Analog Devices, Xilinx, Texas Instruments, Atmel та ін.

Особливість програмно-визначуваних систем підтримувати одночасно декілька протоколів зв'язку надає значну перевагу перед апаратно-визначеним аналогом та знайшла застосування в стільникових технологіях. Таким чином зникає потреба використовувати окремий модуль для кожного протоколу радіозв'язку і доцільно встановити один апаратний модуль, але з різним програмним забезпеченням для кожного протоколу зв'язку. Прикладом є мобільні телефони компаній Seva, Tensilica і Qualcomm.

Основні фактори, що вплинули на широке застосування програмно-визначуваних радіосистем, як в комерційній, так і в некомерційній сфері, наведено нижче:

- зменшення часу на розробку радіосистеми, шляхом використання програмного забезпечення для проектування аналогового обладнання;

- сумісність і взаємодія радіосистем з різними стандартами безпроводового зв'язку;
- багатофункціональність систем SDR передбачає підтримку існуючих та нових стандартів зв'язку, шляхом оновлення програмного забезпечення;
- ефективне використання спектру полягає в тому, що власник або основний користувач спектру може надавати другорядним користувачам незадіяні канали до повторної необхідності;
- зменшення вартості готової радіосистеми за рахунок використання того ж обладнання при збільшенні функціональності системи.

Отже технологія SDR в радіосистемах дозволяє замінити більшість складних аналогових процесів цифровою обробкою сигналів завдяки застосуванню програмного забезпечення або мікропрограми. Поява мікросхем прийомопередавачів з високим ступенем інтеграції, можливістю обробки широкосмугових радіосигналів стандартів UMTS, LTE, 2G/3G/4G/5G, наднизьким енергоспоживанням для роботи в діапазоні ISM (Industrial, Scientific, Medical), сприяла розвитку програмно-визначуваних радіосистем систем та безпроводових систем зв'язку в цілому [2].

1.2 Принцип роботи прийомопередавачів з використанням технології SDR

Загальні технічні характеристики прийомопередавачів з використанням технології SDR залежать не лише від програмного забезпечення, але й від роботи апаратної частини радіосистеми.

На відміну від традиційних радіосистем основну обробку радіочастотного сигналу в SDR-системі, а саме генерування сигналу основної смуги пропускання, генерування сигналів проміжної (ПЧ) та високої частоти (ВЧ), вибірка і демодуляція прийнятого радіочастотного сигналу (РЧ) чи ПЧ, вибірка та

декодування сигналу основної смуги частот – реалізовано і виконано програмно з використанням цифрової обробки сигналів (ЦОС).

Апаратна частина програмно-визначуваних систем складається з послідовно з'єднаних антенно-фідерного тракту, радіочастотних перетворювачів, широкосмугових аналого-цифрового/цифро-аналогового перетворювачів (АЦП/ЦАП) та цифрового сигнального процесору (ЦСП).

Антенно-фідерний тракт відповідає за приймання/передавання сигналів та містить антену різного ступеня складності конструкції: дипольна, багатодіапазонна, з фазованою решіткою і тд.

Для коректної роботи SDR-системи не можливо підключити одразу АЦП/ЦАП до антени, тому для перетворення вхідного сигналу застосовують вхідний фільтр (ВхФ) для виділення основної смуги частот, підсилювачі високої частоти (ПВЧ), змішувачі (Зм), фільтри проміжної частоти (ФПЧ), підсилювачі проміжної частоти (ППЧ), смугові фільтри (СФ), синтезатори частоти (СЧ) чи гетеродин. Детальніше функції елементів приймального та передавального тракту розглянуто на прикладі структурних схем прийомопередавачів з ЦОС в тракті проміжної частоти та з цифровою обробкою сигналів і прямим перетворенням частоти в приймальному тракті в пункті 1.3.

Важливою характеристикою SDR-системи є чутливість, що залежить від структури приймальної частини радіосистеми. В більшості випадків чутливість системи визначається відношенням сигнал/шум (SNR) аналого-цифрового перетворювача та має одиниці вимірювання дБс (відношення сигналу до рівня шуму відносно носійної частоти) або дБFS (відношення сигналу до рівня шуму відносно повної шкали вхідного сигналу АЦП). Як правило чутливість визначають при двох граничних вхідних умовах: сигнал найменшого рівня, який може бути прийнятий за відсутності будь-яких сигналів завади, та сигнал найменшого рівня, що прийнятий за умови сильних завад в сусідніх каналах. Дані два випадки можливо розглядати як блокуючий і неблокуючий режими.

Рівень шуму АЦП визначається такими параметрами: відношенням сигнал/шум (SNR), динамічним діапазоном без паразитних складових (SFDR),

ефективним числом біт (ENOB). SNR вимірюють на вхідному однотональному сигналі і визначають як відношення потужності даного сигналу до суми потужностей сигналів всієї смуги Найквіста за виключенням гармоніки вхідного сигналу. Значення SFDR отримують аналогічно з використанням однотонального сигналу, що визначають як відношення потужності цього сигналу до наступної найбільшої паразитної складової на смузі Найквіста. ENOB визначають співвідношенням однотонального синусоїдального сигналу до суми потужностей сигналів на всій смузі Найквіста. Таким чином ENOB є поєднанням SNR та SFDR в одному параметрі [3].

Перевагою SDR-систем є можливість працювати та приймати сигнали в більш широкому діапазоні частот, ніж в традиційних радіосистемах, без необхідності внесення змін в апаратну частину. Наприклад стандарт цифрового мобільного зв'язку GSM підтримує роботу на частотах 400 МГц, 850 МГц, 1800 МГц, 1900 МГц та від 2500 МГц до 2690 МГц, а стандарт безпроводового зв'язку WiMAX – від 2500 МГц до 3500 МГц.

Радіочастотний діапазон має високі частоти так і дуже високі частоти тому частота дискретизації АЦП є критично важливою характеристикою і повинна бути достатньо високою, щоб забезпечити задовільне відношення сигнал/шум.

Вимоги до широкої смуги пропускання є ключовими і для передавальної частини радіосистеми. Оскільки вартість підсилювача потужності (ПП) пропорційна його вихідній потужності, головним способом зменшення загальної кількості комплектуючих є збільшення ефективності роботи підсилювача потужності. Сучасні цифрові алгоритми корекції попередніх спотворень, які лінеаризують характеристику підсилювача потужності передавача, полягають у використанні зворотного зв'язку з цифровим процесором (ЦП). Цифровий процесор обробляє оцифровані дані в смузі частот, ширина якої в значно більше смуги сигналу передавання. Таким чином необхідно, щоб оцифрування сигналів аналого-цифровим перетворювачем відбувалося на дуже високій частоті [4].

Наступними важливими елементами системи SDR є цифровий сигнальний процесор (ЦСП) та програмована логічна інтегральна схема (ПЛІС). Традиційно

ЦСП використовували для виконання функцій перед-модуляційної обробки і обробки сигналу після детектування (в приймачі). Однак останнім часом ЦСП знайшли застосування в трансиверах з розширеними комунікаційними можливостями для детектування, корекції, демодуляції, синтезу частот і фільтрації каналів. Перетворення Фур'є – одна з найбільш поширених функцій ЦСП, а також швидке перетворення Фур'є.

Використання сучасних ПЛІС надає можливість реалізувати систему SDR на одному кристалі та дозволяють поєднати різні програмовані блоки обробки на одному кристалі, що в кінцевому результаті призводить до збільшення кількості одночасно обслуговуваних радіоканалів.

Досягти швидкодії програмно-визначуваної системи можливо поєднавши ЦСП та ПЛІС. ПЛІС здатна виконувати практично необмежену кількість математичних операцій, на відміну від ЦСП, що може обчислити до чотирьох операцій [5].

1.3 Структурні схеми прийомопередавачів для системи SDR

В програмно-визначуваних системах використовують прийомопередавачі двох типів: супергетеродинні (з однократним та багатократним перетворенням частоти) і прямого перетворення. В залежності від частоти та ширини спектру цифрова обробка сигналу може відбуватися на радіочастоті або після перенесення сигналу на фіксовану проміжну частоту – обробка на ПЧ.

Прийомопередавачі з цифровою обробкою сигналу на проміжній частоті відносяться до супергетеродинного типу та мають ряд переваг перед прийомопередавачами прямого перетворення – можливість працювати в більшому діапазоні частот, хороша селективність і чутливість у всьому діапазоні. Недоліком супергетеродинних прийомопередавачів є відносно високе енергоспоживання, великі розміри завдяки використанню аналогових елементів та наявність завади у зеркальному каналі, послаблення якої можливо досягти підсиленням ПЧ.

До переваг прийомопередавачів прямого перетворення можна віднести низьке енергоспоживання і можливість розміщення всіх елементів в невеликій портативній радіосистемі (в корпусі однієї мікросхеми), однак по вибірковості, чутливості і динамічному діапазону даний тип поступається супергетеродинним прийомопередавачам.

Структурна схема прийомопередавача побудованого за принципом супергетеродина з однократним перетворенням частоти наведена на рис. 1.1.

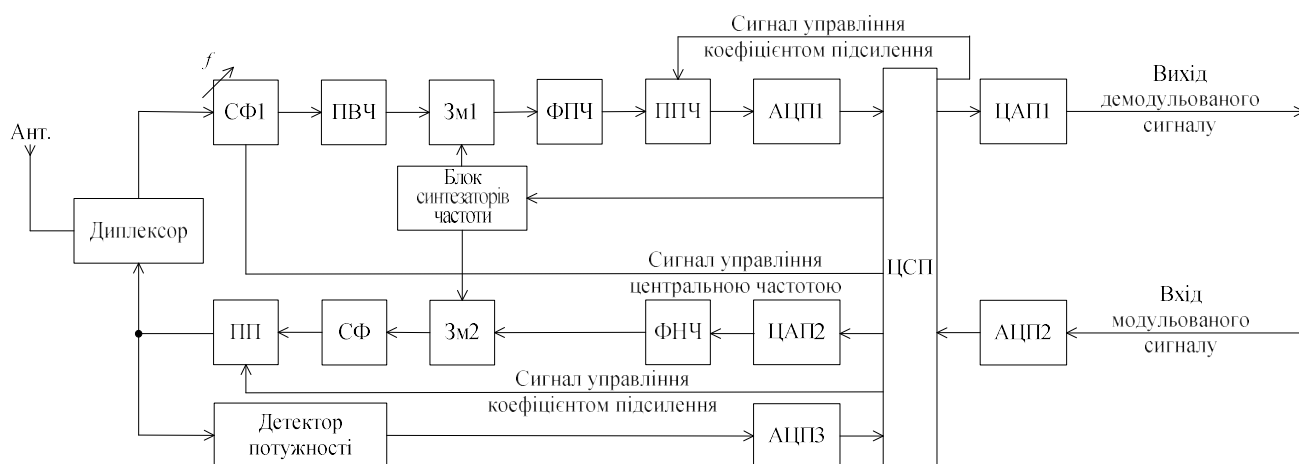


Рисунок 1.1 – Структурна схема прийомопередавача з ЦОС в тракті проміжної частоти

В наведеній схемі вхідний сигнал з антени проходить через диплексор, смуговий фільтр (СФ) та потрапляє на підсилювач високої частоти (ПВЧ). На перший вхід змішувача (Зм1) надходить сигнал з виходу ПВЧ, на другий – сигнал носійної частоти, сформований блоком синтезаторів частоти. Отримані на виході Зм1 дві бічні смуги синтезатора та прийнятого сигналу через фільтр проміжної частоти (ФПЧ) та підсилювач проміжної частоти (ППЧ) надходять на вхід АЦП1. Сигнал управління коефіцієнтом підсилення ППЧ регулюється напругою, що сформована на виході цифрового сигнального процесора ЦСП системою автоматичного регулювання підсилення (АРП). Цифровий код з виходу АЦП1 надходить до ЦСП, що здійснює демодуляцію, фільтрацію, підсилення сигналів, формування сигналів автоматичного регулювання підсилення та управління

центральною частотою блоку синтезатора. Сформований ЦСП сигнал через цифро-аналоговий перетворювач надходить на вихід приймача.

В передавальній частині модульований сигнал через АЦП2 надходить до ЦСП, що відповідає за контроль вихідної потужності передавача та управління частотою носійного коливання. ЦАП2 перетворює цифровий сигнал, отриманий з виходу ЦСП, в аналоговий, який потім проходить через ФНЧ та надходить на перший вхід змішувача Зм2. На другий вхід змішувача поступає сигнал носійної частоти передавача. Смуговий фільтр виділяє необхідну бічну смугу частот. Отриманий високочастотний сигнал через підсилювач (ПП) потрапляє до дуплексору і потім до антени.

Контроль випромінюваної потужності виконує детектор потужності, що формує на виході напругу, пропорційну середньоквадратичному значенню потужності на виході ПП. З виходу детектора потужності напруга через АЦП3 надходить до ЦСП, що керує коефіцієнтом підсилення ПП.

Структурна схема прийомопередавача з прямим перетворенням наведена на рис. 1.2.

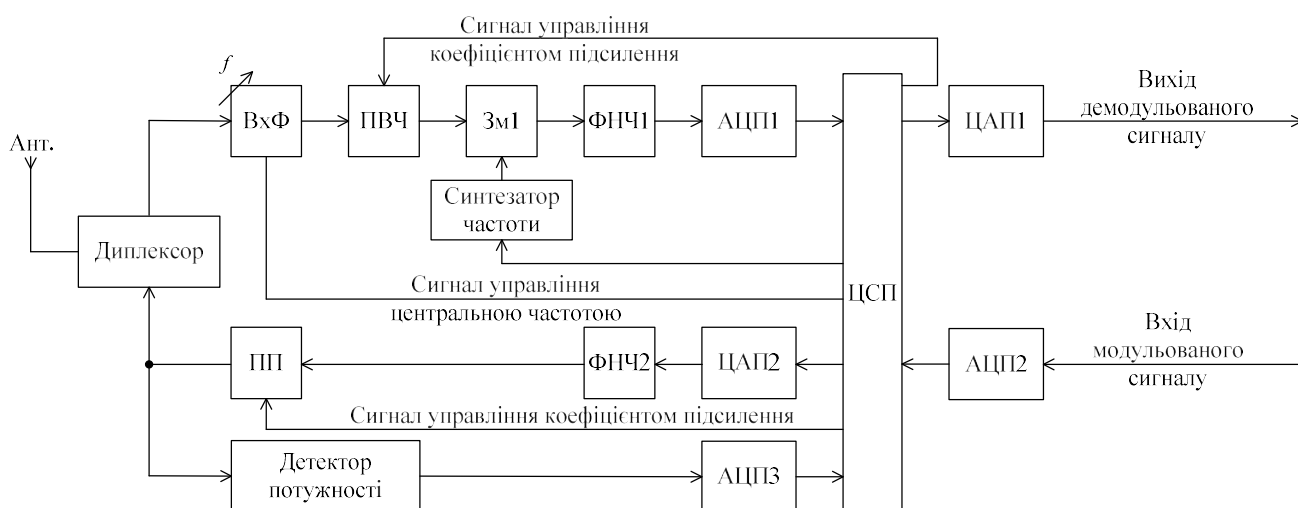


Рисунок 1.2 – Структурна схема прийомопередавача з ЦОС і прямим перетворенням частоти в приймальному тракті

Загалом структурна схема прийомопередавача з прямим перетворення та схема з ЦОС в тракті проміжної частоти є схожими за будовою.

Відмінністю є відсутність в приймальній частині трансивера ФПЧ та ППЧ. Якщо носійна частота прийнятого сигналу відповідає значенню частоти сигналу синтезатора, то на виході Зм1 буде сформовано сигнал в низькочастотній області спектру. При порушенні умови $f_0 = f_r$ в спектрі з'являться спектральні складові, відбиті від початку координат. Примання сигналів за виконанням даної умови стає неможливим. Однак в кращому випадку низькочастотний сигнал з виходу Зм1 може бути підданий амплітудній модуляції з частотою, що дорівнює різниці частот синтезатора частоти та вхідного сигналу.

В передавальному тракті високочастотний сигнал формується ЦСП та через ЦАП2, ФНЧ2 і ПП надходить до диплексору та антени.

Розглянемо структурну схему трансивера ADF7023 компанії Analog Devices з ЦОС в тракті проміжної частоти, що може бути використана для побудови програмно-визначуваних радіосистем.

Структурна схема прийомопередавача ADF7023 наведена на рис. 1.3.

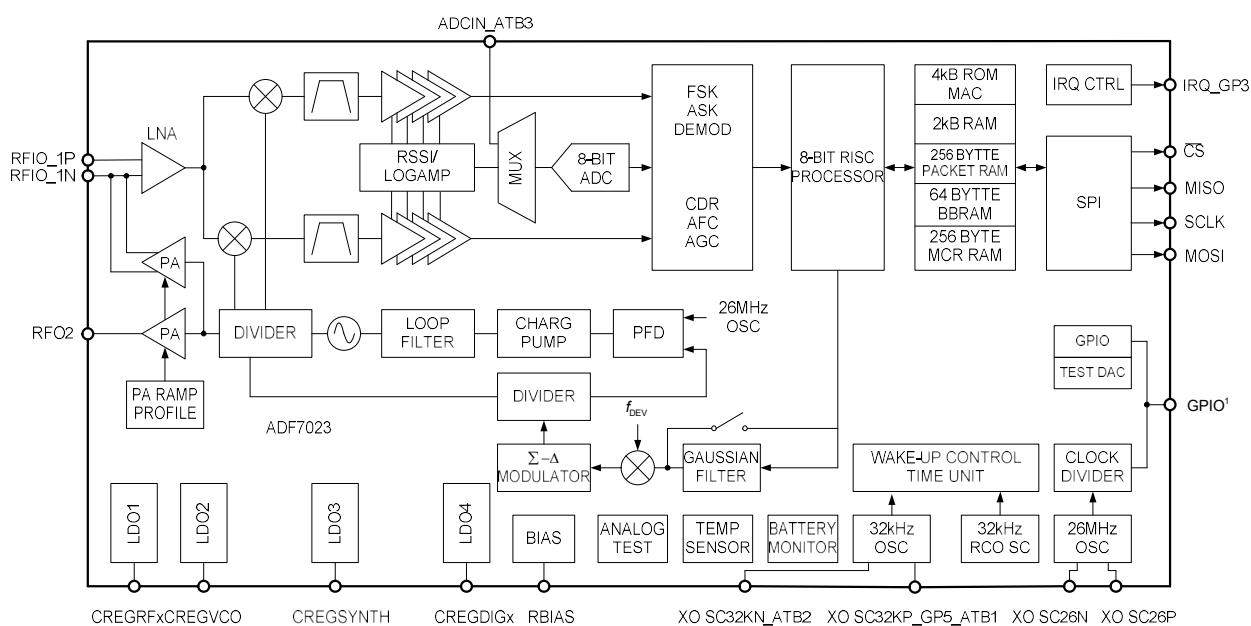


Рисунок 1.3 – Структурна схема прийомопередавача ADF7023 Analog Devices з цифровою обробкою сигналів

ADF7023 – це високоінтегрований трансивер з малим енергоспоживанням, що призначений для роботи в ISM-діапазонах частот 431...464 МГц та 862...928. Прийомопередавач забезпечує формування сигналів з класичною частотною маніпуляцією – 2FSK (Frequency Shift Keying), ЧМн з фільтром Гауса для згладжування частотних перебудов при зміні значення інформаційного символу – GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying), амплітудною маніпуляцією ввімкнено-вимкнено – OOK (On-Off Keying), ЧМн з мінімальним зсувом частоти або гаусівською двохпозиційною MSK/GMSK (Minimal Shift Keying/ Gaussian Minimum Shift Keying).

Трансивер ADF7023 використовують при побудові інтелектуальних лічильників, домашньої автоматизації, безпроводових сенсорних мереж WSN (Wireless sensor networks), європейському стандарті Wireless M-Bus для побудови систем комерційного обліку витрат енергоресурсів, а також при управлінні технологічними процесами в промисловості та будівництві.

Постійне збільшення зайнятого радіочастотного спектру ускладнює обробку сигналів. Високоєфективний прийомопередавач ADRV9002 компанії Analog Devices може правильно декодувати сигнали навіть в сильно перевантаженому спектрі [6].

ADRV9002 – це високоінтегрований високочастотний (ВЧ) трансивер, що складається зі здвоєних передавачів та приймачів з інтегрованими синтезаторами частот і функціями цифрової обробки сигналів. Трансивер підтримує всі існуючі стандарти стільникового зв'язку 2G/3G/4G/5G. Здатність працювати в діапазоні частот від 75 МГц до 6 ГГц надає виробникам обладнання мобільного зв'язку використовувати одну компактну мікросхему в пристроях, що працюють в різних смугах частот та з різною потужністю.

Приймальний тракт трансивера складається з двох незалежних широкосмугових приймачів прямого перетворення з найкращим динамічним діапазоном. Пристрій також має широкосмуговий приймач спостереження (ORx), що працює в режимі поділу часу, який необхідний в додатках TDD. Повна підсистема приймача включає в себе автоматичне та ручне регулювання

ослаблення, корекцію зміщення, корекцію квадратурних помилок (QEC) та цифрову фільтрацію, що усуває необхідність використання цих функцій в комунікаційному процесорі.

Структурна схема прийомопередавача ADRV9002 наведена на рис. 1.4.

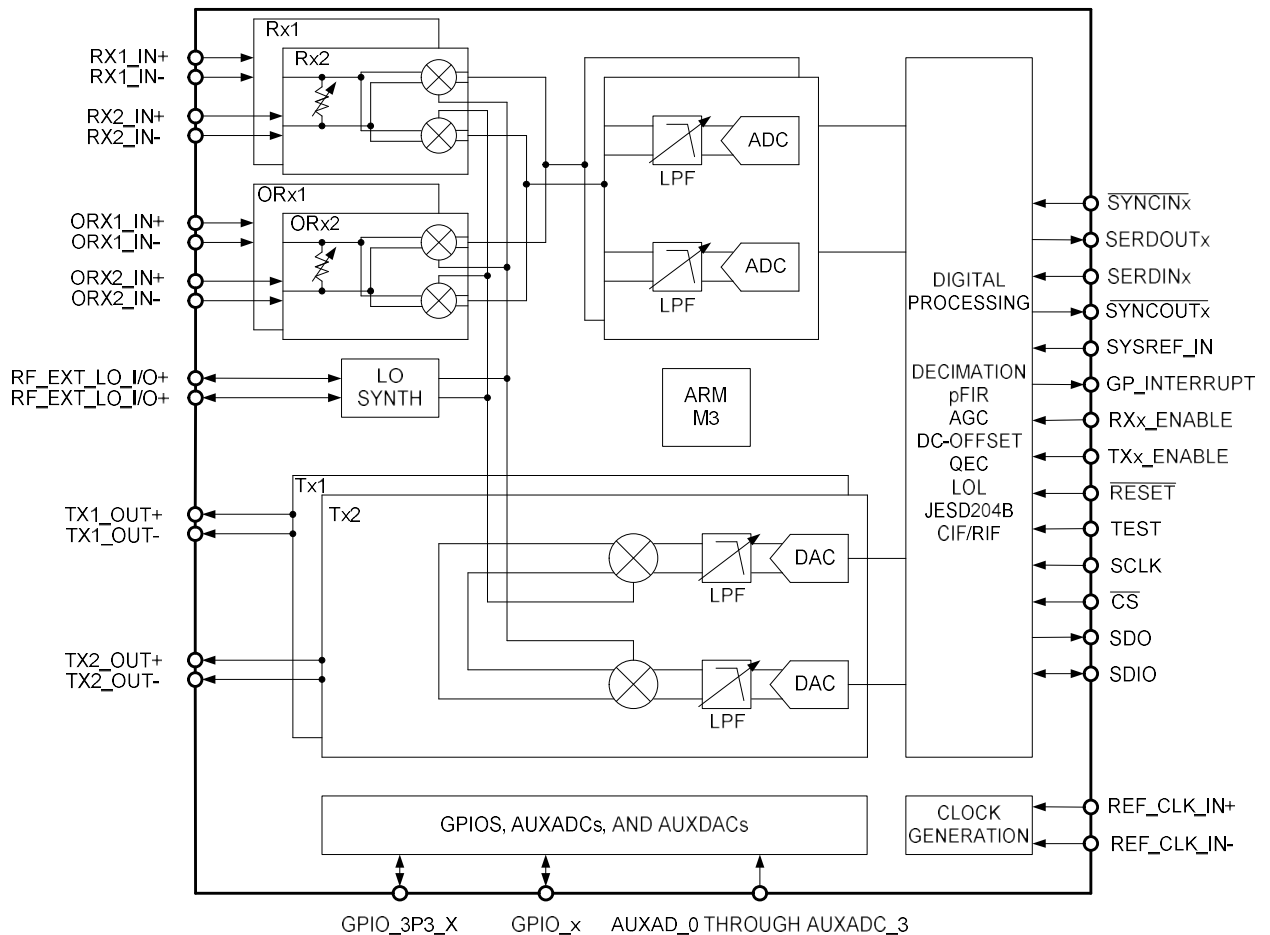


Рисунок 1.4 – Структурна схема прийомопередавача ADRV9002 Analog Devices

Також інтегровано кілька додаткових функцій, такі як аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) і вводи/виводи загального призначення (GPIO) для керування підсилювачем потужності та ВЧ інтерфейсом.

На додаток до автоматичного регулювання підсилення (APU) ADRV9009 також має зовнішні режими регулювання підсилення, що дозволяє істотно підвищити гнучкість в налаштуванні динамічного підсилення системи.

Прийняті сигнали оцифровуються за допомогою набору з чотирьох сигма-дельта АЦП з високим динамічним діапазоном, які забезпечують усунення ефекту накладання спектрів. Поєднання архітектури прямого перетворення, яка не чутлива до позасмугового змішування сигналів, і відсутність гармонік накладання спектру знижують вимоги до ВЧ фільтрів в порівнянні з традиційними приймачами проміжної частоти (ПЧ).

Передавачі трансивера мають інноваційний модулятор прямого перетворення, що забезпечує високу точність модуляції і виключно низький рівень шуму. Тракт приймача спостереження складається з широкосмугового приймача прямого перетворення з найкращим динамічним діапазоном.

Повністю інтегрована малоспоживча система фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ) з дробовим коефіцієнтом ділення забезпечує високоякісний синтез ВЧ сигналу для трактів передавача (Tx) та приймача (Rx). Додатковий синтезатор генерує тактові імпульси, необхідні для перетворювачів, цифрових схем і послідовного інтерфейсу. Механізм міжкристальної синхронізації синхронізує фази ВЧ гетеродина і тактовий генератор модулюючих частот між декількома чіпами ADRV9009. Прийнято необхідні запобіжні заходи для забезпечення ізоляції, що необхідна в додатках високоякісних базових станцій. Всі генератори керовані напругою (ГУН) та компоненти петлевого фільтру інтегровані.

Швидкодіючий інтерфейс JESD204B підтримує швидкість лінії до 12,288 Гб/с та надає можливість використання двох ліній інтерфейсу на передавач і одну лінію на приймач в режимі найширшої смуги пропускання. В трансивері підтримуються формати даних як з фіксованою, так і з плаваючою комою. Формат даних з плаваючою комою дозволяє внутрішній схемі АРУ бути невидимою для демодулятора.

Живлення ядра ADRV9009 відбувається безпосередньо від регуляторів напруги 1,3 В та 1,8 В і може керуватися через стандартний 4-дротовий послідовний інтерфейс. Для мінімізації енергоспоживання в нормальному режимі роботи передбачено різні режими зниженого енергоспоживання.

Високоєфективний РЧ прийомопередавач ADRV9002 відповідає високим вимогам широкосмугових, так і вузькосмугових додатків, ідеально підходить для побудови критично важливих систем зв'язку, засобів радіотехнічної розвідки, супутникового зв'язку, аерокосмічних та оборонних систем, де головними умовами проектування є розмір, вага та потужність. Нова платформа трансивера забезпечує швидку стрибкоподібну перебудову частоти для підвищення безпеки зв'язку і збільшення ефективності використання спектру [7].

1.4 Основні вимоги до приймально-передавальних трактів SDR-пристроїв

Програмно-визначувані системи можуть працювати в діапазонах високих частот (ВЧ), дуже високих частот (ДВЧ), ультрависоких частот (УВЧ) також на частоті 2,4 ГГц, що широко використовується для безпроводових додатків: Wi-Fi, IoT, Bluetooth і тд. Деякі SDR-системи займають смуги, раніше використовувані станціями наземного радіомовлення. Відповідно прийомопередавання радіосигналів на перерахованих діапазонах частот підвищує ймовірність виникнення завад та в загальному нестабільність роботи програмно-визначуваної системи. Ефективне використання радіочастотного спектру та перемикання на вільний частотний діапазон забезпечує більш надійне передавання даних і управління зв'язком. Адаптивний вибір носійної частоти або каналу в робочому режимі – одна з переваг програмно-визначуваних радіосистем.

Оскільки кожний із блоків в приймальній частині в деякій мірі підсилює сигнал (або вносить в нього втрати), канал прийому сигналів характеризується розподіленним коефіцієнтом підсилення. Необхідно враховувати декілька факторів, що впливають на розподіл коефіцієнта підсилення у вхідній радіочастотній частині, каскадів підсилення проміжної частоти (ПЧ) і каскадів основної смуги частот. У багатьох випадках потрібно, щоб передавання сигналу сигналу у всій системі здійснювалася лінійно в широкому діапазоні умов експлуатації, включаючи рівень сигналу, наявність завад і зміна температури

навколишнього середовища. Основною характеристикою приймального тракту є чутливість приймача, що визначається мінімальним рівнем вхідного сигналу, який необхідний для демодуляції або відновлення інформації від передавача.

В передавальній частині відбувається модуляція, перетворення з підвищенням частоти та підсиленням потужності сигналу. Реалізація передавача потребує врахування особливостей типів модуляцій, що залежить від вибору таких елементів, як змішувачі з підвищуючим перетворенням, генератори та підсилювачі потужності ПП.

Підсилювач потужності є важливим елементом прийомопередавача, оскільки забезпечує задані технічні характеристики, надійність та загальну вартість системи. При проектуванні ПП для передавальної частини необхідно враховувати фактори, що впливають на характеристики мікросхеми ПП: вибір оптимальної напівпровідникової технології, точність моделей транзисторних пристроїв, особливості корпусу та тепловідведення [8].

Змішувач здійснює перетворення частоти та виконує дві головні функції:

- перетворення частоти радіосигналу в проміжну частоту (ПЧ або в частоту основної смуги) для подальшої обробки в приймачі;
- перетворення сигналу основної смуги або сигналу проміжної частоти в більш високу або в носійну частоту для подальшого передавання.

Також використання змішувачів дозволяє видалити побічні частоти в передавачі та небажані ефекти перетворення в приймачі.

Гетеродин застосовують у всіх приймально-передавальних пристроях безпроводових систем. Підсилювач гетеродина функціонує за умови, якщо його тракт зворотнього зв'язку (ЗЗ) відповідає двом умовам – балансу амплітуд та балансу фаз. Умова балансу амплітуд – підсилення перевищує втрати в схемі ЗЗ. Умова балансу фаз – генерація коливань відбувається, якщо фаза вихідної напруги кола ЗЗ і вхідної напруги співпадають.

В сучасних прийомопередавачах гетеродин повинен перелаштовуватися в заданому діапазоні частот, що визначається системою. З цією метою

використовують генератор керований напругою (ГКН) з програмно-керованою фазовою автопідстройкою частоти (ФАПЧ).

Напруга вхідних сигналів приймача може значно змінюватися через розходження потужностей передавачів, згасання сигналів при передаванні, різкої зміни відстаней і умов прийому між передавачем і приймачем, встановленими на рухомих об'єктах (літаках, автомобілях і т.д.), та інші причини. Ці зміни призводять до неприпустимих коливань або спотворень сигналів в приймачі. Система автоматичного регулювання підсилення (АРП) забезпечує підтримання на виході останнього підсилювача проміжної частоти (на вході детектора) рівня сигналу, досить високого і стабільного для відтворення повідомлень від радіостанцій різної потужності, що знаходяться на різних відстанях і в мінливих умовах поширення радіохвиль.

Регулювання підсилення допомагає завадити перевантаженню каскадів потужними компонентами, а також виділити слабкі компоненти, підвищуючи рівень сигналу, тим самим роблячи його більш придатним до оцифрування АЦП.

Отже складність реалізації схеми приймально-перевального тракту прийомопередавачів з використанням технології SDR залежить від частоти прийнятого сигналу, виду модуляції, наявності завад в робочому частотному діапазоні системи.

Відповідно важливою є чутливість та вибірковість приймача. Для регулювання чутливості в професійних радіосистемах, як правило для ВЧ діапазону, на вході встановлюють атенюатор. Зменшуючи коефіцієнт передавання атенюатора при дії окремих потужних зосереджених перешкод або групового радіосигналу великої потужності, можна значно підвищити багатосигнальну вибірковість приймача та завадозахищеність його ВЧ тракту за рахунок пропорційного зменшення інтенсивності шумів нелінійного походження.

Досягти необхідного рівня підсилення сигналу в передавальному тракті можливо завдяки використанню ПП.

Цифрове автоматичне регулювання підсилення спрощує розробку прийомопередавачів програмно-визначуваних систем та забезпечує допустимий рівень вихідного сигналу приймача за значної зміни рівня вхідного сигналу [9].

Висновки до розділу

В приймально-передавальних пристроях із застосуванням технології SDR більшість складних аналогових процесів замінено цифровою обробкою сигналів. Використання програмного забезпечення дозволяє встановлювати/змінювати робочі вхідні параметри: форму сигналу, потужність, чутливість приймача, метод модуляції/демодуляції, діапазон частот, без зміни апаратної частини радіосистеми.

Перевагою програмно-визначених радіосистем є можливість підтримки декількох стандартів зв'язку на одній апаратній платформі, багатофункціональність, адаптивне використання спектру, зменшення вартості та часу на проектування систем.

В системах SDR використовують прийомопередавачі двох типів: супергетеродинні і прямого перетворення. Супергетеродинний тип на відміну від трансиверів прямого перетворення, може працювати в більшому діапазоні частот, має кращу селективність та чутливість. Прийомопередавачі прямого перетворення простіше в реалізації та характеризуються низьким енергоспоживанням.

Оскільки радіочастотний спектр має дуже високі частоти відповідно і частота дискретизації АЦП повинна бути достатньо високою, щоб забезпечити задовільне відношення сигнал/шум. ЦСП може виконувати основні складні функції: детектування, перетворення Фур'є, корекцію, демодуляцію, синтез частот та фільтрацію каналів. Досягти швидкодії програмно-визначуваної системи можливо поєднавши ЦСП та ПЛІС.

Використання високоінтегрованих трансиверів з можливістю роботи в широкому діапазоні частот, низьким енергоспоживанням, сприяло розвитку програмно-визначуваних радіосистем спеціального зв'язку, супутникових комунікацій, додатків Інтернету речей та телекомунікаційних систем.

2 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ПРИЙОМОПЕРЕДАВАЧА

2.1 Структурна схема прийомопередавача

Розвиток безпроводових технологій призвів до необхідності пошуку методів збільшення швидкості передавання та об'ємів інформації для забезпечення високої ефективності роботи радіосистеми за низького рівня споживання енергії.

Використання модульного підходу спрощує побудову радіоканалів, надає можливість повторного використання блоків та аналіз характеристик радіосистеми на ранніх етапах проектування.

Для побудови портативного приймально-передавального пристрою із застосуванням технології SDR обрано однокристальний трансивер ADF7023 Analog Devices. Прийомопередавач ADF7023 забезпечує роботу в ISM-діпазонах частот 862 МГц – 928 МГц та 431 МГц – 464 МГц та може бути використаний для реалізації зв'язку на підприємстві з площею до 1000 м² згідно технічного завдання.

Структурна схема прийомопередавача з використанням мікросхеми вкоінтегрованого трансивера ADF7023 Analog Devices наведена на рис. 2.1.

Прийнятий сигнал з антени надходить на дуплексор, що забезпечує повний дуплексний режим. Потім сигнал надходить до трансивера ADF7023, який виконує основну обробку сигналу: виділення необхідної смуги частот, автоматичне регулювання частоти, підсилення сигналу, перетворення аналогового сигналу в цифровий та модуляцію/демодуляцію. Детальніше принцип роботи каскадів прийомопередавача ADF7023 наведено в пункті 2.2.

Отриманий сигнал з виходу мікросхеми трансивера потрапляє до модулю цифрової обробки – центрального процесора (CPU), а потім на гучномовець, попередньо пройшовши ЦАП1, відсіювання вищих гармонік звукового сигналу фільтром нижніх частот (ФНЧ) та підсилення підсилювачем потужності (ПП).

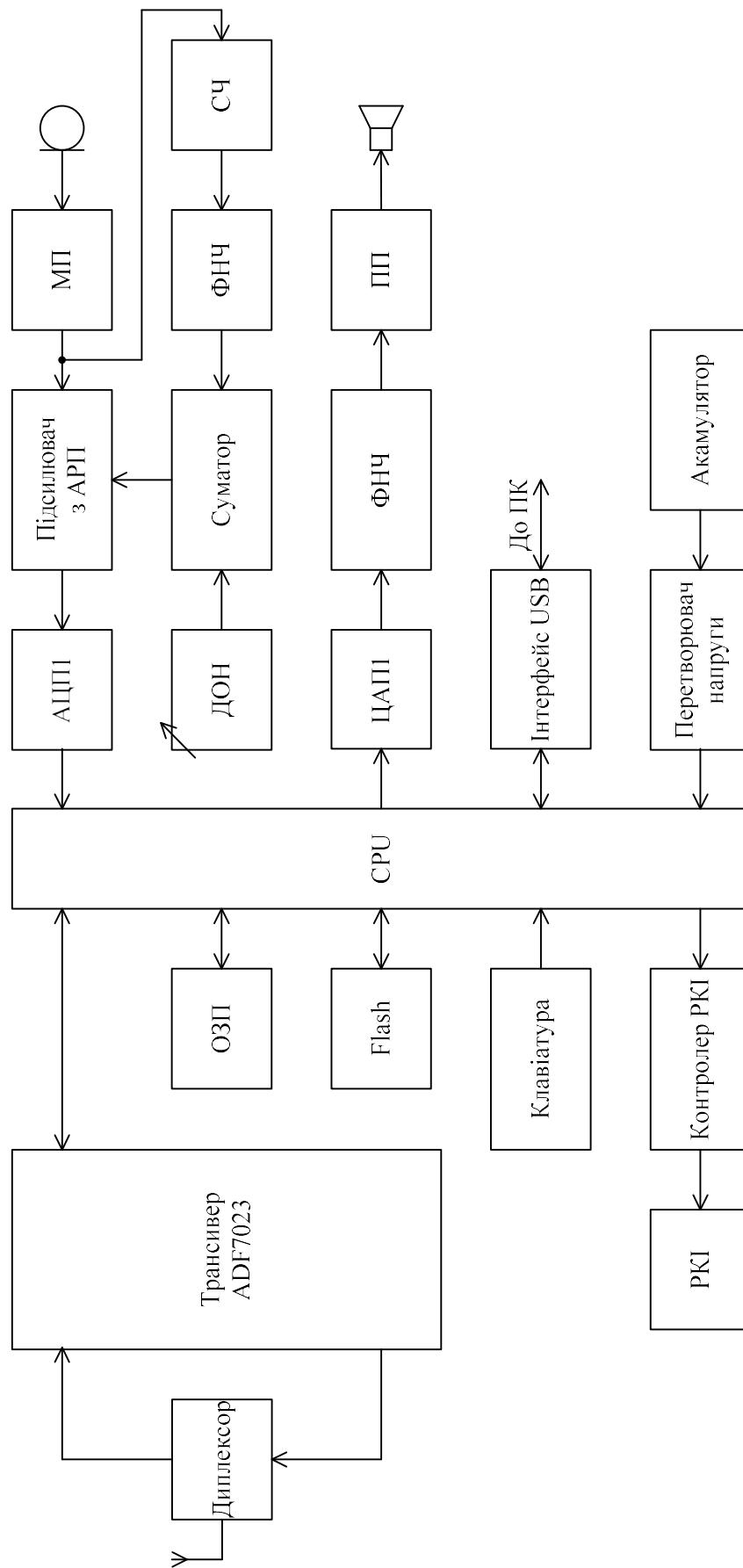


Рисунок 2.1 – Структурна схема прийомопередавача

В режимі передавання сигнал з мікрофону (МК) надходить через підсилювач з низьким рівнем шуму з системою автоматичного регулювання підсилення і АЦП1 до центрального процесора. Трансивер ADF7023 формує сигнал у потрібній області частот та подає його через дуплексор до антени.

До ЦП під'єднанано вузол живлення радіосистеми, що складається з акумулятора та перетворювача напруги, інтерфейс USB для зв'язку з зовнішніми пристроями, оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) та Flash-пам'ять для зберігання програмного забезпечення. Також передбачено пристрої вводу – клавіатура та виводу інформації – контролер рідкокристалічного індикатора (КРІ) та безпосередньо рідкокристалічний індикатор (РІ).

2.2 Функціональна схема прийомопередавача

В функціональній схемі прийомопередавача наведено детальну структуру трансивера ADF7023. Розглянемо процес обробки та перетворення сигналів, що відбуваються в ПЛІС ADF7023.

Функціональна схема прийомопередавача наведена на рис. 2.2.

Трансивер ADF7023 реалізовано за супергетеродинною схемою з ЦОС в тракці проміжної частоти.

Вхідний сигнал через дуплексор і підсилювач з низьким рівнем шуму надходить на входи змішувачів Зм1 та Зм2, на другі входи яких подаються сигнали з виходів синтезатора частоти, зміщені за фазою на 90°. Смугові фільтри СФ1 та СФ2 виділяють сигнали проміжної частоти, які через керовані логарифмічні підсилювачі надходять до блоку обробки сигналів.

Вбудований 8-розрядний АЦП виконує перетворення сигналів, сформованих на виходах логарифмічного підсилювача/RSSI, у цифровий код. За допомогою аналогового комутатора MUX до входу АЦП можна підключити сигнал від вбудованого температурного датчика або зовнішні сигнали.

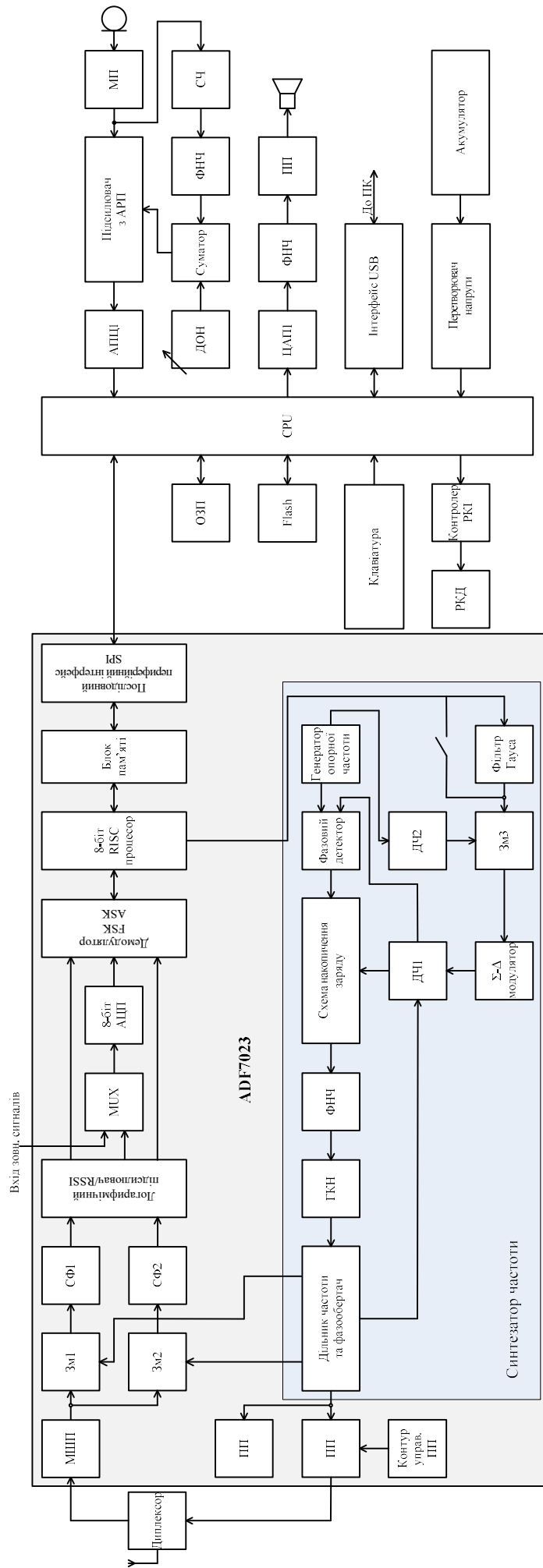


Рисунок 2.2 – Функціональна схема прийомопередавача

Сформований цифровий сигнал надходить на вхід демодулятора сигналів з амплітудною (ASK) та частотною (FSK) маніпуляцією. Демодульовані сигнали обробляються 8-розрядним сигнальним процесором (RISC-процесором).

RISC-процесор виконує функції управління та інтелектуального режиму пробудження (Smart wake mode – SWM) трансивера. Також реалізує функції завантаження і виконання набору програмно-апаратних модулів, що включають шифрування/дешифрування AES (Advanced Encryption Standard) і кодування Ріда-Соломона.

З виходу RISC-процесора сигнал надходить до блоку пам'яті, що зберігає налаштування роботи трансивера, і потім до послідовного периферійного інтерфейсу (SPI), який є шиною для сполучення інтегральної мікросхеми з центральним процесором та периферією. Програмування частоти прийому чи передавання та способу модуляції також здійснюється через інтерфейс SPI.

Вихідний сигнал передавача формується в блоці цифрової обробки сигналів та через передавальний тракт і контур підсилювачів потужності надходить на дуплексор.

Поєднання в високочастотному синтезаторі прийомопередавача генератора керованого напругою (ГКН) і малошумної схеми фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ) із дільником частоти з дробовим коефіцієнтом ділення, керованим сигма-дельта модулятором, надає можливість встановлення частоти вихідного каналу 400 Гц. Для зменшення побічних випромінювань ГКН працює на подвоєній або збільшеній в чотири рази частоті основної гармоніки сигналу. Ширина смуги синтезаторів приймача і передавача автоматично і незалежно конфігурується для досягнення оптимальних показників фазового шуму, якості модуляції і часу встановлення сигналу. Потужність вихідного сигналу передавача програмується в діапазоні від -20 дБм до +13.5дБм з підтримкою автоматичної зміни потужності в підсилювачі потужності (ПП) за лінійним законом для забезпечення вимог до рівня побічних складових при перехідних процесах. Трансивер має два ПП, несиметричний і диференціальний, та підтримує роботу з рознесеними в просторі передавальними антенами.

Висновки до розділу

Для побудови структурної та функціональної схем приймально-передавального пристрою із застосуванням технології SDR було обрано високоінтегрований трансивер ADF7023 компанії Analog Devices, реалізований за супергетеродинним типом з цифровою обробкою сигналу в тракці проміжної частоти. Доступна вартість трансивера ADF7023, низьке енергоспоживання, можливість програмування смуги проміжної частоти та вихідної потужності, зменшують час проектування та спрощують моделювання портативних програмно-визначуваних радіосистем. Для зменшення габаритів портативних радіостанцій доцільно використовувати однокристальні прийомопередавачі.

3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИЙОМОПЕРЕДАВАЧА

3.1 Обґрунтування вибору мікросхеми прийомопередавача

Для вибору трансивера портативного приймально-передавального пристрою із застосуванням технології SDR використано програмний пакет ADIsimSRD Design Studio, призначений для проектування та оптимізації безпроводових систем малого радіуса дії з трансиверами серії ADF70xx компанії Analog Devices [10].

Таблиця 3.1 – Основні характеристики трансиверів серії ADF70xx Analog Devices

Тип	Способи модуляції	Діапазон робочих частот, МГц	Макс. швидкість передав. інформ., кбіт/с	Програмована вихідна потужність, дБм	$I_{\text{спож}}$ ($P_{\text{вих}}=10$ дБм), мА
ADF7012	FSK/GFSK/OOK/GOOK/ASK	75...1000	179	-16...14	21
ADF7020	FSK/ASK	431...478 862...956	200	-16...13	26
ADF7021	2FSK/3FSK/4FSK	80...650 862...950	32	-16...13	29
ADF7022	FSK/GFSK	431...478 862...956	38	-16...13	24
ADF7023	2FSK/GFSK/OOK/MSK/GMSK	862...928 431...464	300	-20...13	24
ADF7024	2FSK/ GFSK	431...435 862...928	300	-20...13	24
ADF7025	FSK	431...464 862...870 902...928	384	-16...13	28
ADF7030	2GFSK/ 4GFSK	169,4...169,6	6	-20...17	61
ADF7030-1	2FSK/4GFSK/ 2GFSK/4FSK	169,4...169,6 426...470 863...960	360	-20...17	50

Проаналізувавши характеристики прийомопередавачів в табл. 3.1 для побудови приймально-передавального пристрою обрано ІМС ADF7023 [11].

Основні характеристики ADF7023:

- напруга живлення від 2,2 до 3,6 В;
- чутливість приймача при швидкості передавання даних:
 - -116 дБм – 1 кбіт/с для 2FSK, GFSK;
 - -107.5 дБм – 38.4 кбіт/с для 2FSK, GFSK;
 - -102.5 дБм – 150 кбіт/с для GFSK, GMSK;
 - -100 дБм – 300 кбіт/с для GFSK, GMSK;
 - -104 дБм – 19.2 кбіт/с для ООК;
- програмована ширина смуги тракту проміжної частоти 100 кГц, 150 кГц, 200 кГц, 300 кГц;
- енергоспоживання:
 - в режимі прийому 12,8 мА;
 - в режимі передавання при вихідній потужності 10 дБм – 24,1 мА;
 - в режимі сну не більше 1 мкА [6].

Початкові параметри прийомопередавача:

- діапазон робочих частот 434 МГц;
- ширина радіоканалу 200 кГц
- швидкість передавання даних 150 кбіт/с;
- тип модуляції FSK;
- коефіцієнт бітових помилок 10^{-3} .
- максимальна девіація частоти 75 кГц.

Спочатку встановлюємо частотний діапазон та ширину смуги радіоканалу у вікні налаштувань частоти прийомопередавача (рис. 3.1).

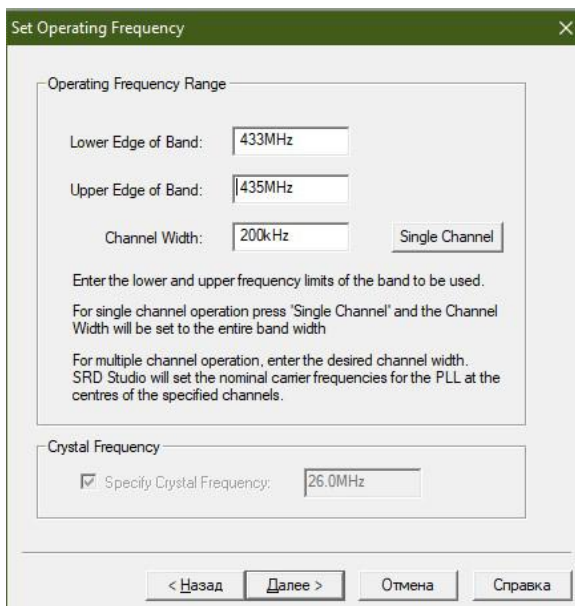


Рисунок 3.1 – Вікно встановлення параметрів частоти прийомопередавача

Обираємо режим роботи трансивера та встановлюємо швидкість передавання інформації (рис. 3.2).

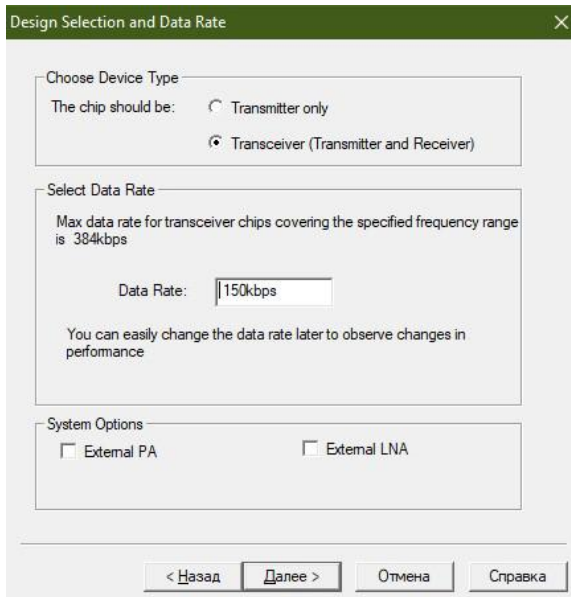


Рисунок 3.2 – Вікно встановлення швидкості та режиму роботи трансивера

Натиснувши "Далі" у вікні (рис. 3.3) з обраною ІМС ADF7023 задаємо тип модуляції та встановлюємо частоту девіації і натискаємо "Готово".

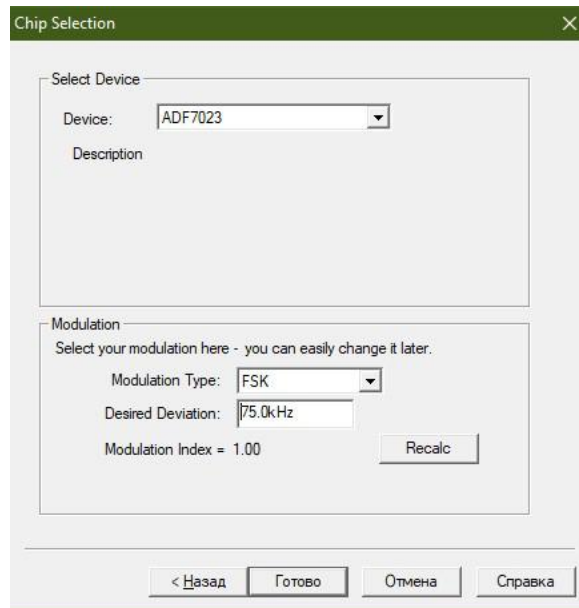


Рисунок 3.3 – Вікно вибору ІМС та встановлення типу модуляції прийомопередавача

Структурну схему прийомопередавача та його характеристики: потужність випромінювання, коефіцієнт підсилення антени, чутливість приймача, дальність зв'язку наведено у вкладці "Link Analysis" (рис. 3.4).

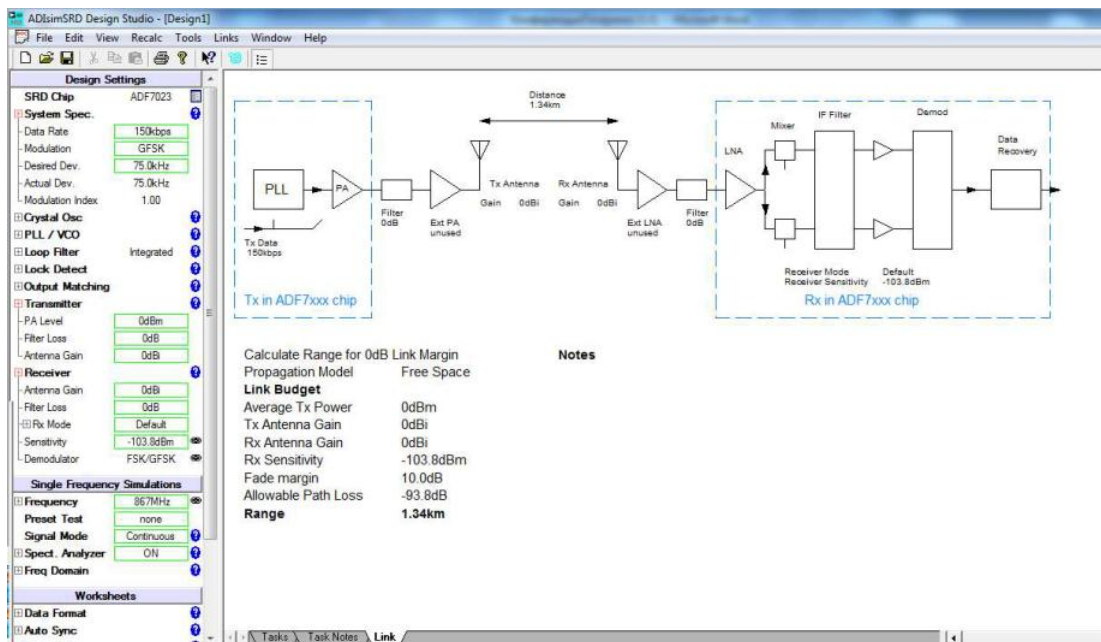


Рисунок 3.4 – Структурна схема та основні характеристики трансивера

Перейшовши на вкладку "Transmitter Spectrum" отримаємо принципову схему включення трансивера ADF7023 (рис. 3.5).

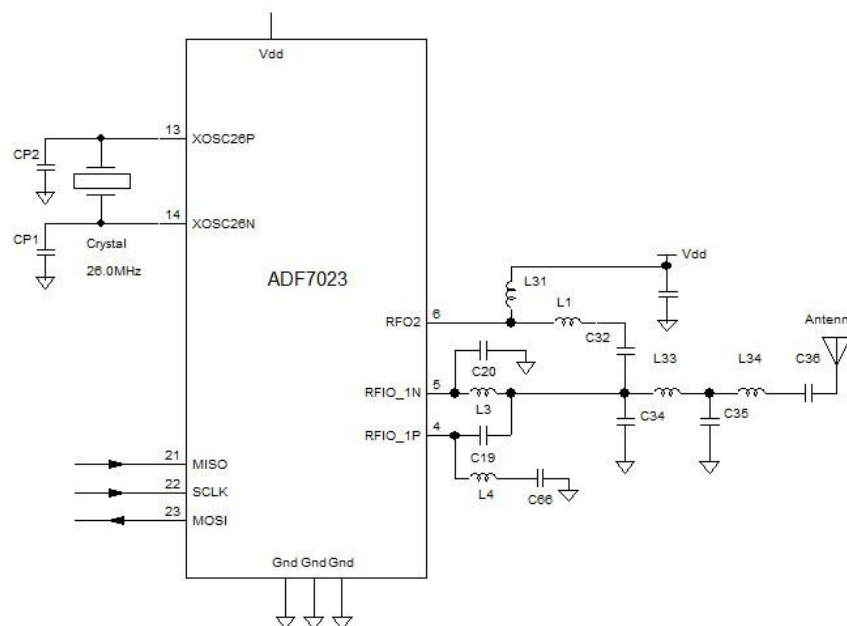


Рисунок 3.5 – Принципова схема включення трансивера

У вкладці "Tx Spectrum" наведено спектр сигналу передавача (рис. 3.6,а) та графік залежності девіації частоти від часу (рис. 3.6,б).

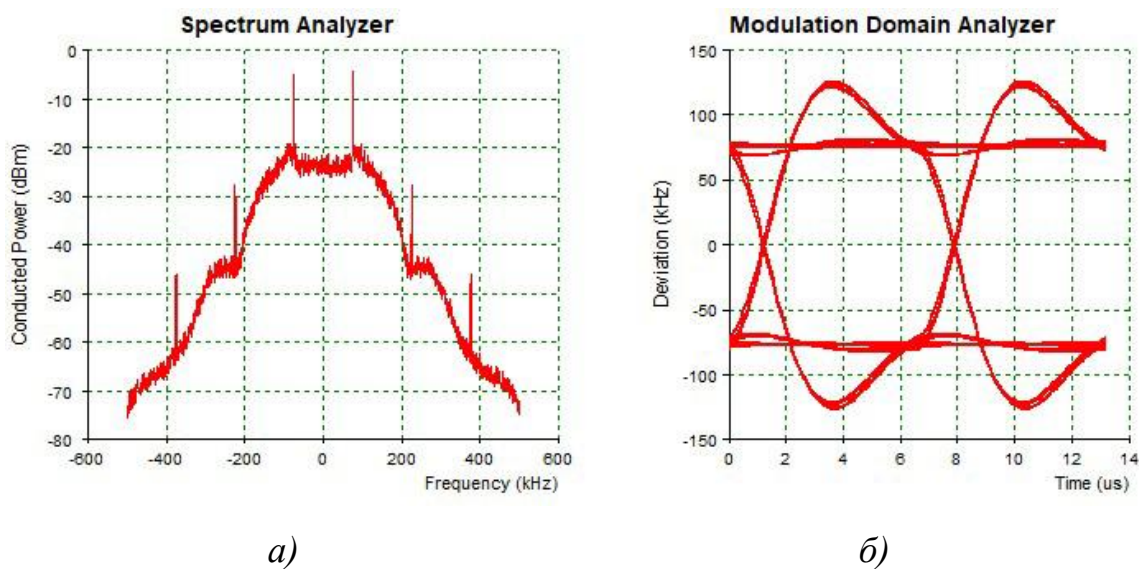


Рисунок 3.6 – Спектр сигналу, що формується на виході передавача (а) та глазкова діаграма сигналу (б)

Характеристики синтезатора частоти вбудованого в ІМС ADF7023 при заданих параметрах системи (рис 3.7).

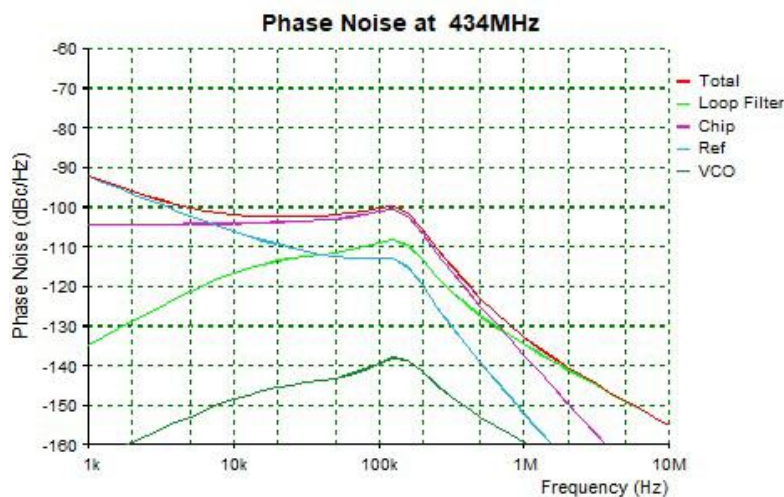


Рисунок 3.7 – Графік спектрального шуму синтезатора трансивера ADF7023

З графіку спектрального шуму вихідного сигналу синтезатора частоти можемо спостерігати, що рівень спектральної щільності шуму у смузі частот 100 кГц відносно центральної частоти не перевищує 95 дБн/Гц і надає можливість передавання даних з високою точністю у часі.

3.2 Моделювання роботи прийомопередавача

Для забезпечення якісного зв'язку необхідно враховувати наявність завад особливо при промисловій забудові та в приміщеннях.

Використання програмного пакету ADIsimSRD Design Studio дозволяє провести моделювання режимів роботи прийомопередавача за різних умов поширення радіохвиль: у вільному просторі, над поверхнею землі, в приміщенні.

Дослідження залежності дальності зв'язку від умов розповсюдження сигналу прийомопередавача ADF7023, зміни потужності передавача, загасання сигналу, проведено за початкових параметрів, що наведені в пункті 3.1.

Розрахунок дальності зв'язку в вільному просторі (рис. 3.8 та рис. 3.9).

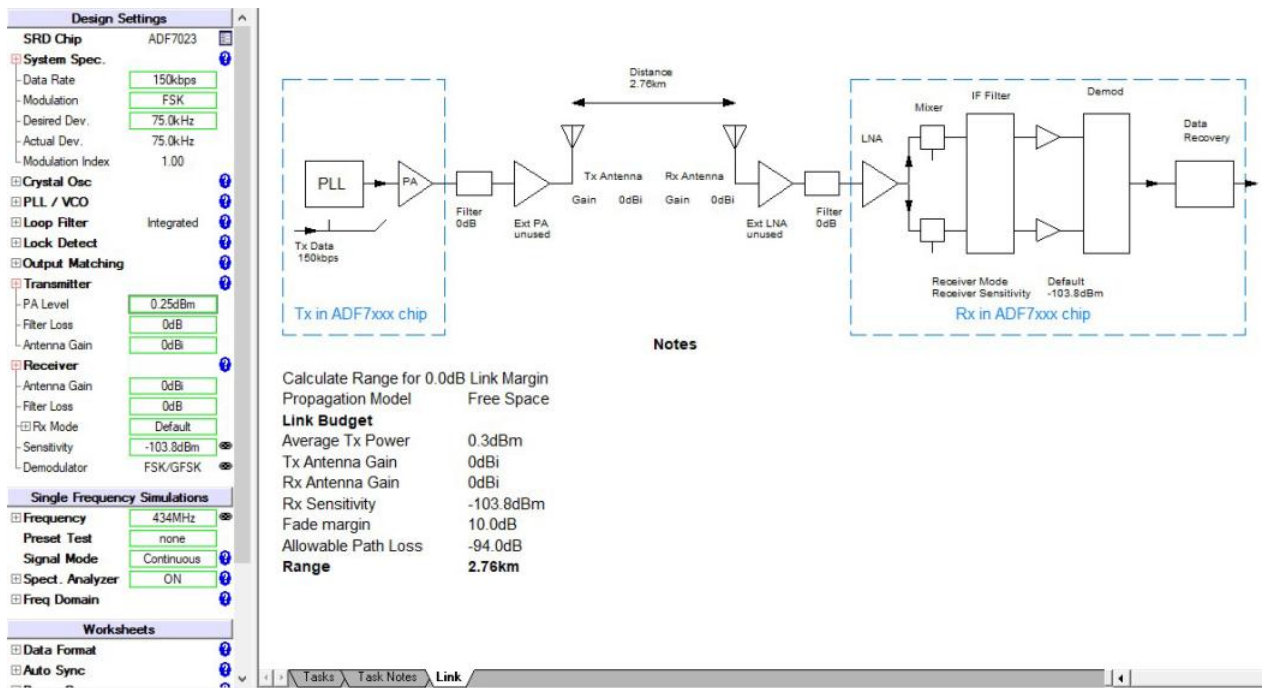


Рисунок 3.8 – Дальність зв'язку 2760 м при значенні потужності 0 дБп у вільному просторі

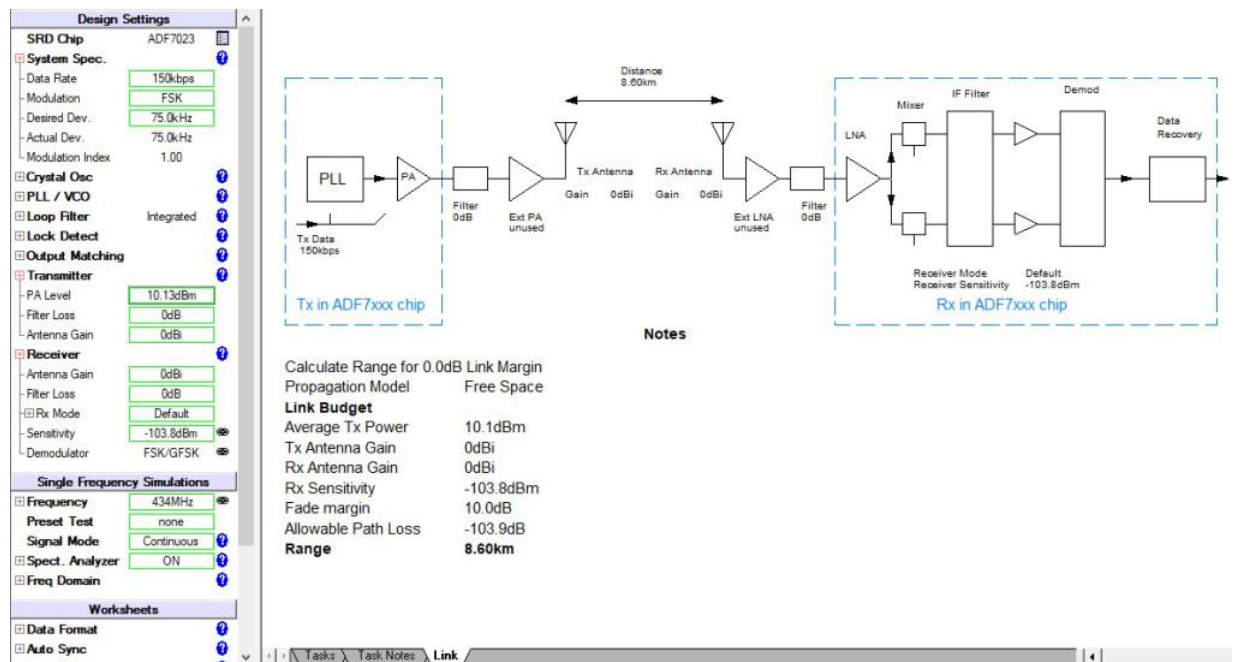


Рисунок 3.9 – Дальність зв'язку 8600 м при значенні потужності 10 дБп у вільному просторі

Розрахунок дальності зв'язку біля поверхні землі (рис. 3.10 та рис. 3.11).

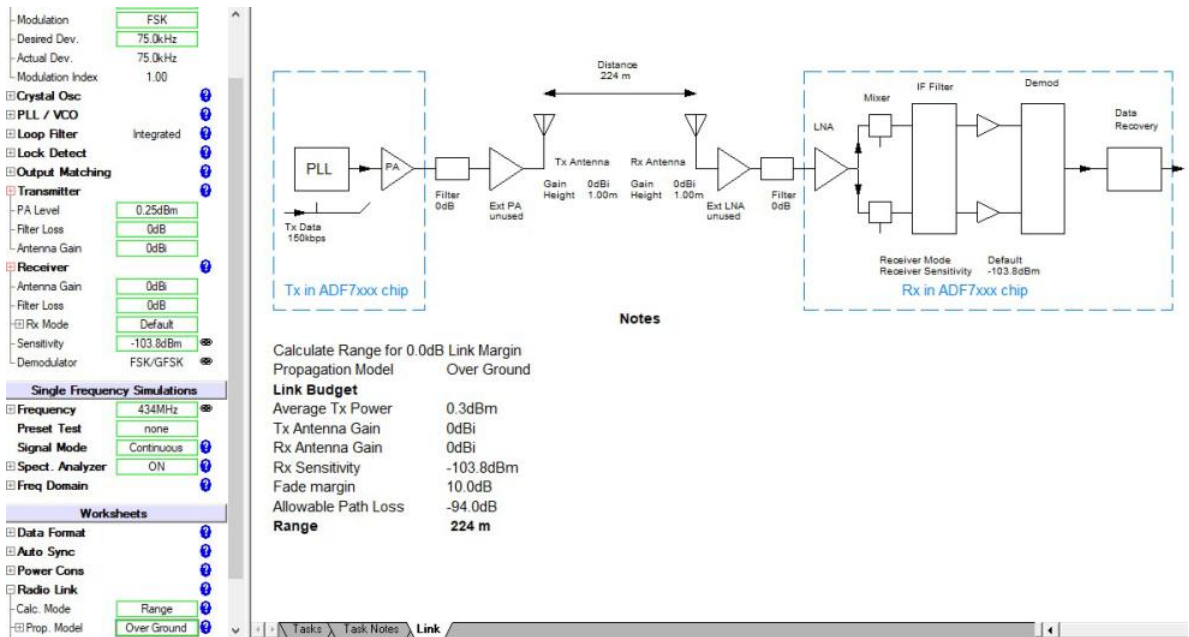


Рисунок 3.10 – Дальність зв'язку 224 м при значенні потужності 0 дБп біля поверхні землі

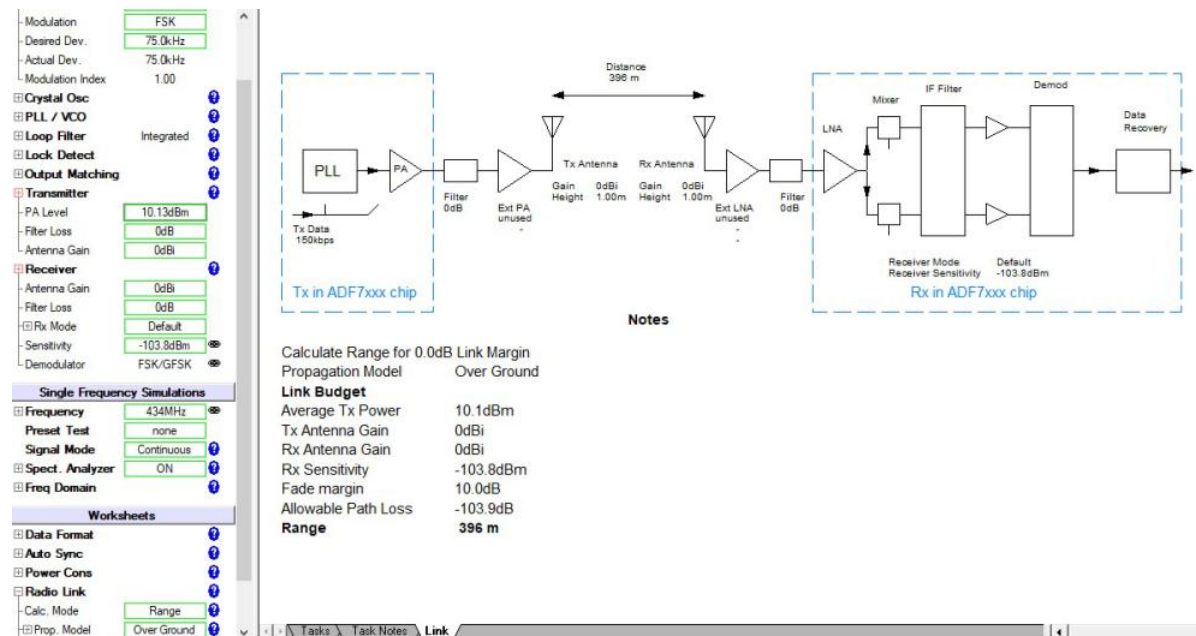


Рисунок 3.11 – Дальність зв'язку 396 м при значенні потужності 10 дБп біля поверхні землі

Знайдемо залежність дальності зв'язку від умов розповсюдження сигналу в приміщенні (рис. 3.12 – рис. 3.21).

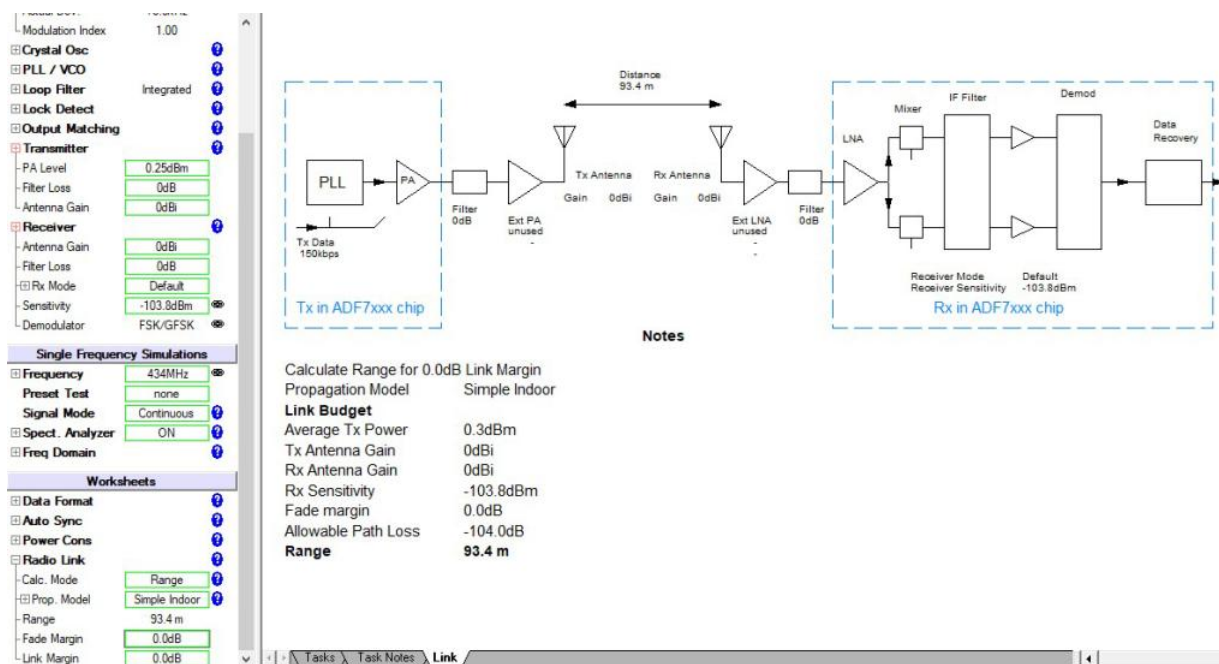


Рисунок 3.12 – Дальність зв'язку 93,4 м при значенні потужності 0 дБп та загасанні сигналу 0 дБп в приміщенні

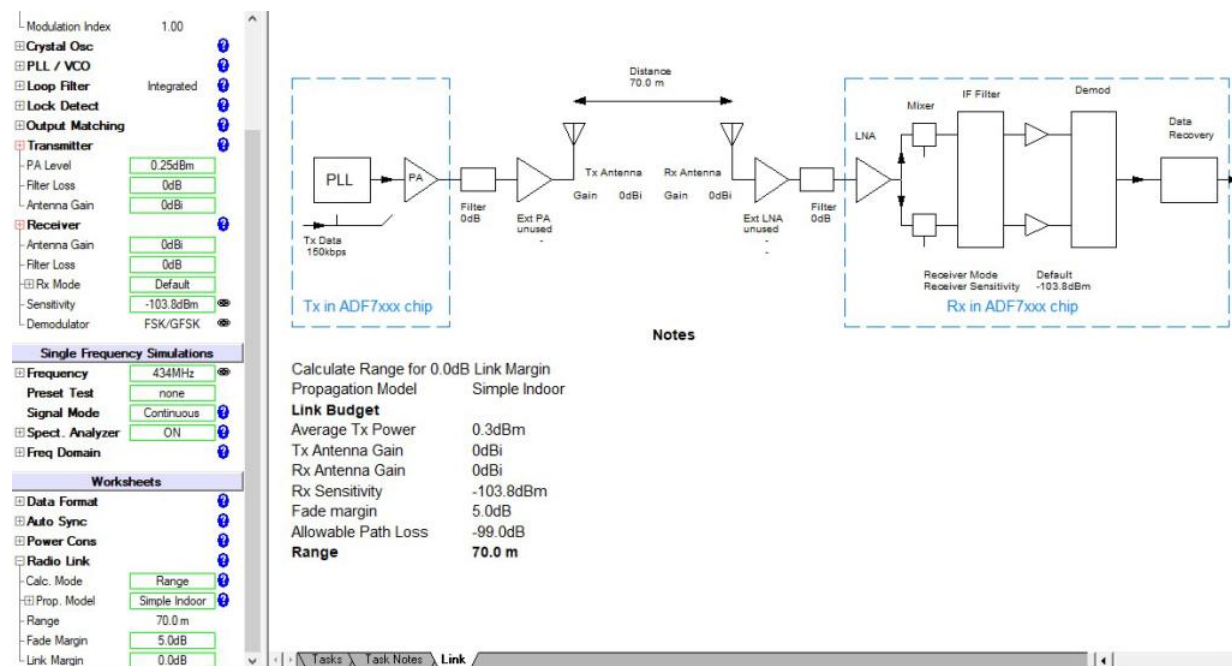


Рисунок 3.13 – Дальність зв'язку 70 м при значенні потужності 0 дБп та загасанні сигналу 5 дБп в приміщенні

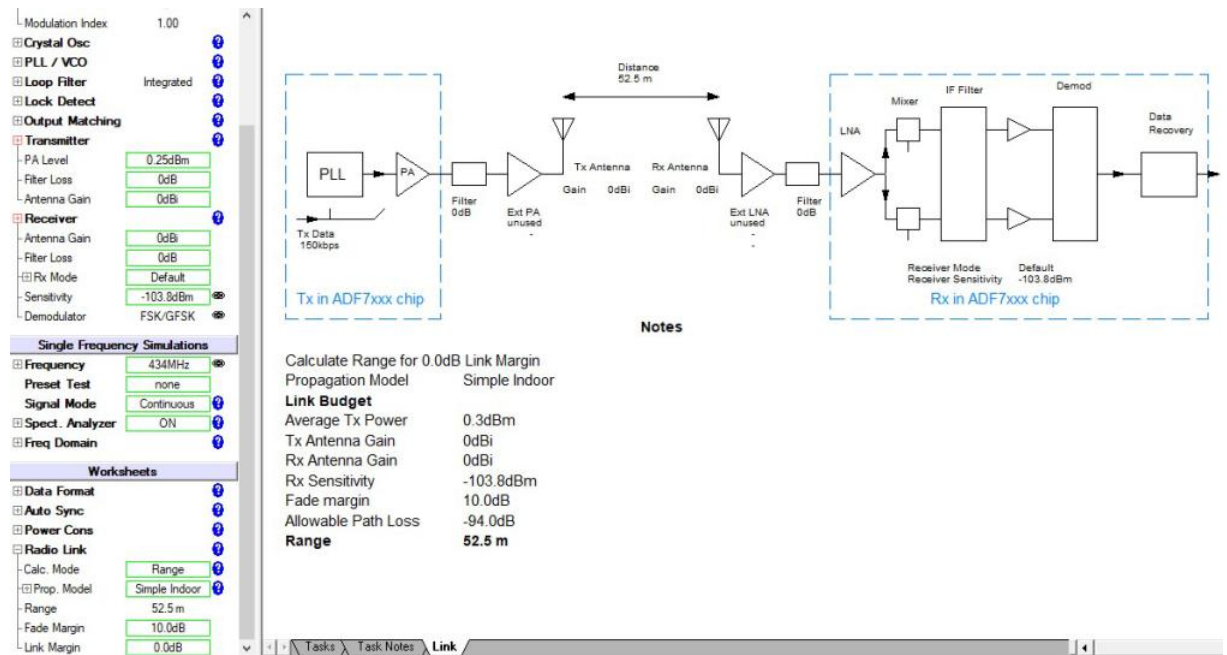


Рисунок 3.14 – Дальність зв'язку 52,5 м при значенні потужності 0 дБп та загасанні сигналу 10 дБп в приміщенні

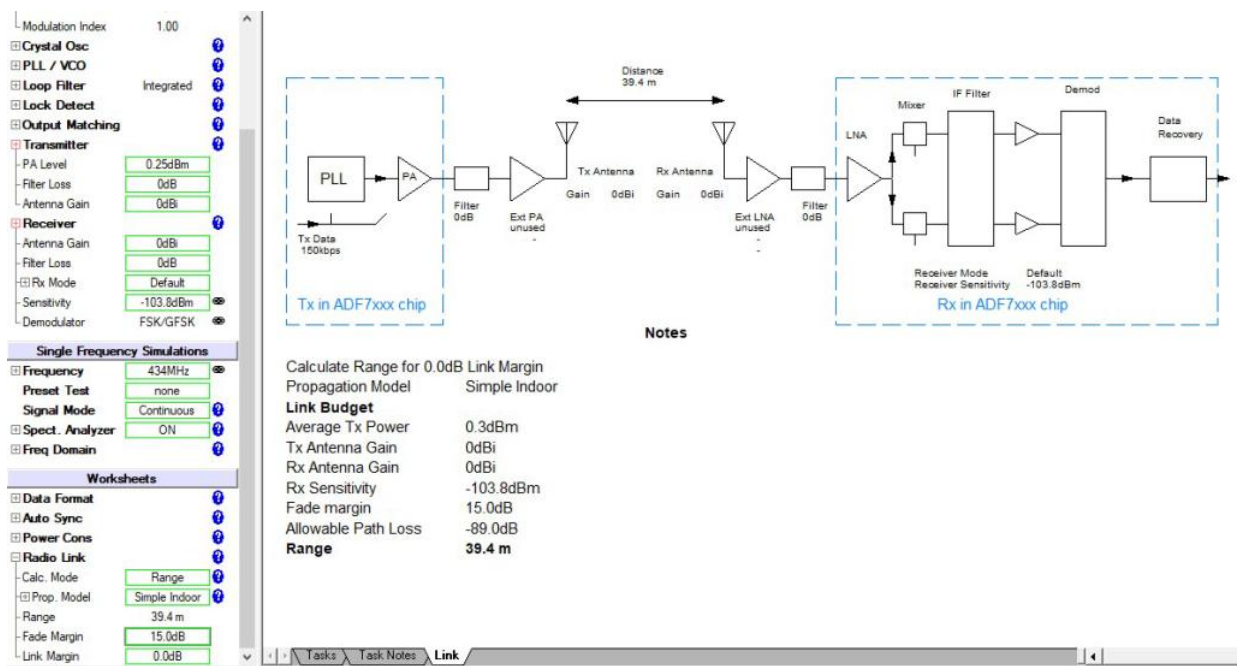


Рисунок 3.15 – Дальність зв'язку 39,4 м при значенні потужності 0 дБп та загасанні сигналу 15 дБп в приміщенні

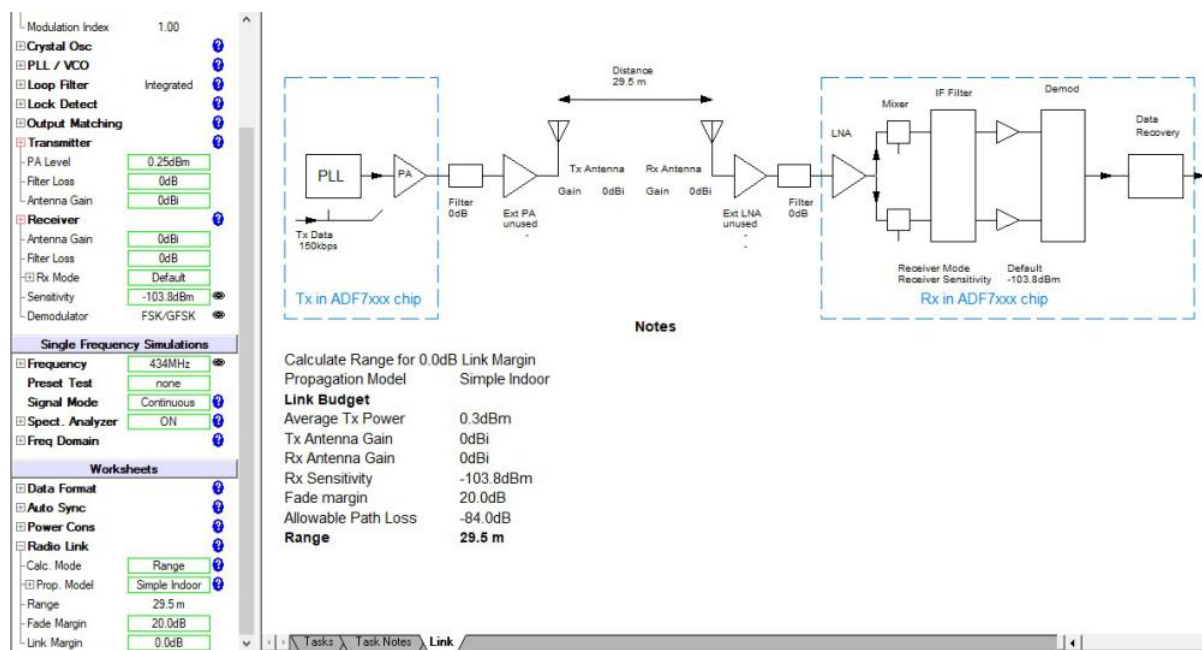


Рисунок 3.16 – Дальність зв'язку 29,5 м при значенні потужності 0 дБп та загасанні сигналу 20 дБп в приміщенні

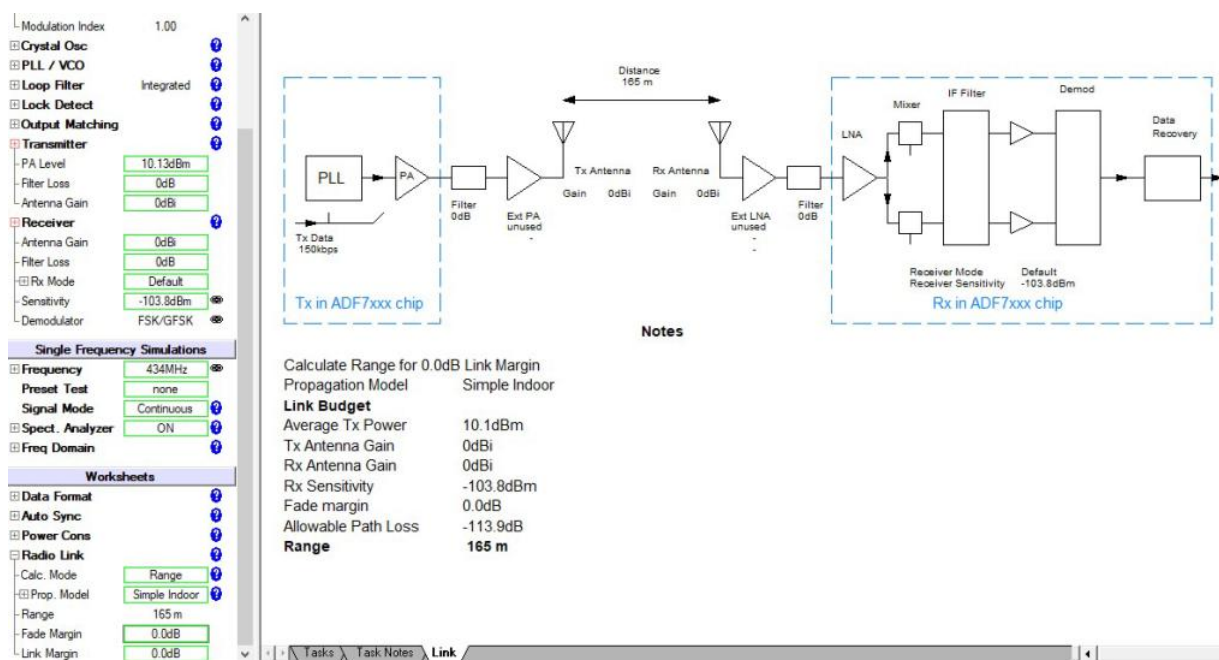


Рисунок 3.17 – Дальність зв'язку 165 м при значенні потужності 10 дБп та загасанні сигналу 0 дБп в приміщенні

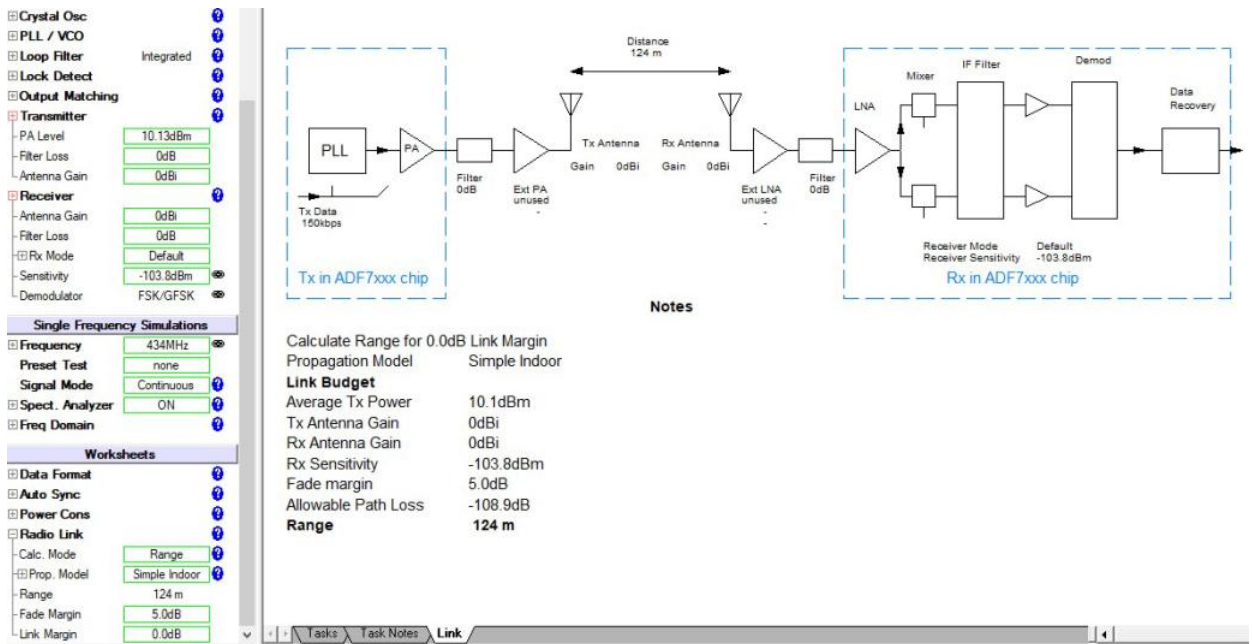


Рисунок 3.18 – Дальність зв'язку 124 м при значенні потужності 10 дБп та загасанні сигналу 5 дБп в приміщенні

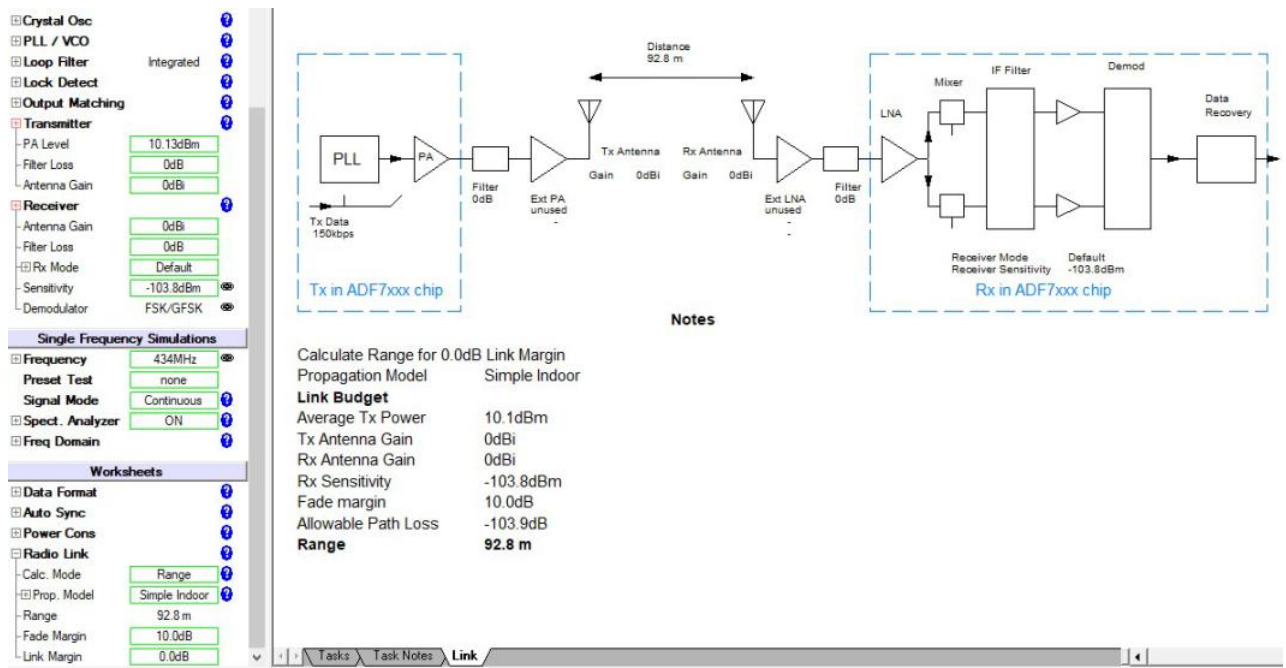


Рисунок 3.19 – Дальність зв'язку 92,8 м при значенні потужності 10 дБп та загасанні сигналу 10 дБп в приміщенні

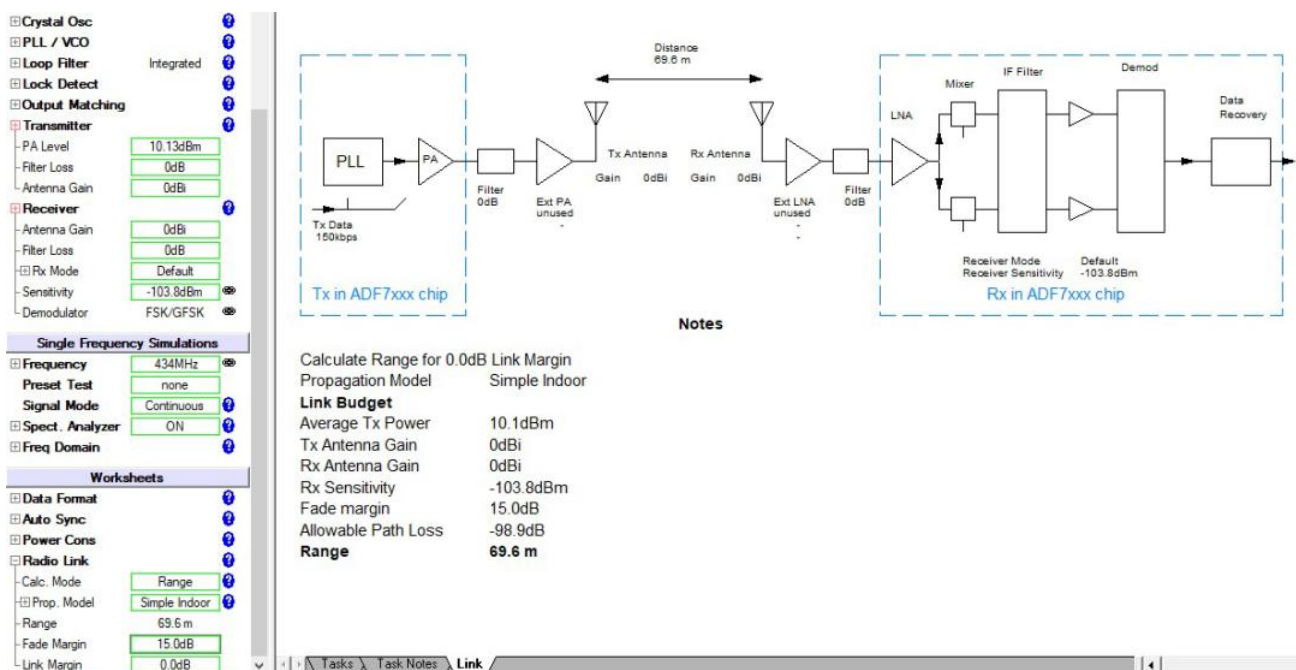


Рисунок 3.20 – Дальність зв'язку 69,6 м при значенні потужності 10 дБп та загасанні сигналу 15 дБп в приміщенні

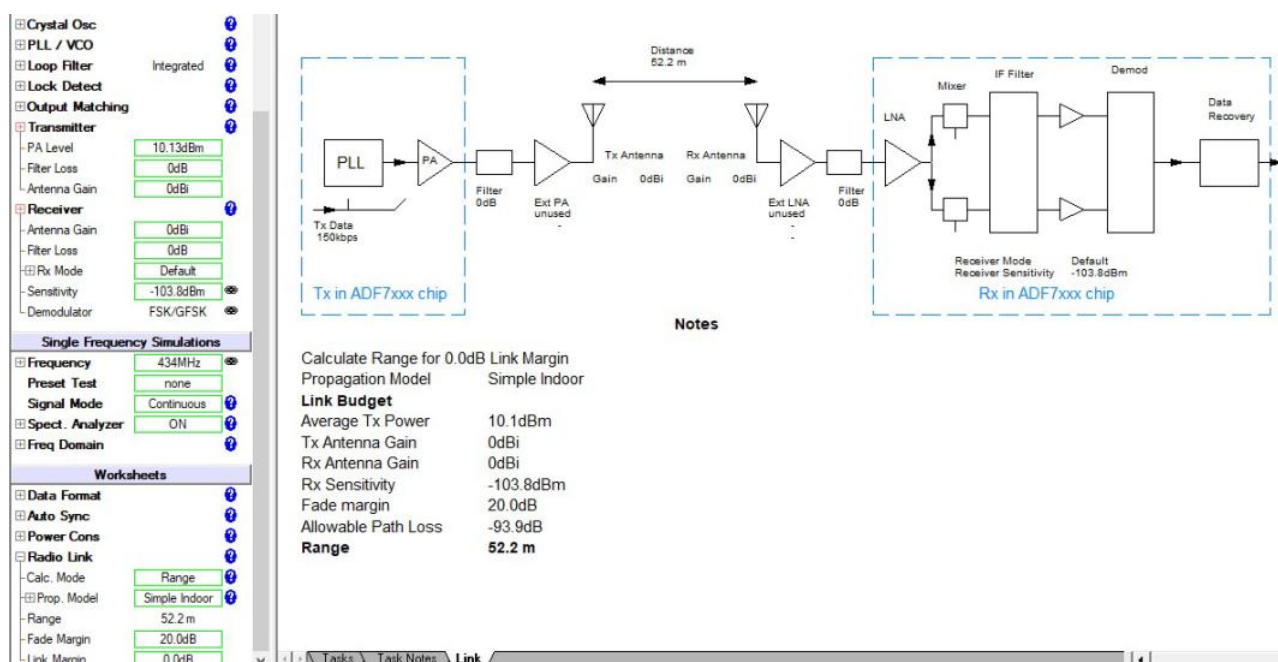


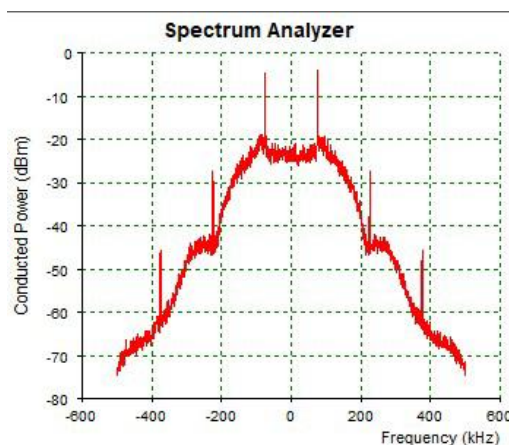
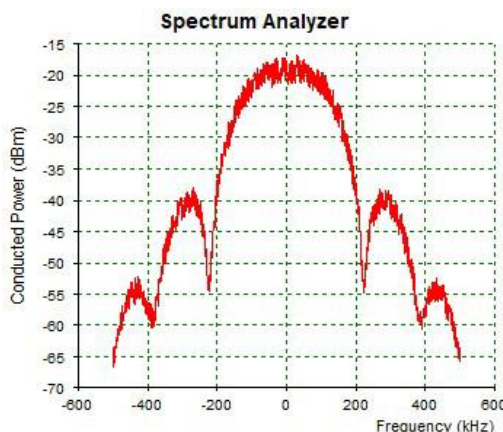
Рисунок 3.21 – Дальність зв'язку 52,2 м при значенні потужності 10 дБп та загасанні сигналу 20 дБп в приміщенні

Коефіцієнт бітових помилок (BER) залишався сталим за будь-яких умов розповсюдження сигналу, значення потужності та загасання сигналу (рис. 3.22).

Worksheets	
Data Format ?	
- Freq Offset	86.8kHz
- Preamble Len	48
- Payload Bits	256
- Checksum Bits	16
- Analysis BER	0.00100

Рисунок 3.22 – Значення BER

Порівняємо ширину спектру сигналу на рівні -40 дБм при значенні потужності 0 дБп, частотній маніпуляції, швидкості передавання інформації 150 кбіт/с (рис. 3.23) та 300 кбіт/с (рис. 3.24).

Рисунок 3.23 – Ширина спектру 400 кГц на рівні -40 дБм при швидкості передавання інформації 150 кбіт/сРисунок 3.24 – Ширина спектру 600 кГц на рівні -40 дБм при швидкості передавання інформації 300 кбіт/с

Таблиця 3.2 – Залежність дальності зв'язку від умов розповсюдження сигналу у вільному просторі та біля поверхні землі

Параметр	У вільному просторі		Біля поверхні землі		Діапазон робочих частот, МГц	Ширина спектру, кГц	Швидкість передавання даних, кбіт/с	Метод модуляції
	P=0 дБп	P=10 дБп	P=0 дБп	P=10 дБп				
Дальність зв'язку, м	2760	8600	224	396	434	400 (на рівні -40 дБм)	150	FSK
BER	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}				

Таблиця 3.3 – Залежність дальності зв'язку від умов розповсюдження сигналу у приміщенні

Параметр	Загасання сигналу ($P_{\text{вих}} = 0$ дБп), дБп					Загасання сигналу ($P_{\text{вих}} = 10$ дБп), дБп				
	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20
Дальність зв'язку, м	93,4	70	52,5	39,4	29,5	165	124	92,8	69,6	52,2
BER	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}

З результатів табл. 3.2 можна дійти висновків, що зі збільшенням потужності передавача, збільшується дальність зв'язку трансивера. За умов поширення сигналу у вільному просторі, дальність зв'язку зросла в 3 рази, а при розповсюдженню сигналу біля поверхні землі – майже вдвічі.

Дивлячись на показники табл. 3.3 можемо спостерігати, що при значеннях 0 дБп та 10 дБп вихідної потужності передавача, дальність зв'язку в приміщенні зменшувалась зі збільшенням загасання сигналу.

Коефіцієнт бітових помилок залишався сталим 10^{-3} для розповсюдження сигналу у вільному просторі, біля поверхні землі та у приміщенні.

Графік аналізатора спектру (рис. 3.24) показує, що зі збільшенням швидкості передавання інформації у два рази, ширина спектру

прийомопередавача зростає приблизно в 1.5 рази за рахунок бічних пелюсток у спектрі на рівні -40 дБм.

Розглянемо залежність дальності зв'язку трансивера в приміщенні від зміни значень коефіцієнта підсилення приймальної антени (рис. 3.25 – рис. 3.28).

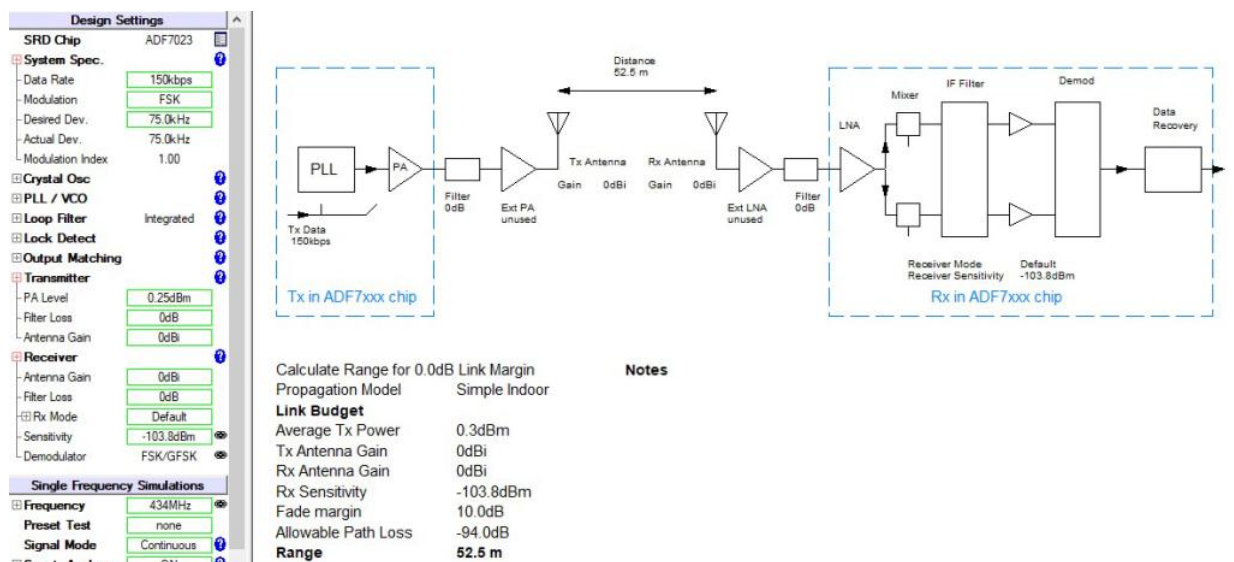


Рисунок 3.25 – Дальність зв'язку 52,5 м при значенні коефіцієнта підсилення приймальної антени 0 дБ в приміщенні

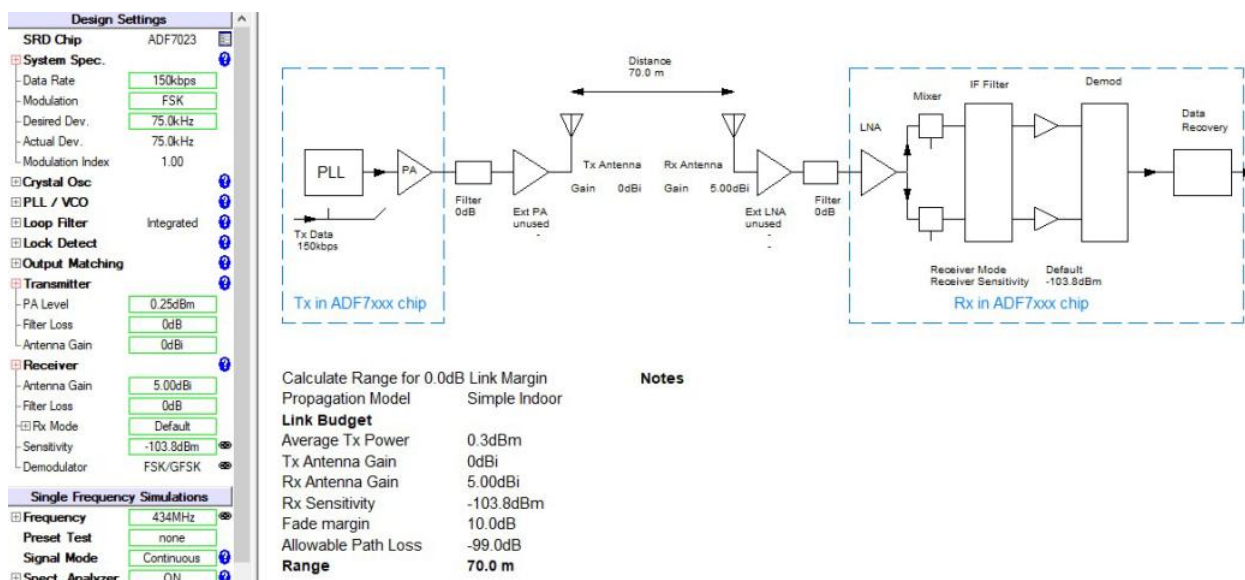


Рисунок 3.26 – Дальність зв'язку 70 м при значенні коефіцієнта підсилення приймальної антени 5 дБ в приміщенні

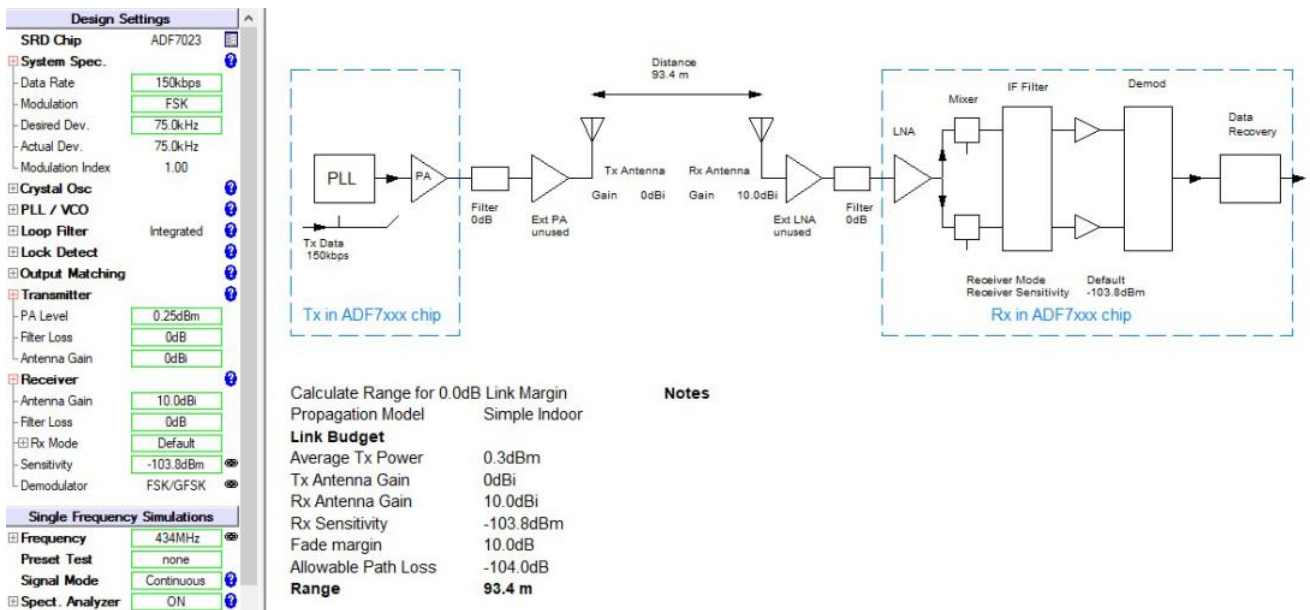


Рисунок 3.27 – Дальність зв'язку 93,4 м при значенні коефіцієнта підсилення приймальної антени 10 дБ в приміщенні

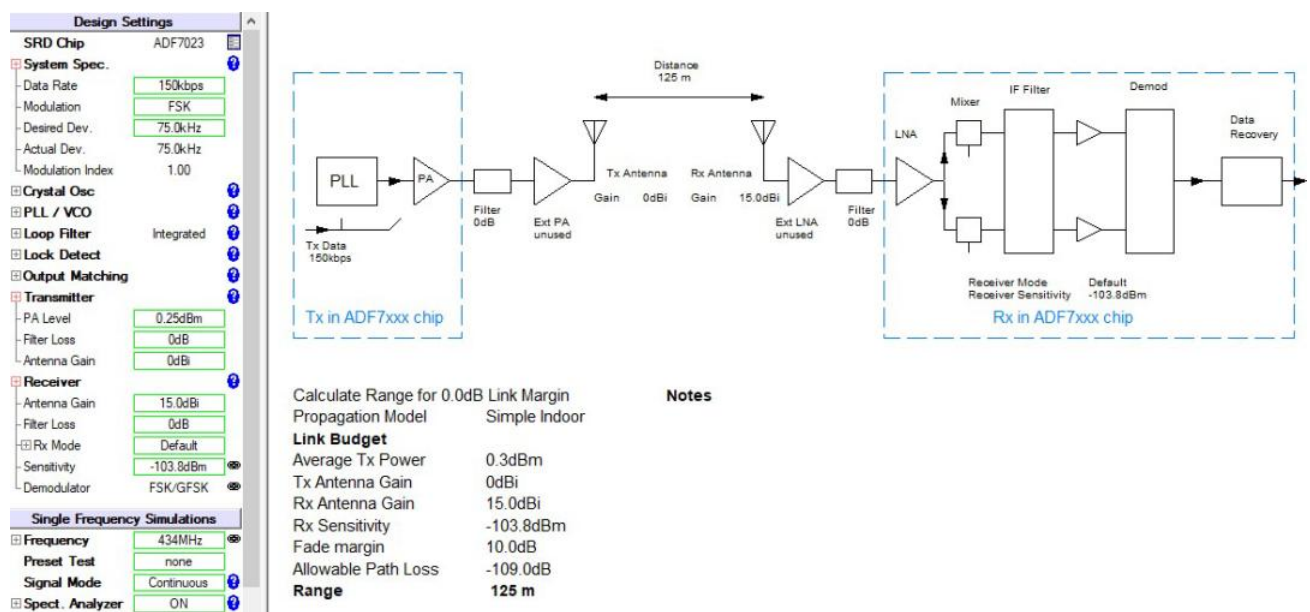


Рисунок 3.28 – Дальність зв'язку 125 м при значенні коефіцієнта підсилення приймальної антени 15 дБ в приміщенні

Розрахунок залежності дальності зв'язку від коефіцієнта підсилення передавальної антени в приміщенні (рис. 3.29 – рис. 3.32).

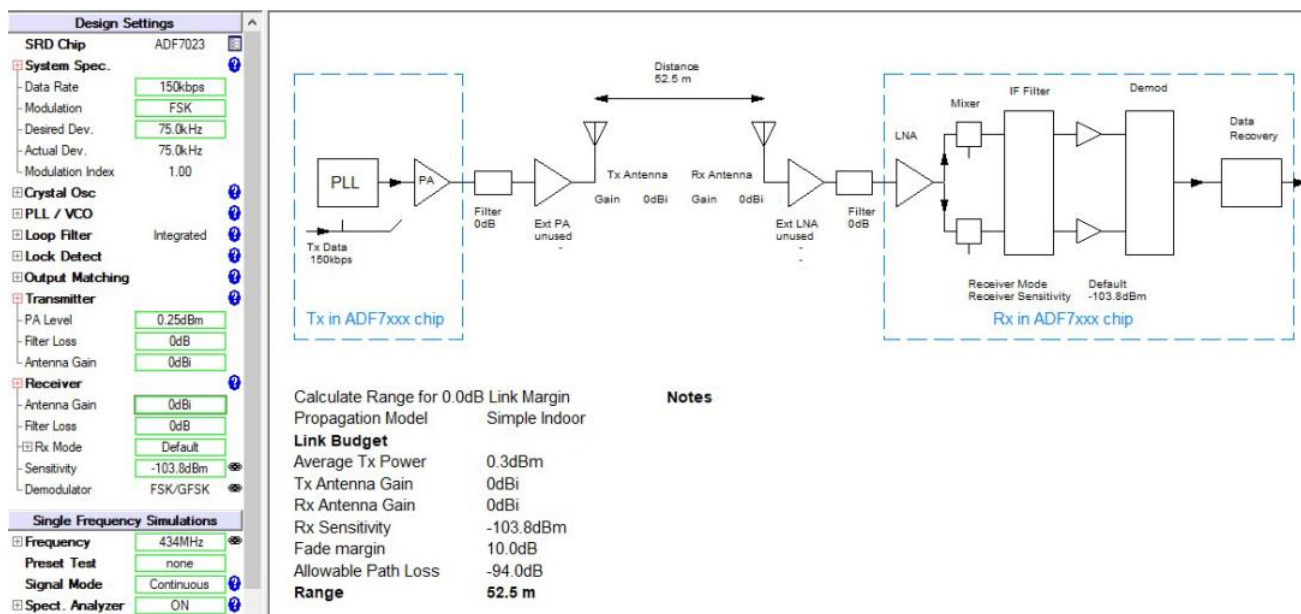


Рисунок 3.29 – Дальність зв'язку 52,5 м при значенні коефіцієнта підсилення передавальної антени 0 дБ в приміщенні

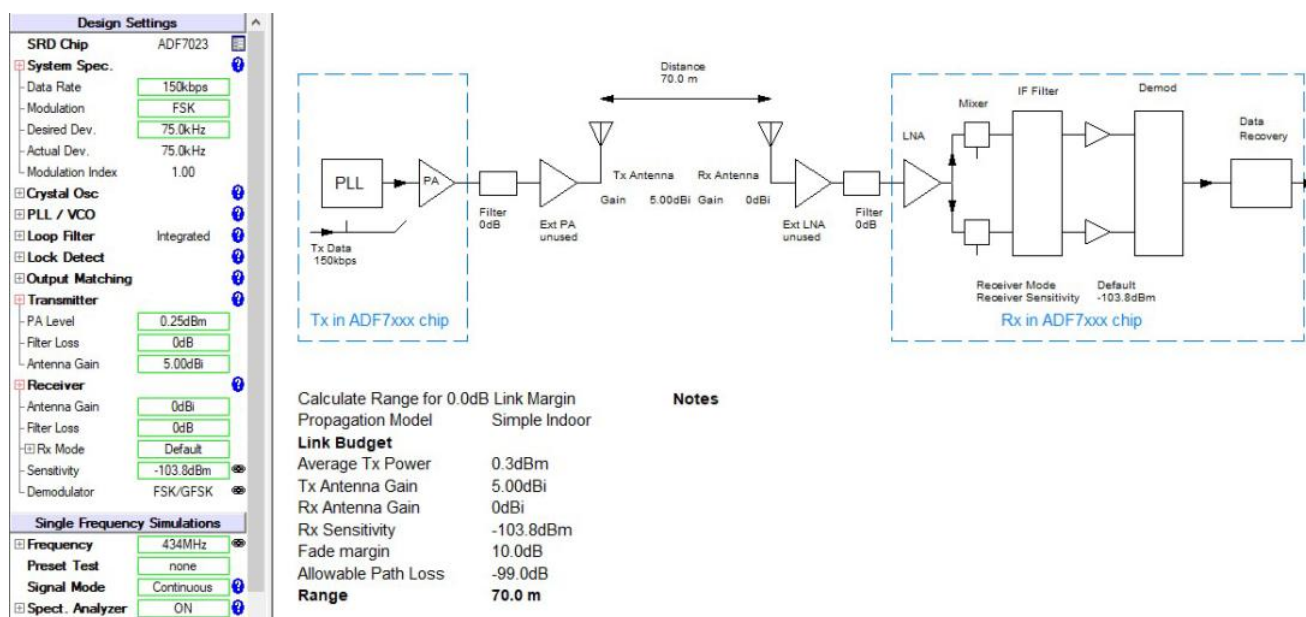


Рисунок 3.30 – Дальність зв'язку 70 м при значенні коефіцієнта підсилення передавальної антени 5 дБ в приміщенні

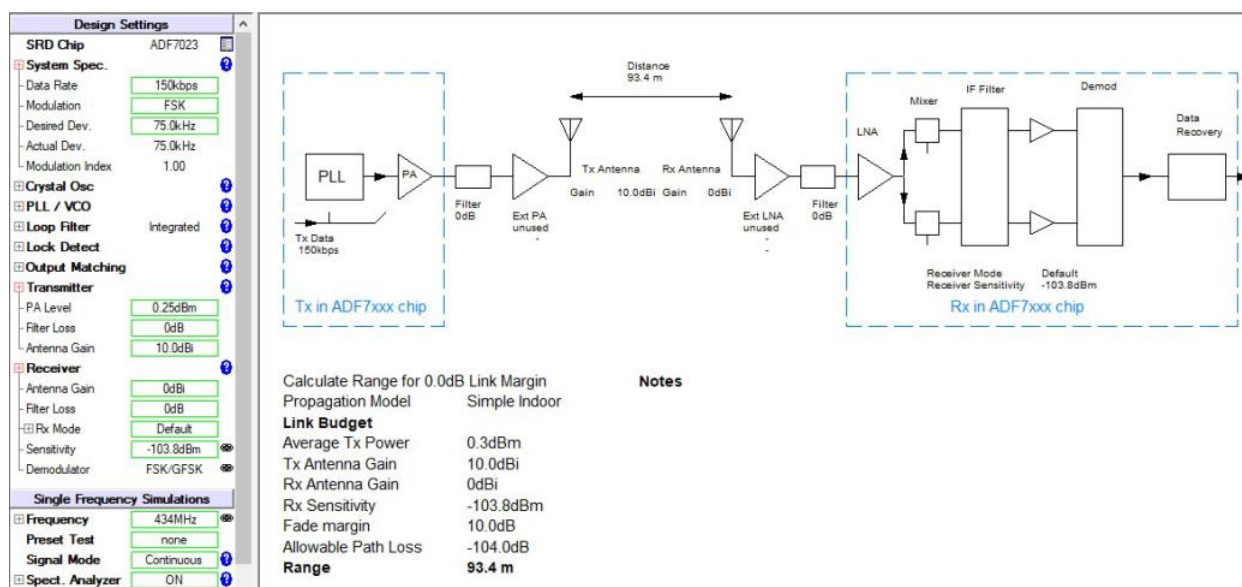


Рисунок 3.31 – Дальність зв'язку 93,4 м при значенні коефіцієнта підсилення передавальної антени 10 дБ в приміщенні

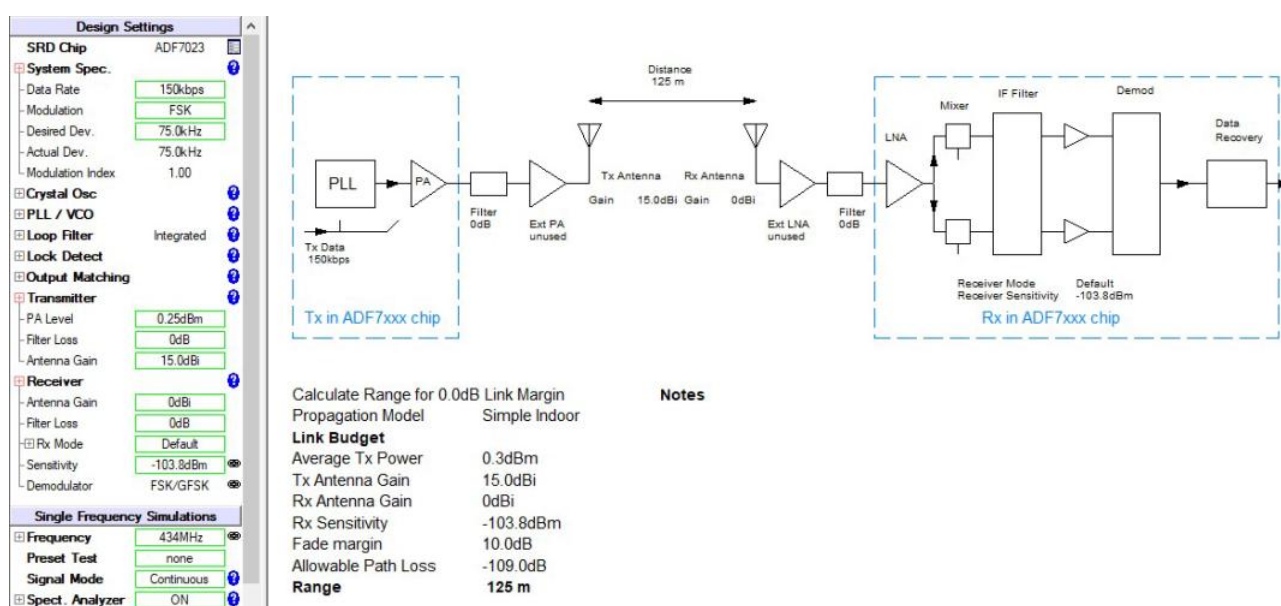


Рисунок 3.32 – Дальність зв'язку 125 м при значенні коефіцієнта підсилення передавальної антени 15 дБ в приміщенні

Розрахунок залежності дальності зв'язку від зміни коефіцієнта підсилення передавальної та приймальної антени в приміщення (рис. 3.33 – рис. 3.38).

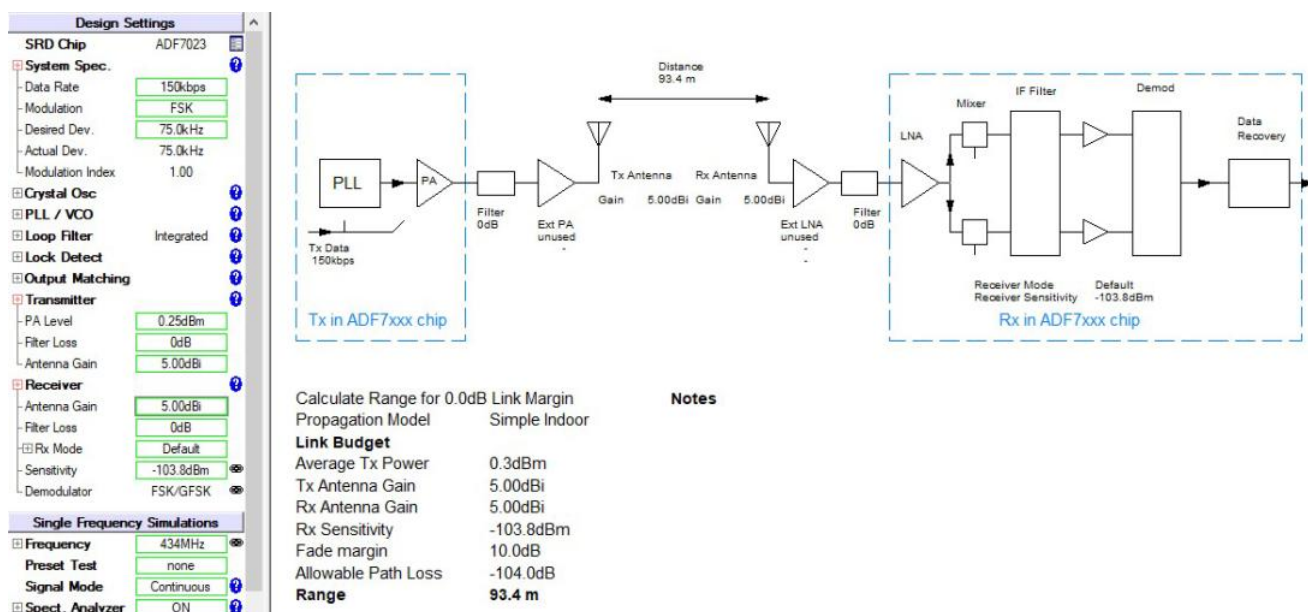


Рисунок 3.33 – Дальність зв'язку 93,4 м при значенні коефіцієнтів підсилення передавальної та приймальної антен 5 дБ в приміщенні

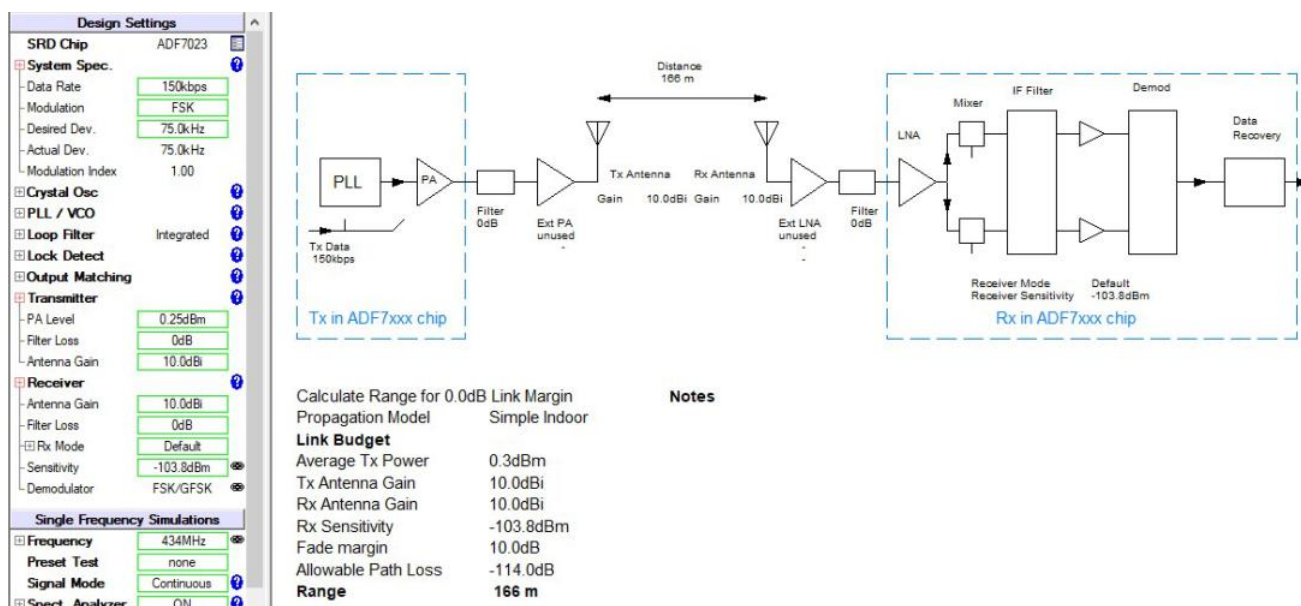


Рисунок 3.34 – Дальність зв'язку 166 м при значенні коефіцієнтів підсилення передавальної та приймальної антен 10 дБ в приміщенні

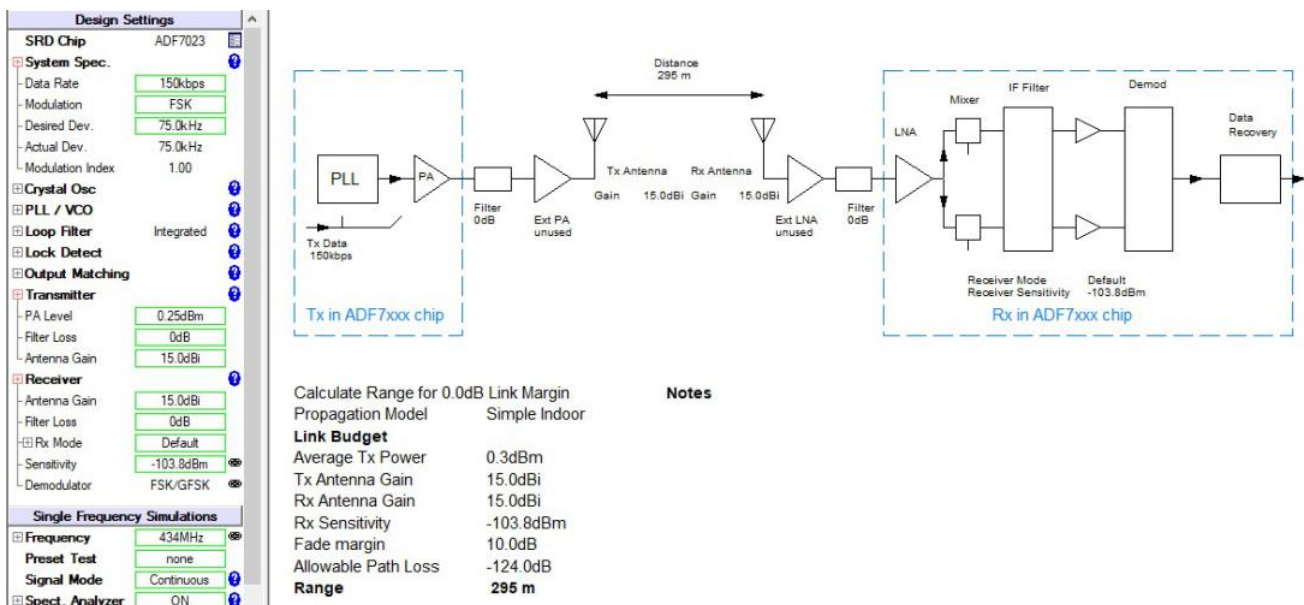


Рисунок 3.35 – Дальність зв'язку 295 м при значенні коефіцієнтів підсилення передавальної та приймальної антен 15 дБ в приміщенні

Знайдемо залежність дальності зв'язку від зміни типу модуляції.

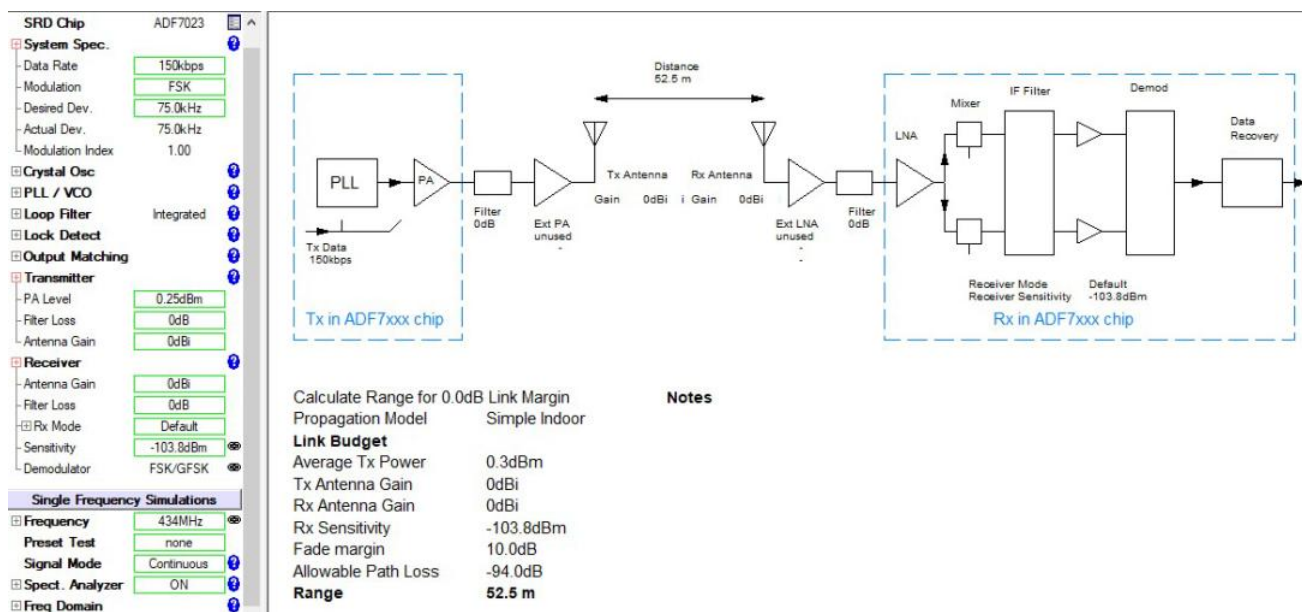


Рисунок 3.36 – Дальність зв'язку 52,5 м при FSK модуляції в приміщенні

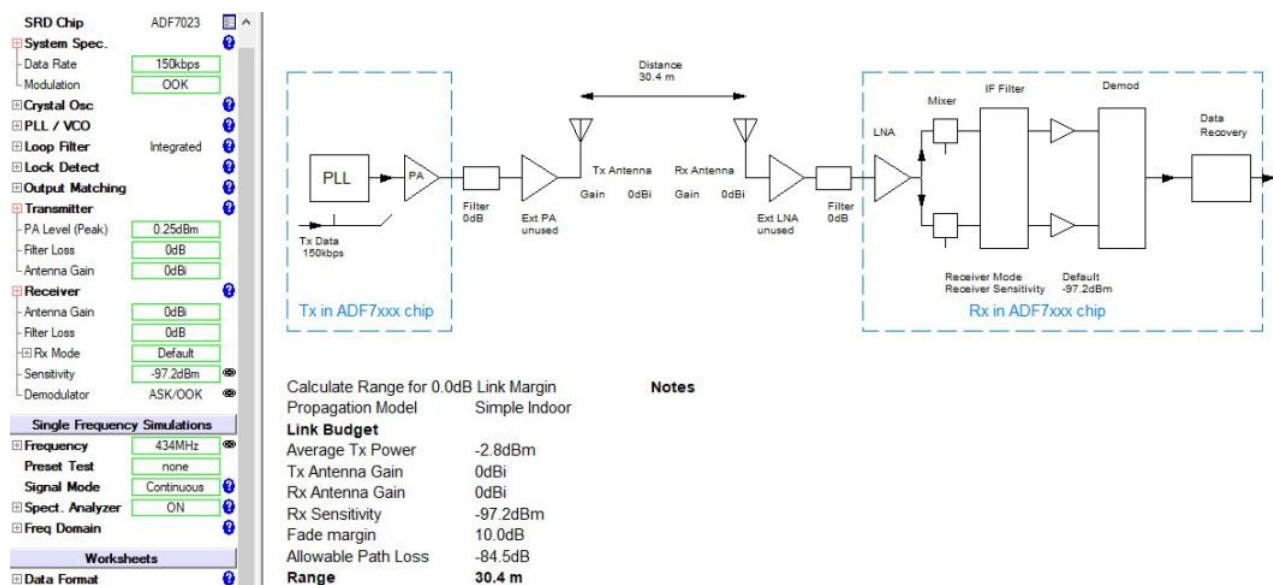


Рисунок 3.37 – Дальність зв'язку 30,4 м при OOK модуляції в приміщенні

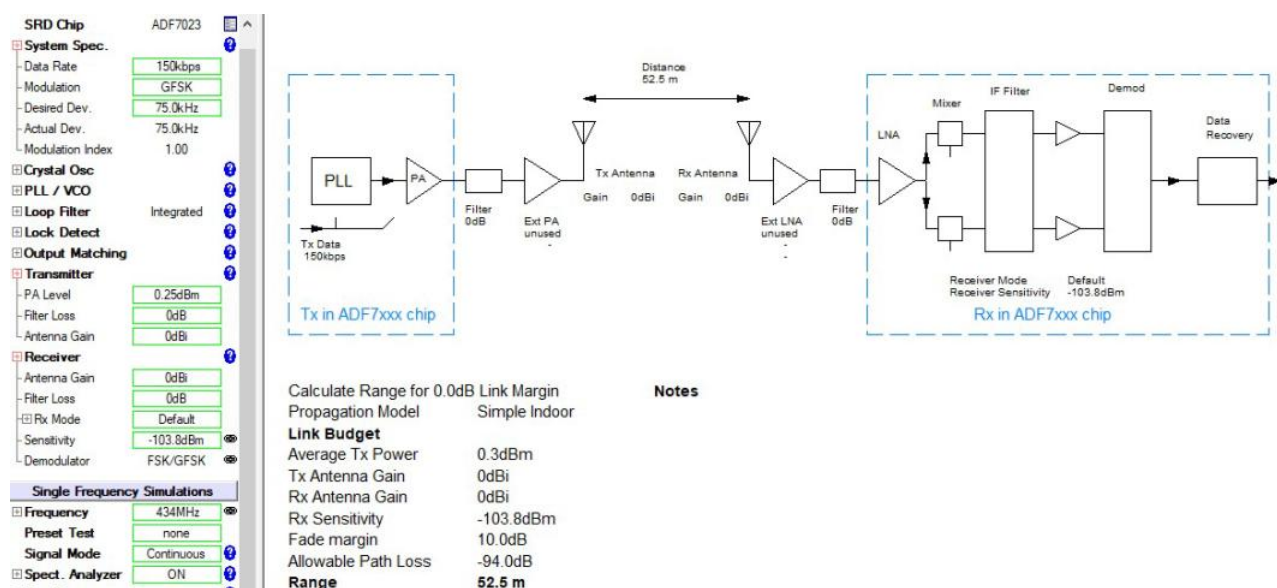


Рисунок 3.38 – Дальність зв'язку 52,5 м при GFSK модуляції в приміщенні

Таблиця 3.5 – Залежність дальності зв'язку від типу модуляції

Значення BER	Тип модуляції	$P_{вих}$, дБп	Коефіцієнт підсилення антен, дБ	Дальність зв'язку, м	Умови поширення сигналу
10^{-3}	FSK	0	0	52,5	У приміщенні
10^{-3}	GFSK			52,5	
10^{-3}	OOK			30,4	

Таблиця 3.6 – Залежність дальності зв'язку від коефіцієнта підсилення антен

Дальність зв'язку, м	Коефіцієнт підсилення приймальної антени, дБ				Коефіцієнт підсилення передавальної антени, дБ			
	0	5	10	15	0	5	10	15
52,5	•							
70		•						
93,4			•					
125				•				
52,5					•			
70						•		
93,4							•	
125								•
93,4		•				•		
166			•				•	
295				•				•

За результатами таблиці 3.5 більшу дальність зв'язку забезпечує використання в трансвері ADF7023 частотної та гаусівської частотної маніпуляції.

При дослідженні розповсюдження сигналу прийомопередавача в приміщенні зі збільшенням значення коефіцієнта підсилення приймальної та передавальної антени дальність зв'язку збільшувалася. Так при значенні коефіцієнта підсилення антен 5 дБ дальність зв'язку становила 93,4 м, а при значенні коефіцієнта підсилення 15 дБ дальність зв'язку зросла втричі – до 295 м.

Отже щоб забезпечити кращу дальність зв'язку трансивера необхідно враховувати коефіцієнт загасань, вихідну потужність передавача, тип модуляції та коефіцієнти підсилення приймальних і передавальних антен.

3.3 Розробка принципової схеми прийомопередавального тракту

Принципова схема прийомопередавача наведена на рис. 3.39. Схема складається з ІМС однокристального прийомопередавача ADF7023, мікроконтролера R5F100LLAFB, який здійснює управління всією схемою, карти пам'яті, рідкокристалічного дисплея EA DOGM128W-6, перетворювача FT232RQ для послідовного передавання даних через роз'єм Mini USB, багатопозиційного перемикача SKQUCAA010 та блоку низькочастотного підсилення напруги мікрофону та потужності гучномовця. Автономне живлення схеми реалізовано завдяки використанню акумулятора Kenwood KNB-29N. Для захисту схеми від короткого замикання, перегрівання, тривалої роботи акумулятора використано лінійні стабілізатори напруги ADP150 та ADP3300 з низьким рівнем шуму та малим падінням напруги.

3.3.1 Вибір мікроконтролера

В якості мікроконтролера обрано 16-бітний R5F100GEAFB Renesas Electronics з високою продуктивністю (41DMIPS при 32 МГц), наднизьким енергоспоживанням, що дозволяє створювати компактні та енергоефективні прийомопередавачі з меншими витратами. Мікроконтролер має вбудований високочастотний генератор, що забезпечує роботу ІМС з частотою 32 МГц.

Характеристика мікроконтролера R5F100GEAFB:

- тип вбудованих інтерфейсів I2C, LIN, UART;
- CISC архітектура;
- кількість виводів 64;
- робоча напруга живлення 1,6 – 5,5 В;
- розмір пам'яті 64 Кб;
- розмір пам'яті ОЗП 4 Кб;
- розміри 12×12 мм;
- діапазон робочих температур -40...80 °С;
- корпус LFQFP [12].

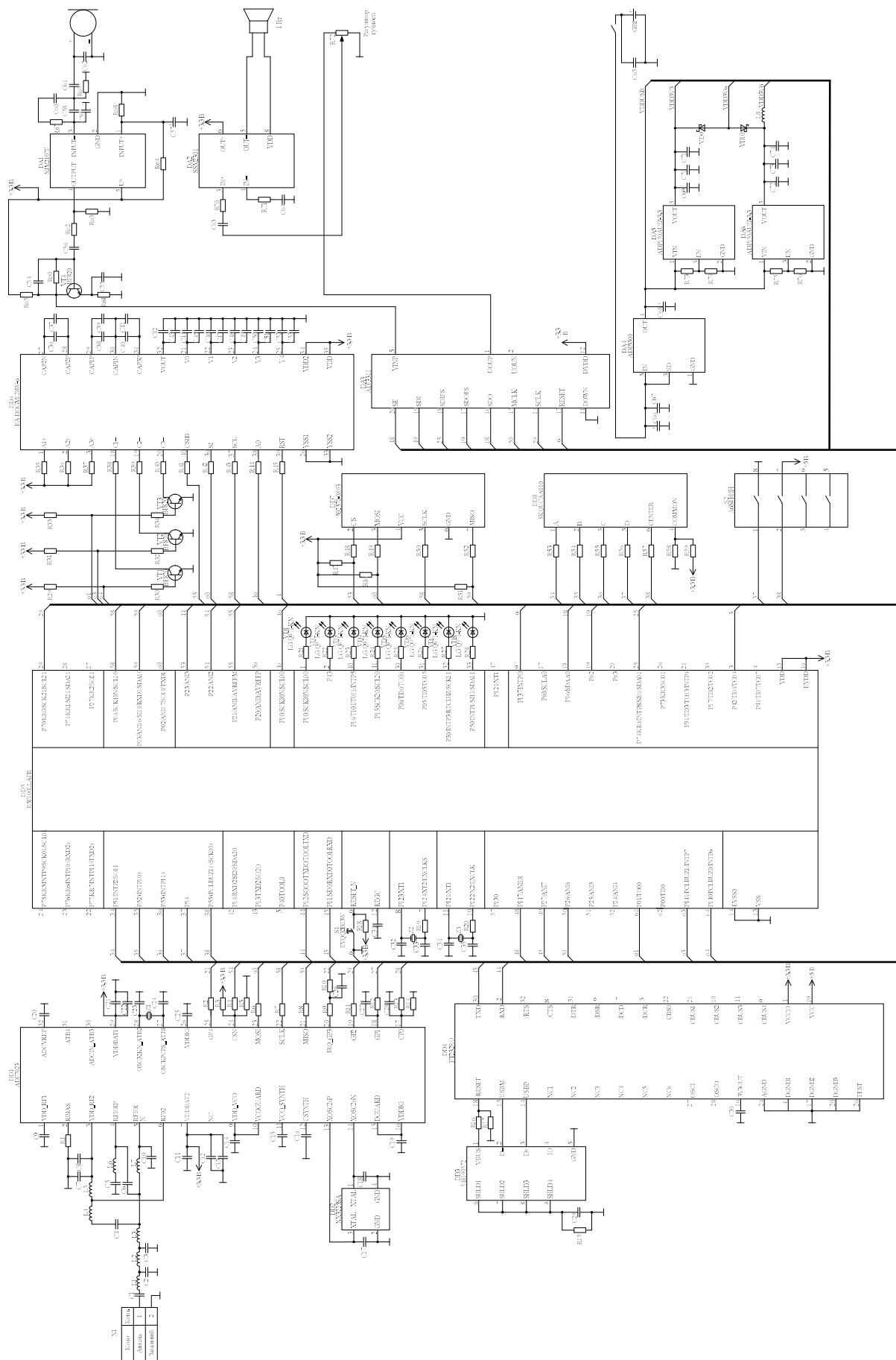


Рисунок 3.39 – Принципова схема прийомопередавача

3.3.2 Вибір мікросхеми інтерфейса USB

FTDI FT232RQ – це однокристальний перетворювач USB-UART. Протокол USB обробляється мікросхемою, яка не потребує спеціального програмування. Налаштування ІМС зберігаються у вбудованій пам'яті EEPROM.

Характеристика перетворювача FT232RQ:

- стандарт USB 2.0;
- швидкість передавання символів від 300 до 3 Мбод;
- 128-байтовий буфер прийому;
- 256-байтовий буфер передавання;
- підтримка конфігурації USB з живленням від шини, з автономним живленням та з живленням від шини високої потужності;
- вбудований перетворювач напруги рівня +3,3 В для USB вводу-виводу;
- робоча напруга живлення від 1,8 – 5,25 В;
- діапазон робочих температур -40...85 °С;
- корпус QFN-32 [13].

Для забезпечення додаткової пам'яті в прийомопередавачі передбачено тримач micro-SD MOLEX 502570-0893, що підключено до ліній послідовного периферійного інтерфейсу SPI мікроконтролера [14].

3.3.3 Вибір LCD дисплея

Рідкокристалічний дисплей EA DOGM128 від Electronic Assembly призначений для компактних портативних пристроїв з низьким енергоспоживанням та має 7 різних опцій світлодіодної підсвітки.

Характеристика EA DOGM128 Electronic Assembly:

- роздільна здатність 128×64 пікселі;
- технологія дисплея FSTN;
- колір фону – білий;
- робоча напруга живлення 3 – 3,3 В;

- розміри екрану 51×31 мм;
- послідовний інтерфейс SPI (4-проводовий);
- діапазон робочих температур $-20 \dots 70$ °C [15].

3.3.4 Вибір підсилювачів для мікрофону та гучномовця

Для підсилення вихідного рівня сигналу мікрофону обрано одиничний операційний низькочастотний підсилювач напруги NJM2107 в мініатюрному корпусі для поверхневого кріплення. Підсилювач NJM2107 працює за низької робочої напруги від ± 1 В до $\pm 3,5$ В.

В якості низькочастотного підсилювача потужності для гучномовця обрано інтегральний підсилювач SSM2301 Analog Devices, призначений для роботи в режимі класу "D" та практично не вносить спотворень в початковий сигнал. ККД підсилювача знаходиться на рівні 85% в широкому діапазоні вихідної потужності, характеризується малим енергоспоживанням та низьким рівнем електромагнітних завад.

Характеристика SSM2301 Analog Devices:

- сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень і шуму не перевищує 1%;
- відношення сигнал/шум 98 дБ;
- робоча напруга живлення 2,5 – 5 В;
- споживання струму 20 нА в режимі енергозбереження;
- вбудований захист від короткого замикання на виході та перегрівання;
- діапазон робочих температур $-40 \dots 85$ °C;
- корпус LFCSP, 3×3 мм [16].

3.3.5 Вибір структури та елементів джерела живлення

3.3.5.1 Вибір акумулятора

Портативний прийомопередавач має цикл роботи 5/5/90 від одного заряджання акумулятора.

Це означає, що 5% часу роботи прийомопередавача витрачається на передавання сигналів, 5% – на приймання, 90% – черговий режим. Відповідно при розрахунку ємності акумулятора необхідно враховувати робочу зміну працівників.

В табл. 3.7 наведено розрахунок ємності акумулятора прийомопередавача.

Таблиця 3.7 – Розрахунок ємності акумулятора прийомопередавача

Елемент	К-ть	Споживання струму в режимі передавання, мА	Споживання струму в режимі приймання, мА	Споживання струму в черговому режимі, мА
ADF7023	1	30	20	0,002
R5F100LLAFB#V0	1	10	10	1
ADP3300	1	1	1	1
ADP150AUJZ-3.3	2	0,32	0,06	0,06
EA DOGM128W-6	1	10	–	0,3
AD7879ACPZ	1	0,5	–	0,5
LG Q971-KN-1	8	5	5	–
FT232RQ	1	2	1	0,5
SSM2301	1	–	150	0,5
NJM2107F	1	2	–	1
Інші	...	10	10	1
Сумарний струм		106	232	5,3

Враховуючи, що зміна працівників складає 12 годин розрахуємо споживання струму під час передавання, прийому та черговому режимі.

В режимі передавання:

$$106 \cdot \frac{12 \cdot 5}{100} = 63,6 \text{ мА/год.}$$

В режимі прийому:

$$232 \cdot \frac{12 \cdot 5}{100} = 139 \text{ мА/год.}$$

В черговому режимі:

$$5,3 \cdot \frac{12 \cdot 90}{100} = 57 \text{ мА/год.}$$

Сумарний струм споживання для 12-годинної робочої зміни:

$$\sum_{\text{стр}} 63,6 + 139 + 57 = 259,6 \text{ мА/год.}$$

За отриманими розрахунками для портативного прийомопередавача обрано акумулятор Kenwood KNB-29N з ємністю 1500 мА/год [17].

Перевіримо, на яку кількість часу вистачить ємності вказано акумулятора:

$$N_t = \frac{1500}{260} = 5,7 \approx 6$$

Отже вибраного акумулятора вистачить на 6 робочих змін тривалістю 12 годин.

Характеристика акумулятора Kenwood KNB-29N:

- хімічний тип елементів живлення Ni-MH;
- номінальна напруга 7,2 В;
- ємність 1500 мА/год;
- вага 200 г;
- розміри 114×54×18 мм;
- діапазон робочих температур -20...60 °С.

3.3.5.2 Вибір стабілізаторів напруги

ADP3300 – це лінійний прецизійний стабілізатор компанії Analog Devices з малим падінням напруги. Для стабільної роботи достатньо вихідного конденсатора номіналом лише 0,47 мкФ. ADP3300 зберігає стабільність при будь-якому типі вихідного конденсатора, незалежно від еквівалентного послідовного опору, включаючи мініатюрні керамічні конденсатори (MLCC).

Стабілізатор має індикатор помилки, сигналізуючий про втрату стабільності або активацію захисту від короткого замикання чи перегріву. Також має функцію відключення та можливість підключення зовнішнього конденсатора для зменшення рівня шумів.

Характеристика стабілізатора напруги ADP3300:

- висока точність в діапазоні напруг та струмів навантаження, $\pm 0.8\%$ при 25 °C та $\pm 1.4\%$ у всьому температурному діапазоні;
- низьке падіння напруги 80 мВ при 50 мА;
- обмеження струму та захист від перегрівання;
- струм менше 1 мкА в режимі відключення;
- діапазон напруг живлення 3,2 – 12 В;
- розміри 114 × 54 × 18 мм;
- діапазон робочих температур -40...80 °C [18].

ADP150 – це лінійний стабілізатор компанії Analog Devices з низьким шумом (9 мкВ) та малим падінням напруги, що працює з вхідними напругами в діапазоні від 2,2 до 5,5 В та забезпечує вихідний струм до 150 мА. Не значне падіння напруги (105 мВ при струмові навантаження 150 мА) дозволяє підвищити ККД та розширити діапазон вхідних напруг.

Завдяки інноваційній структурі ADP150 забезпечує наднизькі шумові характеристики без необхідності використання зовнішнього фільтруючого конденсатора, та є ідеальним варіантом для застосування в чутливих до шуму аналогових схемах та каскадах ВЧ.

Низький рівень шуму ADP150 досягається без погіршення коефіцієнта ослаблення пульсацій живлення (PSRR) або перехідних характеристик при зміні вхідної напруги і струму навантаження. Поєднання наднизького шуму та малого споживання струму в ADP150 дозволяють максимально продовжити термін роботи акумулятора в портативних прийомопередавачах. ІМС ADP150 спроектована для стабільної роботи з мініатюрними керамічними вхідними та вихідними конденсаторами номіналом 1 мкФ $\pm 30\%$ в системах з жорсткими вимогами до якості сигналів та компактності елементів. ADP150 доступний в 14 версіях з фіксованими вихідними напругами в діапазоні від 1,8 В до 3,3 В. Схеми захисту від короткого замикання та перегрівання запобігають пошкодженню елементів радіосистеми в жорстких робочих умовах [19].

Схема стабілізації напруги акумулятора та внутрішніх елементів портативного прийомопередавача наведена на рис. 3.40.

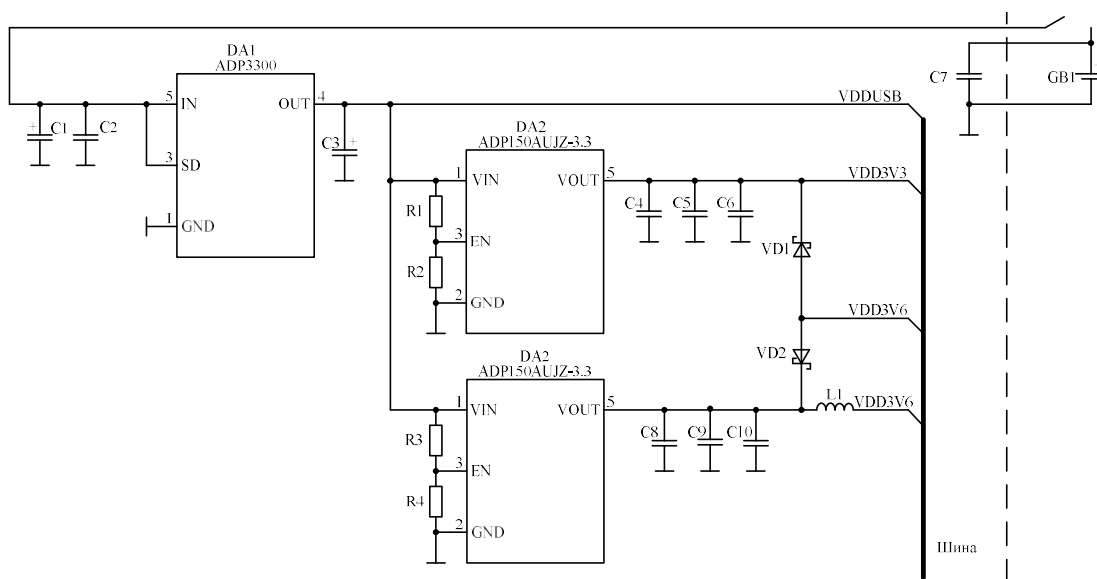


Рисунок 3.40 – Схема стабілізації напруги акумулятора та внутрішніх елементів портативного прийомопередавача

Оскільки напруга акумулятора Kenwood KNB-29N складає 7,2 В доцільно використовувати стабілізатори напруги ADP150AUJZ-3.3 та ADP3300 для забезпечення необхідного рівня робочої напруги живлення елементів прийомопередавача.

Висновки до розділу

На основі проведеного моделювання і порівняльного аналізу параметрів різних прийомопередавачів можна зробити висновок про доцільність вибору ІМС ADF7023, що підтримує FSK/GFSK/OOK/MSK модуляції, швидкість передавання інформації до 300 кбіт/с та забезпечує хорошу дальність зв'язку – 8600 м при значенні потужності 10 дБ у вільному просторі, та дальність – 295 м за умови поширення сигналу в умовах промислової забудови при коефіцієнтах підсилення приймальної та передавальної антени 15 дБ. Однокристальний трансивер ADF7023 має наднизьке енергоспоживання 24 мА в режимі передавання при вихідній потужності 10 дБм, що є значною перевагою для побудови портативних прийомопередавачів.

Характеристики обраного прийомопередавача забезпечують автономну роботу упродовж 72 годин (6 робочих змін тривалістю 12 годин) від акумулятора ємністю 1500 мА/год.

В реалізованій принциповій схемі прийомопередавача на основі ІМС ADF7023, 16-бітного високопродуктивного мікроконтролера R5F100GEAFB, пристроїв вводу та виводу інформації використано лінійні стабілізатори напруги ADP150 та ADP3300 з наднизьким шумом та малим енергоспоживанням для захисту елементів від короткого замикання, перегрівання та збільшення терміну роботи акумулятора радіосистеми в жорстких умовах використання пристрою.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1. Опис ідеї проекту

Вихідним фактором успіху будь-якого стартап-проекту є ідея, що лежить в основі його створення. Основна ідея стартап-проекту наведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка універсального приймально-передавального пристрою із застосуванням технології SDR	Організація зв'язку між персоналом підприємств	Забезпечення надійного зв'язку в умовах промислової забудови.
	Служби охорони підприємств	Високоякісні рішення для обробки сигналів та організації надійного зв'язку в критичних ситуаціях.
	Безпроводові системи малого радіуса дії	Забезпечення зв'язку в системах малого радіуса дії, можливість моделювання роботи системи за різних умов поширення радіохвиль

Проведемо порівняльний аналіз техніко-економічних характеристик власної ідеї стартап-проекту з наявними аналогами.

Сильні, слабкі та нейтральні характеристики наведено в табл. 4.2, де W – гірші значення (слабкі), N – нейтральні значення, S – кращі значення (сильні).

Попередніми конкурентами-аналогами є універсальний трансивер ICOM IC-7600 (1) та трансивера Alinco DX-SR9 (2) та трансивер SunSDR2 PRO (3).

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій проект	Конкуренти			W	N	S
			1	2	3			
1	Можливість роботи в ISM діапазоні частот	+	-	-	-			+
2	Вбудований акумулятор	+	-	-	-		+	
3	Зміна входних параметрів програмно	+	-	-	+			+
4	Низьке енергоспоживання	+	-	-	-			+
5	Програмування смуги проміжної частоти та вихідної потужності	+	-	-	-			+

Визначення слабких, нейтральних та сильних техніко-економічних характеристик ідеї є важливим етапом для формування конкурентоспроможності стартап-проекту. За результатами табл. 4.2 можемо спостерігати, що ідея стартапу має значні переваги в порівнянні з конкурентами.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Щоб показати можливість реалізації ідеї проекту, необхідно провести аудит технологій, їх наявність та доступність для розробника.

Технологічна здійсненість ідеї проекту наведена в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технології	Доступність технологій
1	Універсальний приймально-передавальний пристрій з використанням технології SDR	ADIsimSRD Design Studio	Є в наявності, в розробці/добробці немає необхідності	Доступні безкоштовно
2		Microsoft Visio	Є в наявності, в розробці/добробці немає необхідності	Доступні безкоштовно
<p>Обрана технологія реалізації ідеї проекту: для моделювання роботи прийомопередавача за різних умов поширення сигналу використано програмний пакет ADIsimSRD Design Studio, розробка схем виконана в Microsoft Visio.</p>				

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для визначення ринкових можливостей запуску стартап проекту необхідно здійснити попереднє дослідження характеристики потенційного ринку, наявності попиту, головних гравців, потреб потенційних клієнтів, якісної оцінки ринкового середовища, ризиків пов'язаних з проектами-конкурентів, середньої норми рентабельності.

В табл. 4.4 наведена попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	11620 млрд. грн (415 \$)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутність масового виробництва
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ЄСКД
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	69%

За результатами аналізу табл. 4.4 можна зробити висновок, що ринок інтегральних мікросхем є привабливим для входження за попереднім оцінюванням, чому сприяє позитивна динаміка ринку та хороший показник коефіцієнту рентабельності.

Визначення потенційних груп клієнтів та їх характеристик наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Необхідність в малоспоживчих та компактних трансиверах	Підприємства промислової автоматизації, систем безпеки та нагляду	Тривалий час роботи за відсутності зовнішніх джерел живлення	<ul style="list-style-type: none"> • Надійність; • обґрунтована ціна; <ul style="list-style-type: none"> • якість; • компактність.

Продовження таблиці 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
2	Необхідність попереднього тестування та моделювання поширення сигналів	Науково-дослідні організації	Використання безкоштовного оцінювального програмного забезпечення для дослідження особливостей роботи системи	<ul style="list-style-type: none"> • Можливість зміни початкових параметрів без зміни апаратної частини; • доступність.

Визначивши потенційні групи клієнтів проведемо аналіз ринкового середовища, а саме факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту та парешкоджають.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Наявність на ринку аналогів	Реалізувати розширення функціоналу, створити нове технічне завдання, внести зміни в дизайн.
2	Збій поставок інтегрованих мікросхем	Неналагодженість логістики	Мати декілька постачальників
3	Економічний	Обмежений фінансовий план на початку виходу продукту	Залучення інвесторів

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Роширення клієнтської бази	За допомогою вдалої маркетингової програми є змога залучити нових потенційних клієнтів	Розмістити рекламу в соціальних мережах, застосувати медійну та банерну Інтернет-реклами.
2	Чорний піар	Зниження клієнтської бази	Спростування за допомогою зворотнього зв'язку з клієнтами та реклами

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	Тип конкуренції: олігополія	Галузь в основному є конкурентною, проте існує декілька явних лідерів	Важко вийти на міжнародний рівень
2	За рівнем конкурентної боротьби: міжнародна	Конкуренти з різних країн світу	Розвиток на українських підприємствах та вихід на ринок
3	За галузевою ознакою: міжгалузева	Конкуренція між товаровиробниками, які діють у різних галузях	Розробка продукції для різних галузей
4	Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Створення кращої і якіснішої продукції

Продовження таблиці 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
5	За характером конкурентних переваг: цінова	Зниження цін на товари і послуги без істотної зміни їх якості й асортименту	Зменшити вартість
6	За інтенсивністю: марочна	Бренд має вплив на популярність продукту на ринку	Популяризація продукту для впізнаваності бренду

Більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі проведено за моделлю М. Портера.

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти в галузі	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	ICOM, Alinco, Експерт Електронікс	Наявність аналогів	Значення розміру поставок для постачальників	Лояльність та сприйняття продукту споживачем	Кращі технічні характер., ціна.

Продовження таблиці 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти в галузі	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Висновки:	Конкурентна боротьба неінтенсивна так, як прямі конкуренти більше спеціалізуються на іншому типі обладнання	Є можливості входу на ринок за рахунок гнучкості цін; потенц. конкур. є серед існуючих компаній	Постачальники не впливають на ринок	Клієнти мають вплив і потребують якісного інноваційного обладнання	Можливе обмеження ціни продукту

Висновки: аналіз конкуренції в галузі за М. Портером показав, що ми маємо можливість ввійти на ринок так, як конкурентна боротьба неінтенсивна і прямі конкуренти більше спеціалізуються на іншому типі обладнання, також проект повинен відповідати потребам споживачів, які в залежності від ситуації можуть змінюватись. Отримані результати були враховані при обґрунтуванні переліку факторів конкурентоспроможності в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ціна та собівартість продукції	Не завищена, конкурентна ціна.
2	Функціональність	Можливість збільшення або зміни функціоналу пристрою без зміни апаратної частини завдяки ПЗ
3	Раціональне використання	Використання обладнання з низьким енергоспоживанням

За визначеними факторами конкурентоспроможності, що наведені в табл. 4.10 проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з розроблюваним продуктом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ціна та собівартість продукції	12				+			
2	Функціональність	17		+					
3	Раціональне використання	16			+				

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • можливість врахування досвіду конкурентів; • швидке реагування на побажання клієнтів; • якість продукту; • багатofункціональність продукту; • продукт відповідає потребам споживачів. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • низька репутація підприємства на початку впровадження проекту в життя; • велика кількість конкурентів; • залежність від постачальника.
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> • отримати контракти на співпрацю з підприємствами; • вихід на міжнародний ринок. 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> • збій імпорту комплектуючих; • несприйняття продукту клієнтом.

За результатами табл. 4.12 SWOT-аналізу необхідно розробити перелік заходів, що посприяють виведенню стартап-проекту на ринок в запланований орієнтовний час.

В табл. 4.13 наведено альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту.

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Проведення конференцій та публічних виступів	Висока	5-6 місяців
2	Співпраця та укладення договорів з науково-дослідними організаціями	Середня	6-12 місяців

Завдяки використанню SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки стартап-проекту, а саме проведення конференцій та публічних виступів, розраховано оптимальний час, який необхідний для реалізації стартапу на ринку, з урахуванням проектів потенційних конкурентів.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

На початку планування та розроблення ринкової стратегії доцільно зробити аналіз та опис цільових груп потенційних клієнтів.

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Науково-дослідні організації	Висока	Високий	Середня	Легкий

Продовження таблиці 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
2	Підприємства промислової автоматизації	Середня	Середній	Висока	Помірно-складний
3	Малі приватні підприємства	Висока	Високий	Середня	Легкий
Необхідно працювати зі всіма цільовими групами, однак спершу надати перевагу науково-дослідним організаціям та малим приватним підприємствам.					

Базову стратегію розвитку в обраних сегментах наведено в табл. 4.15.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Проведення конференцій та маркетингової кампанії	На першому місці цільові групи з високою готовністю сприйняти продукт	Доступна ціна, відкритий доступ для науково-дослідних організацій	Стратегія лідерства по витратах

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект "першопрохідцем" на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Проект не є першопрохідцем	Компанія буде формувати свою цільову групу клієнтів та забирати у конкурентів	Основні характеристики товару будуть схожими	Стратегія наслідування лідеру

В якості стратегії конкурентної поведінки обрано стратегію наслідування, що передбачає підприємства з невеликою часткою ринку, які вибирають адаптивну лінію поведінки на ринку.

За результатами попередніх досліджень сформовано стратегію позиціонування, що наведена в табл. 4.17.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто-спроможні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Багатофункціональність, якість, портативність, автономність.	Стратегія лідерства по витратах	Надійність, гнучкість, відповідність ціна-якість	Універсальний, портативний, трансивер

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Розроблення маркетингової програми стартап-проекту передбачає формування маркетингової концепції товару, яку отримає споживач (табл. 4.18).

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Універсальність	Можливість зміни вхідних параметрів та характеристик ситеми програмно	Програмування смуги проміжної частоти та вихідної потужності, зміна параметрів без зміни апаратної частини.
2	Низьке енергоспоживання, автономний режим роботи	Раціональне використання енергоресурсів	Робота від акумулятора

Таблиця 4.19. – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Приймально-передавальний пристрій із застосуванням технології SDR, що дозволяє користувачу програмно встановлювати/змінювати робочі вхідні параметри: форму сигналу, потужність, чутливість, метод модуляції/демодуляції, діапазон частот і т.д.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. тип модуляції	Нм	Тх
	2. низьке енергоспоживання	М	Тх/Е
	3. модульна структура	М	Тх
	4. швидкість передавання даних	Нм	Тх
5. діапазон частот	Нм	Тх	

Продовження таблиці 4.19. – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
II. Товар у реальному виконанні	Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування.
	Пакування: пінопласт, картонна коробка.
	Марка: "USDR".
III. Товар із підкріпленням	До продажу: потребує ознайомлення з роботою товару.
	Після продажу: технічна підтримка клієнтів.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патенту та комерційної таємниці.	

Встановлення ціни на потенційний товар включає визначення цінових меж, аналіз ціни аналогів та рівень доходів цільової групи споживачів.

В табл. 4.20 наведено визначення меж встановлення ціни.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі становлення ціни на товар/послугу
1	20 – 500 тис. грн.	20 – 400 тис. грн.	1 млн. грн.	15 – 100 тис. грн.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Клієнти купують продукт у компанії-виробника	Налагодження зв'язків з клієнтами	Однорівневий або нульовий (виробник продає товар клієнту)	Через сайт виробника

За результатами аналізу табл. 4.21 оптимальною системою збуту обрано сайт виробника.

Завершальний етап маркетингової програми передбачає розроблення концепції маркетингових комунікацій, що ґрутується на специфіці поведінки цільових клієнтів, концепції рекламного звернення, ключових позиціях обраних для позиціонування (табл. 4.22).

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Дізнаються про продукт з реклами в Інтернеті, соціальних мереж, конференцій	Інтернет, соціальні мережі, конференції	Відповідна ціна, технічні характеристики	Поширення інформації про продукт, популяризація	Наведення переваг пристрою та його можливостей

Проаналізувавши специфіку поведінки цільових клієнтів, обрано концепцію рекламного звернення, що має відображати головні переваги приймально-передавального пристрою. Росповсюдження реклами та популяризація продукту буде відбуватися через Інтернет, соціальні мережі та планові конференції для презентації продукту.

Висновки до розділу

Розглянувши загальний аналіз здійснення ідеї стартап-проекту можемо дійти висновку, що потенційний ринок є привабливим для входження та має позитивну динаміку. Потреба в багатofункціональних малоспоживчих та компактних трансиверах з можливістю попереднього тестування та моделювання поширення сигналів є актуальною для підприємств промислової автоматизації, малих підприємств та науково-дослідних організацій. Завдяки порівняльному аналізу техніко-економічних характеристик власної ідеї стартап-проекту з наявними аналогами, визначено сильні сторони пристрою: можливість роботи в ISM-діапазоні, програмування смуги проміжної частоти та вихідної потужності передавача, низьке енергоспоживання.

В якості стратегії конкурентної поведінки обрано стратегію наслідування, що передбачає підприємства з невеликою часткою ринку, які вибирають адаптивну лінію поведінки на ринку.

Враховуючи, що глибина каналу збуту продукції має однорівневий рівень, обрано оптимальну систему збуту – сайт виробника. Відповідно реклама буде поширюватися через Інтернет та соціальні мережі, а також популяризація продукту передбачає відкриті планові конференції.

ВИСНОВКИ

Вирішення необхідності створення універсальних приймально-передавальних пристроїв можливе завдяки використанню технології програмно-визначуваного радіо, що дозволяє змінювати тип модуляції/демодуляції, форму сигналу, потужність передавача, чутливість приймача, діапазон частот та характеристики радіосистеми програмно без зміни конфігурації апаратної частини. В результаті виконання магістерської дисертації розроблено портативний прийомопередавач із застосуванням технології SDR для роботи в умовах промислової забудови на підприємстві.

Під час виконання роботи отримано такі висновки:

1. Супергетеродинний тип прийомопередавачів на відміну від трансиверів прямого перетворення, може працювати в більшому діапазоні частот, має кращу вибірковість та чутливість, тому для побудови портативного трансивера обрано ІМС ADF7023.

2. Перевагами ІМС ADF7023 є можливість підтримувати FSK/GFSK/OOK/MSK типи модуляцій, швидкість передавання інформації до 300 кбіт/с, наднизьке енергоспоживання 24 мА в режимі передавання при вихідній потужності 10 дБм, робота в ISM-діапазоні, доступна вартість, програмування смуги проміжної частоти та вихідної потужності.

3. Для досягнення дальності зв'язку згідно вимог технічного завдання, доцільно збільшувати коефіцієнти приймальної та передавальної антен при поширенні сигналу в умовах промислової забудови до 15 дБ.

4. Враховуючи характеристики та цикл роботи прийомопередавача 5/5/90 від одного заряджання акумулятора, 12-годинну робочу зміну працівників, визначено, що портативний прийомопередавач може працювати упродовж 72 годин від акумулятора ємністю 1500 мА/год.

5. Для розробки принципової схеми доцільно використовувати однокристалні ІМС елементів з низьким енергоспоживанням для зменшення

розмірів портативних прийомопередавачів та тривалої роботи від автономного джерела живлення.

6. В реалізованій принциповій схемі прийомопередавача на основі ІМС ADF7023, 16-бітного високопродуктивного мікроконтролера R5F100GEAFB, пристроїв вводу та виводу інформації використано лінійні стабілізатори напруги ADP150 та ADP3300 з наднизьким шумом та малим падінням напруги для захисту елементів від короткого замикання, перегрівання та збільшення терміну роботи акумулятора радіосистеми в жорстких умовах використання пристрою.

7. Аналіз здійснення ідеї стартап-проекту доводить, що потреба в багатофункціональних малоспоживчих та компактних трансиверах з можливістю попереднього тестування та моделювання поширення сигналів є актуальною для підприємств промислової автоматизації, малих підприємств та науково-дослідних організацій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Collins T., Getz R., Pu D., Wyglinski A.. Software-Defined Radio for Engineers. 2018. pp. 171-173. ISBN 9781630814571.
2. Designing With Confidence for Military SDR Production Applications. 2018. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/wp/wp-01020.pdf> (Дата звернення: 10.09.2020).
3. Siu C., Iniewski K.. IoT and low-power wireless: circuits, architectures, and techniques. Canada: Taylor & Francis Group, 2018. pp. 2-3. ISBN 9780815369714, 9781351251662.
4. Architecture and Component Selection for SDR Applications. 2018. URL: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/wp/sdr_sdram.pdf (Дата звернення: 15.09.2020).
5. SDRs, ADCs, and DACs for High-Speed Communication. URL: <https://www.pentek.com/CATFiles/SDRsADCsDACs.pdf> (Дата звернення: 25.09.2020).
6. Analog Devices. High Performance, Low Power, ISM Band FSK/GFSK/OOK/MSK/GMSK Transceiver IC ADF7023. URL: <https://www.analog.com/en/products/adf7023.html#product-overview> (Дата звернення: 30.09.2020).
7. Analog Devices. Dual Narrow/Wideband RF Transceiver ADRV9002. URL: <https://www.analog.com/en/products/adrv9002.html> (Дата звернення: 02.10.2020).
8. Teschler L.. Software-defined radio powers the IoT. 2018 URL: <https://www.microcontrollertips.com/software-defined-radio-powers-the-iot-tag31/> (Дата звернення: 05.10.2020).
9. Phase Locked Loop (PLL) in a Software Defined Radio (SDR). URL: <https://wirelesspi.com/phase-locked-loop-pll-in-a-software-defined-radio-sdr/> (Дата звернення: 05.10.2020).

10. ADIsimSRD Design Studio. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/landing-pages/001/adisimsrd-design-studio.html>. (Дата звернення: 11.11.2020).
11. Low Power RF Transceivers. URL: [https://www.analog.com/en/parametricsearch/10623#/.](https://www.analog.com/en/parametricsearch/10623#/) (Дата звернення: 11.11.2020).
12. Datasheet R5F100GEAFB#V0 Renesas Electronics. URL: https://www.renesas.com/us/en/products/microcontrollers_microprocessors/r178/r178g1x/r178g13/device/R5F100GEAFB.html#overviewInfo. (Дата звернення: 11.11.2020).
13. FT232RQ-REEL, преобразователь USB-UART. URL: <https://www.chipdip.ru/product/ft232rq>. (Дата звернення: 12.11.2020).
14. Molex Connector Part Number - 502570-0893. URL: https://www.ru.molex.com/molex/products/part-detail/memory_card_socket/5025700893. (Дата звернення: 12.11.2020).
15. EA DOGM128-6 Datasheet by Display Visions. URL: <https://www.digikey.com/htmldatasheets/production/1605511/0/0/1/ea-dogm128-6.html>. (Дата звернення: 13.11.2020).
16. SSM2301 Datasheet and Product Info. Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/en/products/ssm2301.html> (Дата звернення: 13.11.2020).
17. Аккумулятор Kenwood KNB-29N. URL: <https://kenwood.org.ua/aksessuary/aksessuary-k-port/knb-29n> (Дата звернення: 13.11.2020).
18. ADP3300 Datasheet and Product Info Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/en/products/adp3300.html#product-overview> (Дата звернення: 15.11.2020).
19. ADP150 Техническое описание и информация о продукте. URL: <https://www.analog.com/en/products/adp150.html>. (Дата звернення: 16.11.2020).

ДОДАТОК А
ABSTRACT

ABSTRACT

The astonishing, sometimes bewildering array of available wireless standards, with their different frequencies, bandwidths, protocols, and formats, has given users unprecedented connectivity and access. However, it has also meant that engineers of wireless systems are faced with severe challenges when designing or investigating issues, performance, and options.

The solution seems obvious: minimize use of dedicated hardware, and instead rely on a software-defined radio (SDR) to implement and manage as much of the transmitting and receiving functionality as possible. Today's high-performance, low-power processors, including FPGAs, and their ability to execute complicated algorithms at high speed make such real-time implementation practical.

Software-defined radio (SDR) is a radio communication and signal-processing system in which certain functions typically carried out by hardware components are instead performed by software. Replacing specific hardware with software creates a flexible, high-performance system that's unattainable by hardware-only systems.

An SDR typically consists of an SDR platform and a computer or embedded system containing appropriate software. SDRs come in various flavors with a wide range of capabilities. While functionality is controlled by software, the level of capability depends on the given SDR platform.

The essential functions of SDRs are receiving and transmitting radio signals and, in some systems, digital signal processing. SDRs capable of transmitting or receiving only are called transmitters or receivers, respectively, while SDRs that perform both functions are called transceivers.

The radio front end (RFE) contains most of the components that have been replaced with software. The configurable RFE of SDRs is what gives them their flexibility and versatility. Components in the RFE include filters, mixers, amplifiers, variable-frequency oscillators/tuners, and I and Q converters. In radio-frequency (RF) reception, these components are responsible for setting the SDR to the right band, frequency, and bandwidth, as well as for preparing the received signals for analog-to-

digital conversion. In RF transmission, the RFE prepares signals converted from digital to analog for transmission at the right frequency.

The analog-to-digital converters (ADCs) in a receive-board radio chain converts the I and Q signals received from the RFE to digital signals that can be processed by the digital signal processor (DSP). Digital-to-analog converters (DACs) are used in transmit-board radio chains to convert digital signals from the DSP to analog signals.

The DSP processes received signals into data before sending them to the host computer. It also processes data from the host computer into signals that can be transmitted. Data is transferred between the DSP and the host system via digital backhaul. Depending on the SDR platform, the DSP may be implemented using field-programmable gate arrays (FPGAs), a hard processor system (HPS), application-specific ICs (ASICs), or a combination of more than one of these.

In some SDR systems that don't have DSPs, digital signal processing is carried out by the host computer's processor.

In receive-board radio chains, the host system is at the end of the chain. It presents the data contained in the received signals. This could be via data processing, imaging, payload decryption, tracking, and many others. The host system in transmission chains prepares the data to be transmitted before sending it to the DSP.

The digital signal processing module consists of digital signal processor (DSP) and a variety of programmable digital chips. The programmable digital chips contain Application Specific Integrated Circuit (ASIC), Field-Programmable Gate Array (FPGA), Graphics Processing Units (GPUs), General Purpose Processors (GPP) or a combination thereof. ASICs perform signal down-conversion, digital filtration, and perform at higher speed than FPGAs. Traditionally smaller in size, ASIC chips are designed for specific purposes, and therefore, are not re-programmable. So it is a dedicated device which is more power efficient than GPP. Due to the operation-specific nature of ASIC chips, each chip must be designed for a specific application, and can then be reproduced cost effectively. FPGAs are completely programmable devices which can perform a variety of user-defined tasks including digital down-conversion, signal processing and filtration. It is a test bed for large circuit formed by programmable DSPs (pDSP) and other design elements. FPGA consists of many small identical logic blocks. Mid-level programming language called Hardware Description Language

(HDL) is used for writing circuit on a given FPGA. FPGA can be reconfigured to emulate different signals. They provide necessary functions of radio and portability using less power than GPP. FPGA draws more power and generates more heat than pDSP. Again HDL code is not as much portable as C++. FPGA source code only works on specific FPGA type and HDL code can be recompiled separately for each individual FPGA type. So while moving from one hardware platform to another different time is required thus it fails the demand of real time processing. So we can say FPGA does not satisfy the fundamental objective of SDR that software is independent of hardware. In this context, we can say, FPGAs are computationally powerful, relatively power efficient but inflexible, and it is difficult to implement new modules in them.

Finally, GPP is one of the most popular solutions for SDR implementations and prototypes due to their high level of flexibility with respect to reconfigurability. The advantages of using GPP is that here programs are written in high level languages like C++. Any program can run on any computer, once a suitable compiler has been implemented. This provides functions portability in SDR. GPP architecture contains Arithmetic and Logic Unit (ALU), Instruction decoder circuit, Control store and Clock. Entire system is tied to clock to maintain synchronization across all the elements of this central processing unit (CPU). CPU performs simple arithmetic operations such as addition, shift etc. but not complex functions like multiplication. But multiplication is very common task for digital signal processing. To multiply two numbers GPP performs extended sequence of shifts and addition which requires many clock cycles. So there is a risk that GPP might not be fast enough every time to handle real time operation for signal synthesis and interpretation.

However, since GPPs are not specialized for mathematical computations, they can be very power inefficient.

Because of their high functionality and capabilities, which include broad frequency range, high bandwidth, and advanced signal processing, SDRs are found in applications across numerous fields and industries. These include medical, aerospace, broadcasting, defense, civil communication, and virtually all fields that employ radio technology. Five specific applications for which SDR is immensely beneficial and indispensable are radar, MRI, GNSS, test and measurement, and low-latency links.

SDRs are used in radar applications as transmitters, receivers for returning signals, and DSPs. They can also be configured to work as transponders that only transmit signals when triggered by incoming signals. SDRs are used in primary and secondary radars, general pulse radars, maximum range resolution radars, and the like.

In Global Navigation Satellite System (GNSS) applications, SDR receivers on a device receive signals from satellites in a satellite navigation system's constellation. The DSP processes the received signals to calculate the device's position. SDRs are employed in GNSS for locating and tracking missiles, drones, aircraft, vehicles, and more.

After setting up a radio system, it's necessary to thoroughly check that all operations are going smoothly. The same goes for manufactured equipment. SDRs are used to test various radio equipment and systems, reducing development time and time to market. SDRs are used to set up low-latency links for wireless point-to-point communication systems. The use of SDRs helps reduce receive and transmit latency as well as round-trip latency.

The features of SDR have numerous advantages and benefits in the above-listed applications. Three key beneficial features of this technology are the architecture, configuration, and bandwidth.

An SDR can seamlessly communicate with multiple radios that support different wireless standards. It can also perform bridging between radios as a single multi-channel and multi-standard SDR can act as a translator for all the radios dedicated to a particular frequency.

Also SDR can take advantage of underutilized spectrum with the help of cognitive radio which always senses if some spare spectrum is present there in the surroundings environment. If the owner or primary user of the spectrum is not using it, an SDR can borrow the spectrum and assign it to a secondary user until the owner requires it again. This technique has the potential to dramatically increase the optimal use of available spectrum.

ДОДАТОК Б
ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію
"Універсальний приймально-передавальний пристрій
із застосуванням технології SDR"

1 Назва роботи

Універсальний приймально-передавальний пристрій із застосуванням технології SDR

2 Підстави для виконання

Робота проводиться на підставі завдання на магістерську дисертацію відповідно до наказу № 3241-с від 05.11.2020 р.

3 Мета та актуальність роботи

Метою роботи є розробка універсального приймально-передавального пристрою з можливістю встановлення або зміни вхідних робочих параметрів програмним забезпеченням для реалізації безпроводової мережі зв'язку на підприємстві в ISM діапазоні.

Сьогодні використання програмного забезпечення дозволяє розширити функціональні можливості приймально-передавальних пристроїв, скорочує час розробки завдяки моделюванню, надає оперативність та гнучкість в управлінні.

4 Основні технічні вимоги до виконання роботи

4.1 Вимоги до універсального приймально-передавального пристрою із застосуванням технології SDR

4.1.1 Прийомопередавач повинен забезпечувати якісний зв'язок як в приміщенні, так і безпосередньо на відкритій території.

4.1.2 Налаштування прийомопередавача повинно здійснюватися програмним забезпеченням.

4.1.3 Прийомопередавач має працювати у симплексному чи дуплексному режимах.

4.1.4 Обрив чи коротке замикання в антенно-фідерному тракті не повинно призводити до пошкодженості передавача під час його роботи.

4.2 Технічні характеристики для універсального приймально-передавального пристрою із застосуванням технології SDR

4.2.1 Діапазон робочих частот 434 МГц.

4.2.2 Чутливість приймача не менше -110 дБм.

4.2.3 Відношення сигнал/шум не менше -35 дБ.

4.2.4 Максимальна вихідна потужність передавача не менше 1 Вт.

4.2.5 Швидкість передання даних від 1 кбіт/с до 300 кбіт/с.

4.2.6 Дальність зв'язку до 100 м в умовах промислової забудови.

4.2.7 Час неперервної роботи від акумулятора не менше 12 годин.

5 Вимоги до технологічності

Пристрій повинен бути виконаний на елементній базі широкого застосування та відкритих стандартах і технологіях. Конструкція пристрою має передбачати багатократну заміну комплектуючих за необхідності. Пристрій має володіти вібро- та ударостійкістю до пошкоджень.

6 Вимоги до рівня уніфікації

В конструкції необхідно намагатись максимально використовувати стандартні компоненти та уніфіковані вироби, а також запозичених складальних одиниць та деталей.

7 Вимоги до безпеки

По відношенню до безпеки пристрій, що працює повинен відповідати вимогам ДСТУ 4113-2001 і забезпечувати електробезпеку, пожежну безпеку, механічну надійність та інші вимоги при монтажі, експлуатації, обслуговуванні і ремонті.

8 Економічні показники

Розроблювальний пристрій повинен бути ефективним по відношенню до його виробництва з економічної точки зору. Схемні рішення повинні мати мінімальну вартість реалізації.

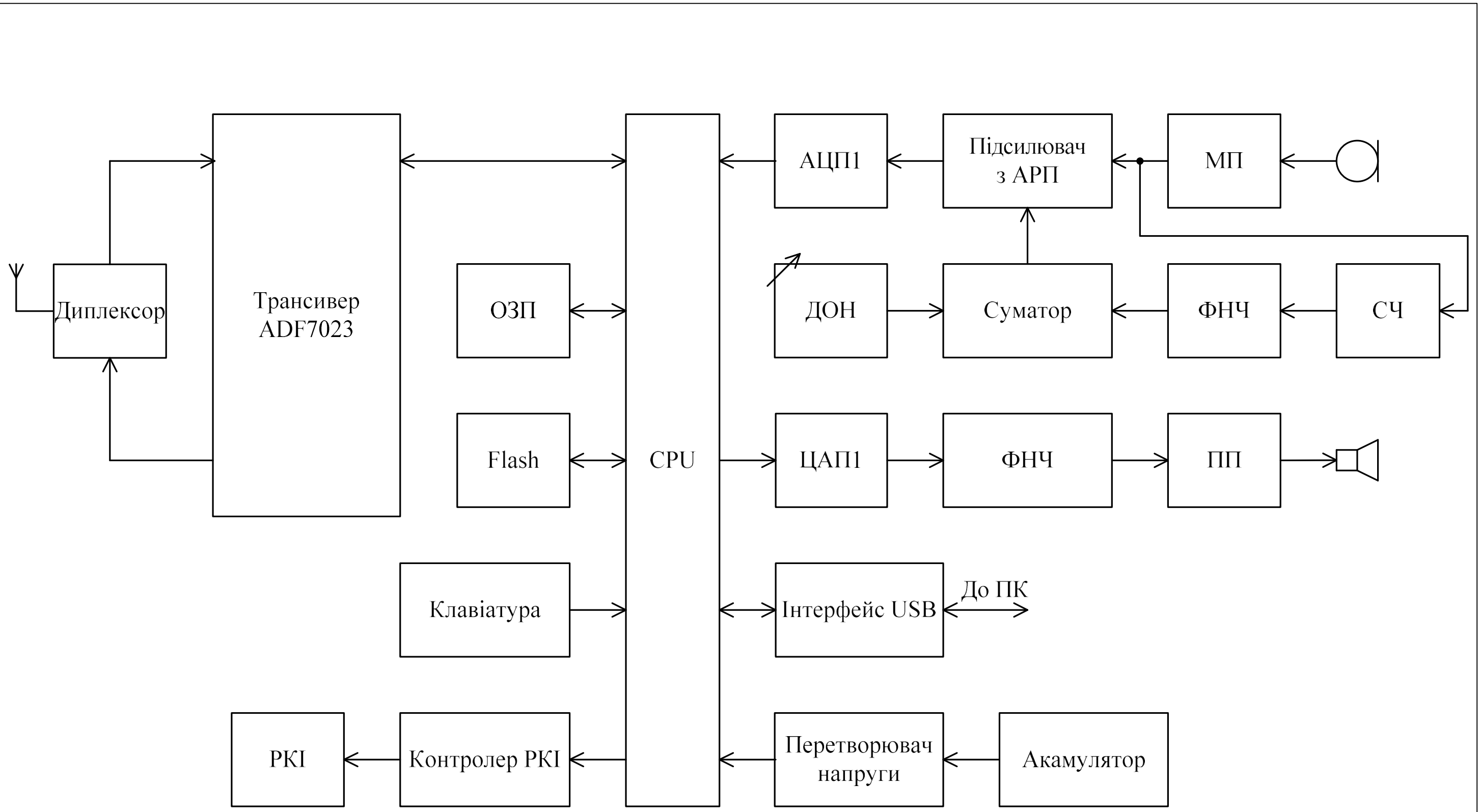
9 Стадії та етапи розробки

Розробка виконується в один етап.

10 Порядок приймання роботи

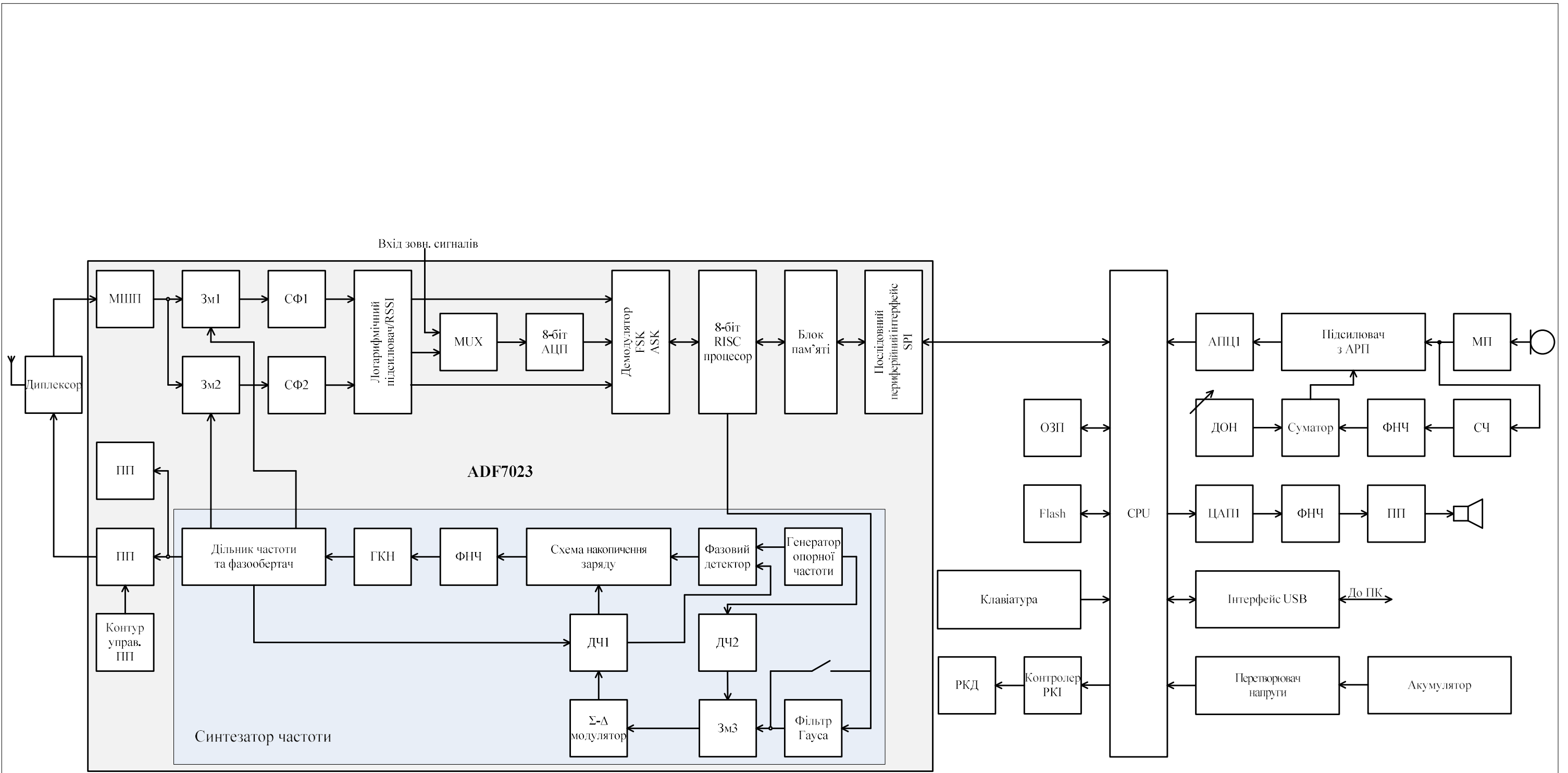
Робота приймається Державною екзаменаційною комісією.

ДОДАТОК В
СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУКТУРНА
на магістерську дисертацію
"Універсальний приймально-передавальний пристрій
із застосуванням технології SDR"



					ЕТДФ.464325.024.Е1			
					Структурна схема приймопередавача	Літера	Маса	Масштаб
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Тигаренко	<i>[Signature]</i>	1.12.20				
Перевірив		Макаренко	<i>[Signature]</i>	1.12.20				
Т. контр.					Аркуш 1	Аркушів 1		
Н. контр.					НТУУ "КПІ" ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, ДВ-92мп			
Затверд.		Макаренко	<i>[Signature]</i>	1.12.20				

ДОДАТОК Г
СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ФУНКЦІОНАЛЬНА
на магістерську дисертацію
"Універсальний приймально-передавальний пристрій
із застосуванням технології SDR"



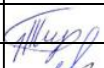
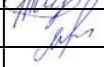
				ЕТДФ.464325.024.Е2				
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Функціональна схема приймопередавача	Літери	Маса	Масштаб
Розроб.	Титаренко			1.1.20		Аркул 1		Аркулів 1
Перевір.	Макаренко			1.1.20				
Т. контр.								
Н. контр.								
Затверд.	Макаренко			1.1.20				

НТУУ "КПІ" ім. Ігоря Сікорського, ФЕ.Л. ДВ-92м

ДОДАТОК Д
ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ
на магістерську дисертацію
"Універсальний приймально-передавальний пристрій
із застосуванням технології SDR"

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кільк.	Примітка
		Конденсатори		
	C1	GRM1555C1H271JA01D-270 пФ \pm 5%	1	Murata
	C2,C3	GRM1555C1H3R9CZ01D-3,9 пФ \pm 0,25 пФ	2	Murata
	C4	GRM1555C1H271JA01D-270 пФ \pm 5%	1	Murata
	C5	GRM1555C1H101JZ01D-100 пФ \pm 5%	1	Murata
	C6	GRM1555C1H4R7BA01D-4,7 пФ \pm 0,25 пФ	1	Murata
	C7	GRM1555C1H180JZ01D-18 пФ \pm 5%	1	Murata
	C8	GRM155R61A154KE19D-150 нФ \pm 5%	1	Murata
	C9	GRM155R61A224KE19D-220 нФ \pm 10%	1	Murata
	C10	GRM1555C1H2R7BA01D-2,7 пФ \pm 0,1 пФ	1	Murata
	C11	6R3R14X106MV4T-10 мкФ \pm 20%	1	Johanson Dielectrics
	C12	GRM155R61A224KE19D-220 нФ \pm 10%	1	Murata
	C13	GRM1555C1H101JZ01D-100 пФ \pm 5%	1	Murata
	C14...C16	GRM155R61A224KE19D-220 нФ \pm 10%	3	Murata
	C17, C18	GRM1555C1H180JZ01D-18 пФ \pm 5%	2	Murata
	C19	GRM1555C1H101JZ01D-100 пФ \pm 5%	1	Murata
	C20, C21	GRM155R61A224KE19D-220 нФ \pm 10%	1	Murata
	C22	GRM1555C1H101JZ01D-100 пФ \pm 5%	1	Murata
	C23, C24	GRM1555C1H5R6DZ01D-5,6 пФ \pm 5%	2	Murata
	C25	GRM155R61A224KE19D-220 нФ \pm 10%	1	Murata
	C26	GRM155R71H152KA01D-1,5 нФ \pm 5%	1	Murata
	C27, C28	GRM1555C1H2R7BA01D-2,7 пФ \pm 0,1 пФ	2	Murata
	C29, C30	GRM155R71C104KA88D -100 нФ \pm 10%	2	Murata
	C30	GRM1532C1H101JDD5-100 пФ \pm 5%	1	Murata
	C31	C1005X5R1C105K050BC-4,7 мкФ \pm 20%	1	TDK
	C32, C33	C1005C0G1H080D050BA-8 пФ \pm 0,5 пФ	2	TDK
	C34, C35	C1005C0G1H5R6D-5,6 пФ \pm 0,5 пФ	2	TDK
	C36	C1005X5R1C105K-1 мкФ \pm 10%	1	TDK
	C37	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK
	C38	C1005X5R1C105K-1 мкФ \pm 10%	1	TDK
	C39	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK
	C40	C1005X5R1C105K-1 мкФ \pm 10%	1	TDK

ЕТДФ.464325.024.ПЕ

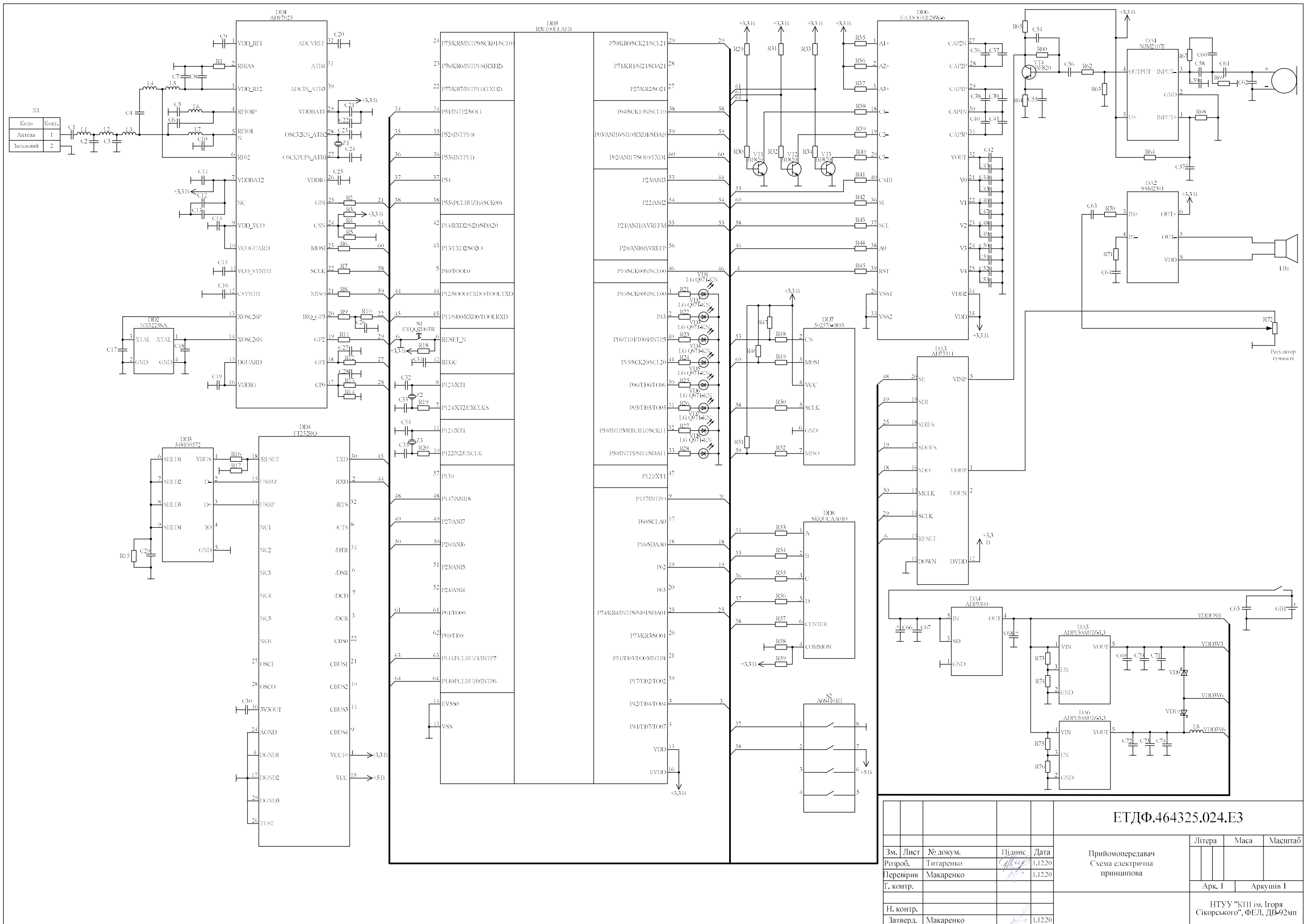
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Титаренко		1.12.20	Універсальний приймально-передавальний пристрій із застосуванням технології SDR	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Макаренко		1.12.20			1	5
Н. контр.					НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", ФЕЛ, ДВ-92 мп			
Затверд.		Макаренко						

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кільк.	Примітка	
	C41	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C42	C1005X5R1C105K-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C43	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C44	C1005X5R1C105K-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C45	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C46	C1005X5R1C105K-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C47	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C48	C1005X5R1C105K-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C49	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C50	C1005X5R1C105K-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C51	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C52	C1005X5R1C105K-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C53	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C54	RD72A474K1M1H03A-470 нФ \pm 10%	1	Murata	
	C55	GRM43DR72J104KW01L-0,1 мкФ \pm 10%	1	Murata	
	C56	GRM55DR72E105KW01L-1 мкФ \pm 10%	1	Murata	
	C57	GRM32DR71E106KA12L-10 мкФ \pm 10%	1	Murata	
	C58	GRM188R71H822KA01D-8200 пФ \pm 5%	1	Murata	
	C59	GRM43DR72J104KW01L-0,1 мкФ \pm 10%	1	Murata	
	C60	GRM033R71C332KA88D-3300 пФ \pm 10%	1	Murata	
	C61	GRM31M5C1H473JA01L-0,047 мкФ \pm 5%	1	Murata	
	C62	GRM1885C1H471JA01D-470 пФ \pm 5%	1	Murata	
	C63, C64	GRM1853U1A103JA44-10 нФ \pm 5 %	2	Murata	
	C65	GRM188R71H103KA01D-0,01 мкФ \pm 10%	1	Murata	
	C66	GRM43DR72J104KW01L-0,1 мкФ \pm 10%	1	Murata	
	C67	GRM31MR71C225KA35L-2,2 мкФ \pm 10%	1	Murata	
	C68	GRM32DR71E106KA12L-10 мкФ \pm 10%	1	Murata	
	C69	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C70	GRM188R60J106ME47D-1 мкФ \pm 20%	1	Murata	
	C71	GRM155R71C104KA88D-100 нФ \pm 10%	1	Murata	
	C72	C1005X5R1C105K050BC-1 мкФ \pm 10%	1	TDK	
	C73	GRM188R60J106ME47D-1 мкФ \pm 20%	1	Murata	
	C74	GRM155R71C104KA88D-100 нФ \pm 10%	1	Murata	
			ЕТДФ.464325.024.ПЕ		Арк.
					2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кільк.	Примітка
		Мікросхеми		
	DD1	ADF7023	1	Analog Devices
	DD2	NX3225SA	1	NDK
	DD3	548190572	1	Molex
	DD4	FT232RQ	1	FTDI
	DD5	R5F100LLAFB	1	Renesas Electronics
	DD6	EA DOGM128W	1	Electronic Assembly
	DD7	502570-0893	1	Molex
	DD8	SKQUCAA010	1	Alps Alpine
	DA1	NJM2107F	1	NJR
	DA2	SSM2301	1	Analog Devices
	DA3	AD73311	1	Analog Devices
	DA4	ADP3300	1	Analog Devices
	DA5, DA6	ADP150	2	Analog Devices
		Індуктивності		
	L1	0402CS-33NXJL-33 нГн \pm 5%	1	Coilcraft
	L2	0402CS-82NXJL-82 нГн \pm 5%	1	Coilcraft
	L3	0402CS-33NXJL-33 нГн \pm 5%	1	Coilcraft
	L4	0402CS-13NXJL-13 нГн \pm 5%	1	Coilcraft
	L5	0402CS-R10XJL-100 нГн \pm 5%	1	Coilcraft
	L6	0402CS-41NXJL-41 нГн \pm 5%	1	Coilcraft
	L7	0402CS-30NXJL-30 нГн \pm 5%	1	Coilcraft
	L8	0402CS-13NXJL-13 нГн \pm 5%	1	Coilcraft
		Резистори		
	R1	MCR01MZPF3602-36 кОм \pm 1%	1	Rohm
	R2	PVG3A500C01-50 Ом \pm 20 %	1	Murata
	R3	RMCF0402FT49R9-49,9 Ом \pm 1%	1	Stackpole Electronics
	R4	PVG3A500C01-50 Ом \pm 20 %	1	Murata
	R5	MCR01MZPF3602-36 кОм \pm 1%	1	Rohm
	R6...R8	PVG3A500C01-50 Ом \pm 20 %	3	Murata
	R9	MCR01MZPF3602-36 кОм \pm 1%	1	Rohm
				Арк.
			1.12.20	ЕТДФ.464325.024.ПЕ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
				3

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кільк.	Примітка		
	R10	PVG3A500C01-50 Ом \pm 20 %	1	Murata		
	R11...R13	PVG3A500C01-50 Ом \pm 20 %	3	Murata		
	R14	MCR01MZPF1003-100 кОм \pm 1%	1	Rohm		
	R15	RC0402FR-0710KL-10 кОм \pm 1%	1	Yageo		
	R16	ERJ-2RKF4701X-4,7 кОм \pm 1%	1	Panasonic		
	R17	RC0402FR-0710KL-10 кОм \pm 1%	1	Yageo		
	R18	ERJ-2RKF4701X-4,7 кОм \pm 1%	1	Panasonic		
	R19, R20	PVG3A500C01-50 Ом \pm 20 %	2	Murata		
	R21...R28	MCR01MZPJ271-270 Ом \pm 5%	8	Rohm		
	R29	RMCF0402FT49R9-49,9 Ом \pm 1%	1	Stackpole Electronics		
	R30	PVG3A500C01-50 Ом \pm 20 %	1	Murata		
	R31	RMCF0402FT49R9-49,9 Ом \pm 1%	1	Stackpole Electronics		
	R32	PVG3A500C01-50 Ом \pm 20 %	1	Murata		
	R33	RMCF0402FT49R9-49,9 Ом \pm 1%	1	Stackpole Electronics		
	R34	PVG3A500C01-50 Ом \pm 20 %	1	Murata		
	R35...R45	MCR01MRTF33R0-33 Ом \pm 1%	11	Rohm		
	R48...R52	MCR01MZPF3602-36 кОм \pm 1%	4	Rohm		
	R53...R58	PVG3A500C01-50 Ом \pm 20 %	3	Murata		
	R59	RC0402FR-0710KL-10 кОм \pm 1%	1	Yageo		
	R60	MCR100JZHJ473-47 кОм \pm 5%	1	Rohm		
	R61	MCR100JZHJ101-100 Ом \pm 5%	1	Rohm		
	R62	MCR100JZHJ272 -2,7 кОм \pm 1%	1	Rohm		
	R63	RC0402FR-0710KL-10 кОм \pm 1%	1	Yageo		
	R64	MLFA25FTC3K90-3,9 кОм \pm 1%	1	Stackpole Electronics		
	R65	MCR03ERTF5600-560 Ом \pm 1%	1	Rohm		
	R66	MCR100JZHJ272 -2,7 кОм \pm 1%	1	Rohm		
	R67	MCR01MZPF8203 -820 кОм \pm 1%	1	Rohm		
	R68	MLFA25FTC3K90-3,9 кОм \pm 1%	1	Stackpole Electronics		
	R69	RC0201FR-0718KL-18 кОм \pm 1 %	1	Yageo		
	R70...R71	NRC04F1501TRF-1,5 кОм \pm 20 %	2	NIC Components		
	R72	PVZ3A104C01-100 кОм \pm 30 %	1	Murata		
	R73...R76	MCR01MZPF3602-36 кОм \pm 1%	4	Rohm		
		Транзистори				
	VT1...VT4	BF820	4	Nexperia		
			ЕТДФ.464325.024.ПЕ		Арк.	
					1.12.20	4
Зм.	Арк.	№ докум.			Підпис	Дата

ДОДАТОК Е
СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА
на магістерську дисертацію
"Універсальний приймально-передавальний пристрій
із застосуванням технології SDR"



ЕТДФ.464325.024.Е3

Зм. Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Приймопередавач Схема електрична принципова	Літера	Маса	Масштаб
Розроб.	Титаренко	<i>[Signature]</i>	1.12.20				
Перевірив	Макаренко	<i>[Signature]</i>	1.12.20				
Т. контр.							
Н. контр.							
Затверд.	Макаренко	<i>[Signature]</i>	1.12.20				

Арк. 1 | Аркушів 1

НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕЛ, ДВ-92мп