

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Центральноукраїнський національний технічний університет**

**Кафедра кібербезпеки та програмного забезпечення**

На правах рукопису

Калюжний Ростислав Ігорович

**Програмне забезпечення системи моделювання архітектури 5G NR**

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітній ступінь: бакалавр

Науковий керівник:

**Якименко Наталія Миколаївна**

(підпис)

(дата)

кандидат фізико-математичних наук, доцент

**ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ**

**Завідувач кафедри**

О.А. Смірнов

(підпис)

ПБ

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р.

Міністерство освіти і науки України  
Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет Механіко-технологічний  
Кафедра Кібербезпеки та програмного забезпечення  
Освітній ступінь бакалавр  
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
д.т.н., проф.  
О.А.Смірнов  
« 11 » січня 2021 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

*Калюжному Ростиславу Ігоровичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Програмне забезпечення системи моделювання архітектури 5G NR*

керівник роботи *Якименко Наталія Миколаївна, канд. фіз.-мат. наук, доцент*

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу № 204-02 від 28.12.2020 року

2. Строк подання студентом роботи до захисту *22.05.2021 р.*

3. Мета та завдання кваліфікаційної бакалаврської роботи: *Метою розробки є програмне забезпечення системи моделювання архітектури 5G NR*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

*1. Призначення та область використання.*

*2. Перегляд аналогічних існуючих систем.*

*3. Опис і обґрунтування проектних рішень.*

*4. Етапи програмування системи.*

*5. Впровадження системи в промислову експлуатацію.*

*6. Висновки*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

*Структурна схема системи* *1 аркуш*

*Функціональна схема системи* *1 аркуш*

*Діаграма процесів* *1 аркуш*

*Блок-схема алгоритму роботи додатку* *2 аркуша*

6. Дата видачі завдання « 11 » січня 2021 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної бакалаврської роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної бакалаврської роботи	Примітка
1.	Аналіз існуючих систем	10.03.2021 р.	
2.	Постановка задачі, оформлення ТЗ	15.03.2021 р.	
3.	Розробка моделі компонента	20.03.2021 р.	
4.	Розробка структур даних	25.03.2021 р.	
5.	Розробка алгоритмів зв'язку та відображення	30.03.2021 р.	
6.	Програмування алгоритмів	10.04.2021 р.	
7.	Оформлення ПЗ	17.04.2021 р.	
8.	Попередній захист роботи	14.05.2021 р.	

**Студент** \_\_\_\_\_

( підпис )

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_

( підпис )

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

**Калюжний Р.І. Програмне забезпечення системи моделювання архітектури 5G NR. 123 Комп'ютерна інженерія. Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький. 2021.**

В даній кваліфікаційній бакалаврській розроблено програмне забезпечення, яке призначено для системи моделювання архітектури 5G NR.

Метою розробки є програмне забезпечення системи моделювання архітектури 5G NR.

Результат роботи – програмна реалізація системи моделювання архітектури 5G NR.

В процесі роботи над програмною моделлю виконано аналіз існуючих апаратних та програмних засобів. В повній мірі описані всі компоненти розробленого програмного забезпечення.

Розроблено зручний інтерфейс користувача. Наведені інструкції по роботі з програмними засобами.

Програма може використовуватися на ПЕОМ архітектури IBM PC з ОС Windows XP/Vista/7/8/10.

Програму розроблено в середовищі Delphi 10.4 Sydney.

**Ключові слова:** комп'ютерна інженерія, моделювання, 5G NR

## ABSTRACT

**Kaliuzhnyi R.I. 5G NR architecture modeling system software. 123 Computer Engineering. Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi. 2021**

In this bachelor's qualification the software which is intended for system of modeling of architecture 5G NR is developed.

The purpose of the development is the software of the 5G NR architecture modeling system.

The result is a software implementation of the 5G NR architecture modeling system.

In the process of working on the software model, an analysis of existing hardware and software was performed. All components of the developed software are fully described.

Developed user-friendly interface. Instructions for working with software are given.

The program can be used on an IBM PC with Windows XP / Vista / 7/8/10.

The program is developed in the environment of Delphi 10.4 Sydney.

**Keywords:** computer engineering, modeling, 5G NR

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ .....	2
ВСТУП.....	3
1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ВИКОРИСТАННЯ.....	4
1.1 Призначення системи.....	4
1.2 Область застосування.....	5
2 ПЕРЕГЛЯД АНАЛОГІЧНИХ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ .....	7
2.1 Огляд існуючих систем, технологій, архітектур та програмних рішень за профілем теми кваліфікаційної бакалаврської роботи.....	7
2.2 Обґрунтування вибору засобів для побудови системи та мови програмування.....	13
2.3 Розгорнута постановка завдання .....	18
3 ОПИС І ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ .....	19
3.1 Опис функціонування системи.....	19
3.2 Розробка структурної схеми .....	37
3.3 Розробка функціональної схеми.....	41
3.4 Розробка діаграми процесів.....	44
4 РЕАЛІЗАЦІЯ РОБОТИ. РОЗРАХУНКИ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВІРНІСТЬ ПРОЕКТНИХ ТА ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ ...	46
4.1 Розробка блок-схем та опис алгоритмів функціонування системи .....	46
4.2 Захист розробленого програмного забезпечення .....	51
5 ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ В ПРОМИСЛОВУ ЕКСПЛУАТАЦІЮ.....	57
6 ОСНОВНІ ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	61

**КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ**

Вим.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Розроб.		Калюжний Р.І.			Програмне забезпечення системи моделювання архітектури 5G NR	Лім.	Аркуш	Аркушів
Перев.		Якименко Н.М.				Б	1	68
Н.контр.		Гермак В.С.			ЦНТУ КІ-18-3СК			
Затв.		Смірнов О.А.						

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

4G, LTE	–	четверте покоління мобільного зв'язку
5G NR	–	5G New Radio
IoT	–	Інтернет речей
ПoT	–	виробничі й обчислювальні потужності
VR/AR	–	віртуальна й доповнена реальність
БС	–	базові станції
ЦОД	–	центр обробки даних

Кафедра КБПЗ – 2021 рік

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Після того, як був прийнятий перший стандарт 5G New Radio (5G NR), фокус уваги інженерів-розроблювачів нових продуктів в області бездротового зв'язку прогнозоване змістився від етапу дослідження до інтенсивної розробки нових продуктів, які зможуть забезпечити більш високі швидкості передачі даних, більш короткий час затримки, а також більшу енергоефективність у порівнянні з використовуваними нині технологіями 4G. На цьому шляху вони неминуче зіштовхнуться з рядом технічних проблем при проектуванні архітектури фізичного рівня, яка повинна справлятися з більш складним багатокористувацьким середовищем і використанням каналів на більш високих частотах. Розуміння того, як вимоги, а також нові технології, що ставляться до стандарту 5G, відрізняються від минулого, четвертого покоління мобільного зв'язку (LTE), може допомогти інженерам-розроблювачам підготуватися до роботи з новими архітектурами.

**Мета й завдання дослідження.** Метою роботи є програмне забезпечення системи моделювання архітектури 5G NR.

Для досягнення поставленої мети визначена програма дослідження, що складається з наступних завдань:

- Огляд існуючих систем моделювання архітектури 5G NR.
- Дослідження системи моделювання архітектури 5G NR.
- Програмна реалізація системи моделювання архітектури 5G NR.

**Практична цінність отриманих результатів** полягає в тому, що розроблені алгоритми дозволяють успішно вирішувати задачі моделювання архітектури 5G NR.

Таким чином, виходячи з вищеперерахованого, програмне забезпечення системи моделювання архітектури 5G NR, є актуальною задачею, яка потребує вирішення у даній кваліфікаційній бакалаврській роботі.

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

# 1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ВИКОРИСТАННЯ

## 1.1 Призначення системи

5G – це нове покоління мобільного зв'язку, що володіє поруч принципових переваг у порівнянні з 4G:

- Більш висока швидкість передачі даних.
- Низька затримка сигналу.
- Можливість підключення більшого числа девайсів.
- Висока енергоефективність.
- Багаторазово зросла пропускна здатність.
- Висока мобільність користувачів.

Уваги заслуговує ще одна важлива відмінність 5G – масштабна віртуалізація. Нова технологія виходить за рамки одних лише апаратних рішень. Багато функцій у ній реалізовані не на рівні фізичної інфраструктури, а програмним способом.

Ключовим аспектом технології поряд з параметрами потужності мережі є продуктивний підхід. Частотні діапазони, конструктивні особливості станцій і програмні компоненти будуть адаптовані до потреб різних категорій споживачів – від користувачів гаджетів до промислових підприємств і міської інфраструктури.

Раніше кожне покоління мобільного зв'язку випереджало попереднє головним чином по фізичних характеристиках. 5G розширює контекст, пропонуючи нове розуміння технології: інноваційна платформа, на основі якої додатковий імпульс до розвитку одержать відразу багато галузей. Це означає появу зовсім нових сервісів, бізнес -моделей, типів взаємодії між пристроями, виробничих ланцюжків і інфраструктури.

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

## 1.2 Область застосування

Про сфери застосування 5G сказане цілком достатньо – це популярна тема, і деталі цікавих кейсів ви можете знайти без праці. Перелічимо основні з них.

### Інтернет речей (ІоТ)

Сюди входить концепція розумного будинку, виробничі й обчислювальні потужності (ІоТ), інфраструктура розумного міста. Пристрої й системи поєднуються в загальну мережу з дистанційним керуванням і контролем при мінімальних затримках. У першому випадку це можуть бути побутові прилади, клімат-контроль, системи екстреного оповіщення. На індустріальних об'єктах 5G забезпечить швидкий якісний зв'язок між верстатами, вимірювальними приладами й ЦОДами. Жителі міст зможуть скористатися безперебійним оперативним доступом до різних сервісів: центрам державних послуг, міському транспорту й не тільки.

### Безпілотний транспорт

Автономні вантажоперевезення, міське таксі, сільськогосподарська техніка – безліч видів транспорту може бути переведене на безпілотний режим з метою забезпечення більшої точності, надійності й безпеки процесів.

### Хмарні технології

Зберігання даних, моментальне завантаження й обчислення. Широко застосовними стануть хмарні застосунки, для яких раніше була потрібна установка on-premise. Завдяки швидкісній передачі даних користувачі й розроблювачі зможуть робити операції, що вимагають високої апаратній потужності, маючи під рукою тільки мобільний інтернет.

### Охорона здоров'я

Якісний зв'язок з вилученими регіонами дозволить надавати висококласну підтримку у випадку екстрених ситуацій. Під час складних операцій або діагностики з використанням відеопотоку 5G забезпечить високу швидкість і

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

дозвіл. Також за допомогою фітнес-трекерів користувачі зможуть передавати свої біометричні параметри в безперервному режимі для зберігання й обробки.

### **Віртуальна й доповнена реальність (VR/AR)**

Мова не просто про розваги, але й про цілком відповідальне застосування – системи інтерактивного навчання, навігаційні системи, складні інженерні процеси й навіть тактильний інтернет.

Якщо заглянути в більш далеке майбутнє, то з появою 5G будуть активно розбудовуватися такі «розумні» системи, як будинок, місто, виробництво. Окремо варто відзначити тренд на використання голосових помічників. Крім того, з поширенням 5G штучний інтелект одержить друге життя й стане доступний набагато більшому числу користувачів.

Таким чином, виходячи з вищеперерахованого, програмне забезпечення системи моделювання архітектури 5G NR, є актуальною задачею, яка потребує вирішення у даній кваліфікаційній бакалаврській роботі.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

## 2 ПЕРЕГЛЯД АНАЛОГІЧНИХ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ

### 2.1 Огляд існуючих систем, технологій, архітектур, програмних рішень за профілем теми кваліфікаційної бакалаврської роботи

Проектування – один з найбільш складних і відповідальних етапів розгортання систем зв'язку, оскільки він повинен забезпечити найбільш оптимальна побудова мережі. При проектуванні необхідно визначити місця установки базових станцій (БС) таким чином, щоб забезпечити обслуговування зв'язком заданої території з необхідною якістю при мінімальному числі БС, тобто при мінімальній вартості інфраструктури мережі. Фактично це завдання тяжковиконувана. З одного боку, надмірно часте розміщення БС не вигідна, тому що спричиняє невиправдані витрати. З іншого боку, занадто рідке розташування БС могло привести до появ ділянок території, яка не обслуговується. Завдання додатково ускладнюється труднощами аналітичної оцінки характеристики розташування сигналів. При аналітичному розрахунках слід урахувати форму рельєфу місцевості, наявність рослинності, заселеність території, типу ґрунту, кліматичну обстановку й інші фактори, які можуть вплинути на зміну рівня сигналу на окремих ділянках конкретної території. З урахуванням даних параметрів аналітичний розрахунок стає досить трудомістким, що змушує витратити на нього велика кількість часу. Тому використання ефективного програмного забезпечення, що виконує аналітичний розрахунок за короткий проміжок часу з найменшими погрішностями, є найбільш грамотним рішенням проблеми проектування мереж. Але варто сказати, що більша частина такого софта є дорогою, тому в даній роботі будуть розглянуто дві безкоштовні й одна демонстративна програмна реалізація аналітичного розрахунку.

Основними учасниками світового ринку програм для радіопланування є продукти, описані нижче.

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## **Asset**

Asset – продукт міжнародної компанії AIRCOM international. Це багатофункціональний модульний продукт (тобто для одержання доступу до розширених функцій програми – наприклад, розрахунки покриття для LTE мереж – необхідно купити ліцензію на використання спеціального модуля для розрахунків покриття для LTE мереж). Використовує точні карти висот, доступні після покупки продукту.

Використовується для планування й проектування радіомереж покоління 2 і 2,5G, підтримує безліч необхідних для даних цілей прикладних функцій. Уся інформація про параметри й конфігурації мережі зберігається в загальній базі даних (Oracle), що забезпечує її схоронність і можливість спільного використання різними підрозділами стільникової компанії. ASSET дозволяє планувати архітектуру мереж для макро– і мікростільників з урахуванням широкої гами стандартів і технологій, таких як GSM, GPRS, HSCSD, EGPRS, ECSD, PCS, AMPS, TDMA, LMU і TETRA. У пакет вбудовані автоматичний планувальник частот, модуль планування трафіка й ряд інших інженерів, що значно спрощують роботу, тпроектувальників

## **Atoll**

Atoll – продукт міжнародної компанії Forsk, який підтримує всі основні бездротові технології:

- GSM/GPRS/EDGE.
- UMTS/HSPA.
- LTE/LTE-advanced.
- CDMA2000 1xrtt/EV-DO.
- TD-SCDMA.
- Wimax.
- Wi-Fi.
- Microwave links.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8



## ICS Telecom

ICS Telecom – продукт міжнародної компанії ATDI, який є ключовим рішенням для планування телекомунікаційних мереж і керування. Основні можливості програми ICS Telecom:

- при розрахунках використовуються практично всі відомі моделі поширення;
- каскадне відображення картографічних шарів;
- зручна навігація: так при плануванні можна швидко виявити місця з конфліктом верхніх і нижніх частот;
- потужний аналітичний інструментарій при роботі із профілем;
- в автоматичному режимі оптимізуються висоти підвісу антен;
- добір потрібних параметрів станції;
- ураховується просторове або частотне рознесення на прольоті, підбирається оптимальний рознос антен;
- можливість зміни кривизни землі для 99,9% відсотків часу.
- можливість зберігання мереж будь-якої конфігурації.

## Proman

Proman – продукт німецької компанії AWE Communications. Даний продукт пропонує модулі планування мереж для всіх популярних повітряних інтерфейсів: LTE, 3G (UMTS/HSPA і CDMA 2000), 2G/2, 5G (GSM, GPRS, EDGE), Tetra, Wimax і WLAN. Підтримуються як MIMO і DAS, так і користувацькі розширення для повітряних інтерфейсів. Статичне й динамічне моделювання роботи мережі з урахуванням розподілу абонентів на растрових і векторних картах.

Крім цих функцій планування мереж стільниковому зв'язку, Proman також підтримує планування мереж віщання (наземні й супутникові передавачі).

## Celplanner

Celplanner – продукт американської компанії Celplan Technologies. Це модульна програма, призначена для створення бездротових мереж. Cellplanner

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

підтримує GSM/GPRS/EDGE, WCDMA з HSPA/EUL і MBMS, Wimax і технології LTE.

З перерахованих вище варіантів тільки компанія AWE Communications готова представити демо-версію свого продукту Proman, але для одержання демо-версії необхідно дочекатися позитивної відповіді на заявку по електронній пошті.

### **Класифікація видів ПЗ**

Розглянуте ПЗ можна розділити на три основні групи:

- доступне;
- умовно-доступне (, що надає демо-версію);
- платне.

Умовно-доступне ПЗ, розглянуте в даній роботі, представлено продуктом RPS-2.

### **RPS-2**

Система RPS (Radio Planning System) призначена для планування радіорелейних, транкінгових і стільникових мереж зв'язку всіх стандартів (у тому числі CDMA). RPS дозволяє проводити частотно-територіальне планування мережі, виконувати розрахунки, необхідні для оцінки якості зв'язку в ній, визначати зони, що обслуговуються аналізованою мережею, оцінювати показники електромагнітної сумісності різних мереж.

Вихідними даними є характеристики місцевості, на якій розміщується мережа, представлені цифровою картою цієї місцевості, і параметри використовуваного устаткування (антен, антенно-фідерних трактів, приймачепередатчиків) даних устаткування, що зберігаються в базі, постаченої зручним для користувача механізмом її поповнення й редагування.

Програма має простий інтерфейс. Усі дії користувача, пов'язані із плануванням мережі, а також результати розрахунків візуально відображаються на екрані монітора.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Дана демонстративна версія має повний перелік можливостей повної версії RPS-2, але передбачає роботу тільки на одній карті місцевості й має ознайомлювальний характер.

Повний опис можливостей програми й докладна інструкція для її використання пропонується користувачеві разом з настановним файлом.

### **Radio Mobile.**

Radio Mobile являє собою некомерційний проект, розроблений Roger Coudé. На відміну від CRC-Covweb дане ПЗ дозволяє оцінити взаємний вплив різних станцій. Для розрахунків втрат використовується все та ж модель Лонглі-райса. Програма використовує наступні параметри для створення карт із відображенням зон впевненого приймання:

- Місце розташування передавача.
- Вихідна потужність передавача.
- Частота.
- Тип антени.
- Діаграма спрямованості антени.
- Коефіцієнт підсилення антени.
- Загасання в лінії, включаючи фільтри й багатоканальні розгалужувачі.
- Дані про місцевість і висоти.

Програма використовує інформацію про висоти місцевості з баз даних SRTM або DTED, які вільно доступні в Інтернеті. Є й інші формати даних по висотах, але найчастіше використовуються вищевказані.

Програма створює кольорову схему зони охопту однієї або декількох базових станцій з відображенням передбачуваних рівнів прийнятих сигналів.

### **Веб-ресурс CRC-Covweb Канадського Науково-дослідного центру зв'язку**

Канадський Науково-дослідний центр зв'язку надає даний інтернет ресурс для вільної експлуатації всім зареєстрованим користувачам. Розроблювачі дають зрозуміти, що даний веб-сайт має освітній характер, і вони не несуть

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

відповідальності за неточність оцінки. Сайт не призначений для використання в комерційних цілях.

При прогнозуванні зон радіопокриття використовується модель втрат Лонглі-райса. Дана модель вимагає використання апарата геометричної оптики й трасування променів для обліку відбитих полів. Для застосування даної моделі необхідна докладна карта ландшафту місцевості (карта висот). Карти місцевості завантажуються з Google Maps.

## **2.2 Обґрунтування вибору засобів для побудови системи та мови програмування**

Embarcadero Delphi, раніше Borland Delphi і Codegear Delphi, – інтегроване середовище розробки ПЗ для Microsoft Windows, Mac OS, iOS і Android мовою Delphi (що раніше носила назву Object Pascal), створена спочатку фірмою Borland і на даний момент приналежна й розроблювальна Embarcadero Technologies. Embarcadero Delphi є частиною пакета Embarcadero RAD Studio і поставляється в чотирьох редакціях: Community (поширюється безкоштовно й має обмежену ліцензію на використання в комерційних цілях), Professional, Enterprise і Architect.

### **Delphi 10.4 Sydney**

Випущено 26 травня 2020 року. RAD Studio Delphi 10.4 забезпечує значно поліпшену високопродуктивну нативну підтримку Windows, кращу продуктивність розробки, миттєві підказки code completion, прискорення виконання коду із синтаксисом керованих записів, поліпшення виконання паралельних завдань на сучасних багатоядерних CPU, а також містить більш 1000 виправлень багів, поліпшення продуктивності середовища й бібліотек і багато чого крім того.

Основні можливості Delphi 10.4.1:

– Істотні розширення для Windows: поліпшення для застосунків на моніторах 4K High DPI, інтеграція з новим WebView2 на базі Chromium,

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13





забезпечує набагато більш високу продуктивність розроблювачів, які працюють із більшими проектами, що містять мільйони рядків коду.

### **Delphi Custom Managed Records**

Ключове розширення мови Delphi: тип даних Delphi «record» тепер підтримуть довільні ініціалізацію, фіналізацію й операції копіювання. Управляйте тем, як ці структури створюються, копіюються й звільнюються з допомогу вашого коду, який буде виконуватися у відповідний момент.

Це розширює потужність конструкцій records в Delphi, які використовуються щоб одержати більшу ефективність у порівнянні із класами.

### **Єдине керування пам'яттю**

Керування пам'яттю в Delphi тепер стандартизоване на всіх підтримуваних платформах – мобільних, настільних і серверних – використовуючи класичну реалізацію керування пам'яттю об'єктів.

У порівнянні з Automatic Reference Counting (ARC), це дає кращу сумісність із існуючим кодом і спрощує написання компонентів, бібліотек і застосунків.

ARC модель керування пам'яттю model залишилася для керування рядками й посиланнями на тип інтерфейсу на всіх платформах. Для C++ це означає, що при створенні й звільненні Delphi-style класів в C++ використовується звичайне керування пам'яттю, як у будь-якого heap-allocated класу C++, що значно знижує складність коду.

### **Розширена підтримка бібліотек C++**

В 10.4 ми портували багато популярних бібліотек C++ у C++Builder.

Забезпечивши оптимізовану підтримку бібліотек ZeroMQ, SDL2, SOCI, libSIMDpp і Nematode, поряд із уже підтримуваними Boost і Eigen, які можуть бути додані за допомогою менеджера пакетів Getit.

### **Win 64-відладник і збирач для C++**

В 10.4 з'явився новий відладник C++ для Windows 64 -bit. Відладник заснований на LLDB і показує значне збільшення стабільності при налагодженні

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

64-bit застосунків поряд з новими відладочними можливостями, такими як перегляд і інспекція типів начебто рядків C++ і Delphi, а також колекцій STL, включаючи `std::vector`, `std::map` і інших. Крім того, згенерована для застосунку відладочна інформація має інший внутрішній формат, сприяючи більш стабільному й багатому на можливості процесу налагодження, більш докладним перегляду й інспекції в debug-time.

### **Підвищення якості й швидкодії інструментів**

- Велика кількість поліпшень STL від Dinkumware.
- Поліпшені деякі найважливіші методи й області RTL, на базі поліпшень сумісності з популярними бібліотеками C++.
- Поліпшена підтримка Cmake.
- Велика кількість виправлень для підвищення стабільності і якості.
- Відновлення Windows API – Обновлено й додали безліч декларацій API щоб добитися ще більшої інтеграції із платформою Windows.
- Загальні вдосконалення в бібліотеці доступу до БД FireDAC, включаючи оновлені драйвера для FireBird, PostgreSQL і SQLite. Вибір статичного або динамічного підключення SQLite до застосунку.

### **Змінені стилі VCL для High DPI**

В 10.4, архітектура стилізації VCL була суттєво розширена для підтримки High DPI і 4K моніторів. Тепер усі елементи UI на формі VCL автоматично масштабуються під відповідне до монітора дозвіл для показу форми. Був оновлений API стилізації для підтримки стилів high DPI.

Кожний графічний елемент UI може бути обраний з наборів різних масштабів і масштабований до потрібного DPI, що дає чітке зображення елементів UI на всіх моніторах.

### **Нові High DPI стилі й стилізація окремих VCL компонент**

Обновлено велике число вбудованих і преміальних VCL стилів для підтримки нового режиму стилізації High-dpi. Це дозволяє вам створювати застосунку з відмінним дизайном для всіх моніторів.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Розроблювачі VCL застосунків тепер можуть використовувати трохи VCL стилів на різних формах в одному застосунку або в різних компонентів на одній формі. Це також включає стилізацію компонентів загальною темою для платформи. Крім застосункової гнучкості використання стилів, це дозволяє використовувати нестилізуемі компоненти із зовнішніх бібліотек в VCL застосунках, що використовують стиль.

### **Поліпшена кроссплатформеність**

- Додана підтримка Metal Driver GPU для macOS і iOS.
- Крім підтримки останнього iOS SDK, в RAD Studio 10.4 розроблювачі можуть задовольнити нові вимоги Apple до набору стартових екранів.
- Реалізований заново стилізуемий FMX компонент TMemo на платформі Windows значно поліпшений і тепер має відмінну підтримку ІМЕ.
- Користувачам редакцій Enterprise або Architect доступна повна інтеграція Fmxlinux з IDE для створення клієнтських застосунків Linux з GUI.
- Компонент Twebbrowser для iOS тепер реалізований на Wkwebview API.
- Реалізація компонента Media Player для macOS тепер використовує Avfoundation.

### **Оновлений менеджер пакетів Getit**

Менеджер пакетів Getit в IDE був значно вдосконалений.

Дати випуску релізів пакетів тепер видні, і можливе сортування списку по цих датах; відбір тільки встановлених пакетів, контенту, доступного тільки при наявності підписки, багато чого іншого.

### **Універсальний інсталятор для установки Online і Offline**

В 10.4 включений новий універсальний інсталятор, який використовує технологію на базі Getit. Цей інсталятор підтримує як online, так і offline (з ISO) варіанти установки.

Тепер обоє варіанта установки дозволяють вам указати початковий набір можливостей RAD Studio для установки, наприклад, свою комбінацію мов програмування й цільових платформ, мов інтерфейсу, і додавати до нього або видаляти непотрібне в будь-який момент.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

### 2.3 Розгорнута постановка завдання

Згідно з технічним завданням на кваліфікаційну бакалаврську роботу, реалізації підлягає програмне забезпечення, яке призначено для системи моделювання архітектури 5G NR.

В процесі розробки кваліфікаційної бакалаврської роботи необхідно виконати наступний обсяг роботи:

а) провести аналіз існуючих систем-аналогів для виявлення їх позитивних і негативних якостей. Результати аналізу врахувати в подальших розробках;

б) вибрати та обґрунтувати методіку побудови системи контролю роботи технологічного обладнання на виробництві в автоматизованому режимі. Розробити функціональну та структурну схеми системи;

в) розробити програмне забезпечення системи, що дозволить реалізувати поставлену технічним завданням задачу. Побудувати блок-схеми алгоритмів програми та підпрограми;

г) організувати інтерфейс користувача з метою формування та виводу на екран ЕОМ повідомлень про некоректні дії користувача та нестандартні ситуації в роботі технологічного обладнання;

д) розробити рекомендації по організаційних та методичних заходах, які забезпечать впровадження системи в промислову експлуатацію та її подальшу успішну експлуатацію;

е) провести розрахунки по визначенню економічної ефективності розробленої системи;

ж) розробити заходи по охороні праці при впровадженні та експлуатації системи, а також розробити заходи з цивільного захисту;

з) сформулювати висновки про виконаний обсяг робіт та одержані результати.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

## 3 ОПИС І ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ

### 3.1 Опис функціонування системи

5G – це не просто новий стандарт мобільного зв'язку. Впровадження мереж 5-го покоління в довгостроковій перспективі може перетворити наше сприйняття світу й привести до трансформації суспільства. При цьому зміниться економіка мереж: середня швидкість передачі даних збільшиться в 40 раз, а собівартість доставки, навпаки, поменшає в 30 раз. Уже до 2024 року, на думку аналітиків, до 30% мобільного трафіка буде йти через пристрої з підтримкою 5G. На технологію 5G до 2025 р. буде доводитися 15% світового сектору мобільної телефонії (прогноз GSMA); у Європі й Китаї цей показник складе 30%, а в США – 50%.

#### Ключові показники стандарту й технології 5G

5G – покоління мобільного зв'язку, що працює у відповідності зі стандартами телекомунікацій, що випливають за технологією LTE (4G).

Консорціум 3GPP почав формування специфікації 5G-NR (NR – New Radio, технологія радіодоступу для мереж рухливого зв'язку 5-го покоління) в 2015 році. Тоді були озвучені плани по підготовці специфікацій. Відповідно до цих планів 1-я фаза специфікацій повинна була завершитися до другої половини 2018 року (у рамках релізу 15 3GPP), а 2-я фаза – до грудня 2019 року (у рамках релізу 16 3GPP). На даний момент 1-я фаза завершена із затримкою на рік, а 2-я зміщено на третій квартал 2020 року.

Стандарти й специфікації 3GPP створені учасниками ринку й ураховують самі різні бізнес-завдання, у кожної з яких, звичайно ж, є свої специфічні вимоги. Так, рекомендація 3GPP TR 38.913 визначила наступні ключові показники мереж нового покоління:

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- пікова швидкість передачі даних на лінії вниз (Downlink) – 20 Гбіт/с (при спектральній ефективності 30 біт/с/Гц);
- пікова швидкість передачі даних на лінії нагору (Uplink) – 10 Гбіт/с (при спектральній ефективності 15 біт/с/Гц);
- мінімальна затримка в підсистемі радіодоступу для сервісів URLLC – 0,5 мс, для сервісів eMBB – 4 мс;
- максимальна щільність підключених до мережі в міських умовах пристроїв IoT – 1 млн пристроїв/кв. км;
- автономна робота пристроїв IoT без підзарядки акумулятора протягом 10 років;
- підтримка мобільності при максимальній швидкості пересування об'єктів 500 км/ч.

Тепер коротко розповімо про декілька технологіях, завдяки яким, властиво, імплементація мереж п'ятого покоління стає можливою.

#### **Частота й ширина смуг**

Специфікація 3GPP TS 38.211 V1.2.0 (2017-11) визначила нові смуги радіочастот для 5G і розділила їх на два блоки: FR1 (частоти до 6 ГГц або sub6G) і FR2 (частоти вище 6 ГГц або mmWave). Робота на більш високочастотних діапазонах дозволяє усунути різні перешкоди в мережі, які спотворюють передачу даних. Крім того, вище частота – вище ширина смуги, а від неї прямо залежить пропускна здатність каналу. Так, для блоку FR1, залежно від використовуваного SCS (Sub-Carrier Spacing – варіант розносу радіочастот, що піднесуть), допускається ширина одного радіоканалу до 100 МГц, для блоку FR2 – 50–400 МГц. На відміну від мереж LTE, які допускають канали шириною всього лише 1,4, 3, 5, 10, 15 і 20 МГц. А якщо скомбінувати ширину каналу з агрегацією частот (CA), то для одного з'єднання можна досягтися спектра в 2 ГГц і більше.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21



Однак, використовуючи технологію вибору передавальної антени, можна одержати повну інформацію про канали всіх антен UE. Отже, базова станція може генерувати промінь у напрямку UE щонайкраще. У результаті пропускна здатність UE значно збільшиться, особливо в крапках на далекому й середньому видаленні від базової станції (до +40%).

### **Network Slicing, або «нарізка мережі»**

По логіці цієї концепції, оператори стільникового зв'язку зможуть розвертати ізольовані друг від друга мережі, кожної з яких можна виділити/призначити свій набір ключових показників: для «Інтернету речей» – широке покриття, для міського транспорту – широку смугу й низький відгук. Робота даної технології буде можлива при переході на ядро мережі нового покоління.

### **Сценарії й приклади надання послуг мобільному зв'язку в мережах 5G**

Можна помітити, що деякі з раніше перерахованих показників, такі як, наприклад, пікова швидкість передачі даних і автономність, виявляються несумісними й навіть взаємовиключними. Але всі ці показники й не повинні виконуватися одним пристроєм одноразово або в принципі підтримуватися всім списком. Можна вибирати різні види сценарію надання послуг радіопересувного зв'язку залежно від ступеня важливості (висока, середня, низька) того або іншого показника. У концепції Network Slicing, наприклад, фізична архітектура 5G буде розділена на безліч віртуальних мереж або шарів, призначених для свого сценарію використання. Кожний сценарій буде задовольняти тому або іншому набору раніше зазначених показників і, відповідно, націлений на певний сегмент ринку.

Специфікація визначає всього три сценарії:

- eMBB (enhanced Mobile Broadband – зверхширокополосна мобільний зв'язок);

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication – наднадійний зв'язок з низькими затримками);
- mMTC (massive Machine-Type Communications – масовий міжмашинний зв'язок).

### **NB-IoT і eMTC для mMTC**

mMTC – це сценарій міжмашинної взаємодії, у якому участь людини мінімально, а всі процеси автоматизовані. До пристроїв mMTC ставляться: лічильники води, газу, електрики; контролери вуличного висвітлення; датчики парковочного місця; GPS-закладки; різні сенсори диму/вогню; датчики злому; «розумні» сміттєві баки та інші IoT-пристрої. Як видно, тут зовсім не важливі висока швидкість і наднизькі затримки, але необхідні автономність і величезне число підключень у мережі. Мова йде про т.зв. пристроях LPWA (Low Power Wide Area) – масових, простих і дешевих пристроях з ультранизьким споживанням, здатних працювати від однієї батареї до 10 років.

Стандарти й специфікації для мереж LPWA були закладено в релізах 13 (Cat.NB1 і Cat.M1) і 14 (Cat.NB2 і Cat.M2) 3GPP, і в цей час мережі NB-IoT (вони ж LTE Cat.NB1/NB2) і eMTC (LTE Cat.M1/M2) уже запущені в комерційну експлуатацію. Мережі для таких пристроїв характеризуються низькими швидкостями передачі (до 150 кбіт/с в LTE Cat.NB2 і до 1 М біт/с в LTE Cat.M1), широким і «глибоким» покриттям. Варто відзначити, що принадність NB-IoT і eMTC у тому, що розгортання мереж з боку операторів стільниковому зв'язку не вимагає величезних вкладень і виділення окремих частотних смуг. Ці LPWA-мережі можуть працювати в існуючих частотних смугах і на мережному устаткуванні, що вже використовується, при цьому одна базова станція може обслуговувати більш велику територію в порівнянні з існуючими мережами 2G, 3G або LTE.

Про те, як одержати доступ до мереж NB-IoT за допомогою модулів стільниковому зв'язку Simcom Wireless Solutions, можна прочитати в статті [1].

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

## 5G для URLLC і eMBB

Формально мережі NB-IoT і eMTC можна віднести до мереж 5-го покоління, але в даній статті під 5G ми будемо мати на увазі високошвидкісну технологію. Сценарії URRLC (буде включено в реліз 16 3GPP) і eMBB (уже визначено в релізі 15 3GPP) перебувають у зоні відповідальності 5G. Їхня суть відбита в назвах: сценарій URRLC означає наднадійний зв'язок з низькою затримкою, а eMBB – зверхширокополосну, а виходить, високошвидкісний зв'язок.

Видалося б, швидкості й час затримки в існуючих LTE-мережах задовольняють більшість сучасних користувачів. Навіщо споживачеві 5G і яка від нього користь?

Розглянемо інфограму яка відбиває сфери застосування мережних послуг залежно від вимог до пропускної здатності й затримкам. У світлій частині ми бачимо сучасні сфери застосування, що вже стали для нас повсякденністю, такі як: онлайн-гри, перегляд і вивантаження відео, вилучена телеметрія, контроль об'єктів, датчики й ін. Усі ці застосунки задовольняють каналом до 100 Мбіт/с і затримками вище 10 мс.

А тепер оборотний увага на синю частину інфограми – це та область, яка відкривається з 5G. Видно, що 5G може як поліпшити існуючі сфери застосування, так і породити нові. Розглянемо кілька самих цікавих варіантів використання докладніше. Вони допоможуть зрозуміти, наскільки важливим для нас насправді є впровадження мереж 5G.

### Потокове відео

Учасники ринку прогнозують зсув класичного застосунку «відеостриминг» вправо, убік збільшення швидкостей передачі даних без особливих вимог до затримок. Головним драйвером для цього стане потреба у високоякісному 8K-відео.

Сьогодні в продажі є телевізори з підтримкою 4K-відео, і деякі провайдери надають відеоконтент такої якості. Але надійний доступ до такого

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

контенту можуть одержати хіба що користувачі, підключені до оптоволоконного Інтернету, що можливо не у всіх населених пунктах. З появою 5G 4 К- і навіть 8К-відео стануть нормою для всіх жителів міст і пригородів, а в сфері кінофотовиробництва стануть приділяти більше увагу такій якості, як деталізація.

Споживання відеоконтенту на широкоформатному телевізорі встановлює вимоги до пропускної здатності на завантаження. Однак 5G пропонує більш високі швидкості й на вивантаження. Це відкриє можливості для впровадження міських систем відеоспостереження з інтелектуальним розпізнаванням осіб (мал. б) на всіх континентах. У таких системах уся обчислювальна частина зі штучним інтелектом перебуває в мережі, від камер відеоспостереження потрібно лише передати на сервер відео винного дозволу. У світі уже є приклади впровадження таких систем. Уряд Шанха (Китай) користується такою системою з 2015 року. До неї підключене більш 170 млн «розумних» відеокамер. Для прикладу [2], дана система допомогла виявити злочинця в 50-тисячній юрбі на шляху з концерту популярного співака. На концерт він прийшов разом із дружиною, і, за словами затриманого, розраховував загубитися в юрбі.

На практиці такі системи не тільки дозволяють місту заощадити засобу на забезпечення безпеки й оперативно-розшукові заходи, але й породжують позитивний соціально-економічний ефект: жителі й туристи не бояться купувати дорогі речі, відвідують публічні місця в будь-яку годину дня, а бізнес не побоюється за схоронність клієнтів і майно, оскільки тепер це завдання міста.

З появою 5G дана система стане більш ефективною й менш витратною при розгортанні й обслуговуванні, а значить – більш доступною.

### **Sky Office**

Очікується, що на ранній стадії комерційного розгортання 5G ключовим 5G-продуктом, крім смартфонів, стане саме ноутбук з підключенням до Sky Office. Sky Office – це концепція переносу обчислювальних потужностей ноутбука в хмару при оснащенні комп'ютера вбудованим 5G-модемом. Так, у хмарі можуть розміщатися не тільки файли користувача (Cloud Drive), але й

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

програмне забезпечення (ПЗ), таке як MS Office 365 (Cloud Office), або ігрові програмні продукти (Cloud Games). У цій концепції ноутбук стає, простіше говорячи, екраном із клавіатурою й камерою.

Якщо мережі стільникового зв'язку забезпечать затримку в одиниці мілісекунд і нададуть виділений надійний канал зв'язку на безлімітній основі (Network Slice), то робота з Sky Office у майбутньому може стати популярним способом застосування ноутбука. При цьому споживач одержить ряд цікавих якостей, недосяжних зі звичайними ноутбуками:

- низьке споживання на рівні планшетів згодом автономної роботи 14 год і більш;
- ноутбук не витрачає час на завантаження ПЗ, воно вже працює – у хмарі;
- втрата ноутбука більше не означає втрату даних і ліцензій;
- тонкий і легкий корпус (состав і структура ноутбука спрощуються, а це сприяє зменшенню розмірів і ваги);
- пасивне охолодження (ноутбук більше не робить енерговитратних обчислень і слабо гріється);
- зв'язок безпечніший, чим Wi-Fi, оскільки 5G практично неможливо зламати, канал зв'язку захищений новітніми алгоритмами шифрування.

Звичайно, втілення концепції Sky Office у реальність вимагає вибудовування цілої екосистеми при участі гравців відразу декількох галузей, таких як: виробників операційних систем і ПЗ, виробників ноутбуків, операторів стільникового зв'язку, хмарних сервіс-провайдерів, виробників чипсетів, виробників eSIM і модулів 5G. Але, незважаючи на складність імплементації, очікується, що в найближчому майбутньому Sky Office буде мати швидкий ріст у Китаї й багатьох інших країнах.

### **Віртуальна й доповнена реальності**

Індустрія розваг завжди була локомотивом у розвитку побутової електроніки. Найвищі вимоги до продуктивності виходять саме від споживачів

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

ігрових консолей. Самими передовими, хоч і менш розповсюдженими технологіями у світі ігор є віртуальна реальність (VR) і доповнена реальність (AR).

Усім відомі компанії Sony і Microsoft уже кілька років пропонують аксесуари для VR і відповідні 3D-гри.

Поступово VR і AR вийдуть за рамки ігрової індустрії й неминуче перекинуться на утвір, медицину, промисловість – їх потенціал переоцінити складно. Наступним кроком у цій галузі буде сполучення AR і VR з 5G. Технічно це вже здійсненне завдяки новому чипсету Qualcomm Snapdragon XR2, що сполучає 5G-модем і спеціалізований процесор XR (від VR+AR) з підтримкою штучного інтелекту, що реагує на міміку «пілота».

Зрозуміло, що з 5G популярність онлайн-ігор тільки зросте. З переносом обчислювальних потужностей у хмару (Cloud Gaming) ігрові консолі стануть менш завантаженими, відео буде більш плавним, детальним і динамічним. Подолавши технологічний бар'єр з 5G, ринок AR/VR-ігор стане більш затребуваним. Багатьом відкриються віртуальні подорожі в інші міста, занурення на дно океану й навіть польоти в космос. Як відомо, сприйняття світу людиною сильно залежить від того, що він бачить, і з XR+5G кругозір середнього обивателя значно розшириться, що змінить підходи суспільства до вивчення світу й творчої діяльності у всіх сферах.

### **Тактильний Інтернет**

У продовження розмови про XR і штучному інтелекті варто сказати окремо про такий похідний напрямок, як тактильний Інтернет (TI). Це передача тактильних відчуттів, доторкань на будь-які відстані з мінімальної, практично невідчутною затримкою. Назва технології була запропонована в Дрезденському технічному університеті, там ще в 2012 році почалися роботи зі створення роботизованих систем, здатних віддалено передавати відчуття.

Зараз учені працюють над створенням штучного дотику шляхом впровадження датчиків у м'які роботи зовані структури й найбільш чутливих

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28



фахівців стануть доступніше, а пацієнти зможуть вибрати хірурга незалежно від країни проживання.

### **БПЛА (дрони)**

Телехірургія виставляє високі вимоги до затримок і надійності зв'язку, але є ще одна сфера, що вимагає до всього іншого й масовість підключення, – безпілотні літальні апарати (БПЛА), або «дрони». Сьогодні вже нікого не здивуєш легенями дронами самих різних призначень – від розважальних до спеціалізованих військових. З їхньою допомогою знімають ефектні відео, проводять розвідку місцевості, рятують людей, перевозять вантажі і т.д. Але майже всі вони управляються людиною прямо, через прямий бездротовий надійний контакт на неліцензуючій частоті.

У зв'язку із впровадженням 5G у прогресивних країнах до даної теми вже сьогодні звернена серйозна увага з боку регулювальних органів, у зв'язку із чим проводяться роботи зі стандартизації й забезпеченню безпеки в цій сфері. Приміром, у Європі існує спеціальна експертна група 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) на базі Європейської Комісії й представників індустрії інформаційно-комунікаційних технологій (оператори, провайдери, інститути, малий і середній бізнес) із Британії, Франції, Швейцарії, Австрії, Фінляндії, Греції, Польщі й Естонії. Державно-приватне партнерство 5G PPP буде пропонувати рішення, архітектури, технології й стандарти для БПЛА. У даній державній ініціативі Євросоюз бачить один зі шляхів зміцнення свого технологічного лідерства на світовій арені.

При наявності стандартів, що регулюють масовий оберт дронів, систем штучного інтелекту, надійного, постійного й швидкого бездротового каналу зв'язку 5G для цілого вулика дронів можна відкрити нові ринки й сервіси в самих різних сферах. Дрони-кур'єри, що разносять їду з магазинів або важливі медикаменти у важкодоступні місця; дрони-рятувальники, що шукають, що згубилися в лісі або в морі людей і днем, і вночі; дрон і-пожежн вогнища, що

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

гасять, загоряння ще на початковій стадії; агрокоптери зернові культури, що обприскують, – і все в глобальному масштабі, а не в окремих випадках.

### **Інфраструктура C-V2X**

Від БПЛА перейдемо до безпілотних транспортних засобів. Багато бачили відеопрезентацію Tesla, у якій електромобіль під керуванням штучного інтелекту) рухається по місту з мінімальною участю водія. Або інший приклад – сервіс Waymo, який дозволяє за допомогою мобільного застосунку викликати таксі й доїхати на ньому до обраної крапки без водія.

Обоє автомобіля побудовані на різних принципах роботи потужного штучного інтелекту. Автомобіль ухвалює ситуативний розв'язок на основі візуальної інформації й даних з лідара (Waymo). «Розумний» автомобіль перебуває в оточенні «нерозумних», непередбачених автомобілів під управлінням людини.

Доступний інфраструктурний підхід до безпілотного водіння, закріплений в 14-м релізі 3GPP – C-V2X. C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) – це концепція передачі інформації від транспортного засобу будь-якому об'єкту, який може вплинути на транспортний засіб, і навпаки. Даний підхід дозволяє транспортному засобу «спілкуватися» з іншими авто (V2V), інфраструктурою (V2I), мережею LTE (V2N), електромережею (V2G), пішоходами (V2P) і навіть будинками (V2H). 15-й реліз 3GPP також вніс можливість спілкування автомобіля з мережею 5G, і C-V2X став більш привабливим завдяки сервісу URLLC.

Таким чином, транспортні засоби, підключені до системи C-V2X, зможуть «бачити» усю картину дорожньої обстановки, «знати» про взаємному положення, перешкоди, небезпечних ділянки, а штучний інтелект, розташований у мережі, не просто сформує для них траєкторію руху, а зробить це з урахуванням взаємного впливу на транспортну систему. Такі системи розв'яжуть проблему транспортування краще й безпечніше будь-якого водія, скоротять час у дорозі кожного учасника руху й зроблять рух передбачуваним, безпечним і енергоефективним.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Міжнародна консалтингова компанія Pricewaterhousecoopers (Pwc) прогнозує, що перші машини без водіїв з'являться на дорогах загального користування вже в 2021 році, а до 2040 року весь транспорт мегаполісів по усьому світу стане безпілотним. Однак перший час такий транспорт буде вимагати уваги з боку водія при певних ситуаціях по ходу руху. У цей період також будуть вирішуватися правові питання, пов'язані з безпілотним і електротранспортом, зокрема юридичні й страхові аспекти. Певна кількість часу буде витрачена на створення мережі зарядних станцій для електрокарів.

Тепер, перелічивши безліч прикладів, де 5G буде як не можна до речі, розглянемо, у якому стані перебувають мережі 5G сьогодні і які бар'єри потрібно подолати на шляху до фантастичного майбутнього.

### **Стан мереж 5G у світі й у Україні**

Процес впровадження мереж 5G у комерційну експлуатацію почався вже з 2019 року, щоправда, поки покриття таких мереж досить скромне. На початок 2020 року мережі 5G запуснені в експлуатацію в 47 операторів в 22 країнах світу, а разом з тими, хто зараз запланував запуск або веде тестування, буде 279 операторів в 109 країнах.

Перші користувачі вже оцінили значний ріст швидкості передачі в режимі 5G. Результати тестів Qualcomm (травень 2020 року) показують підвищення швидкості завантаження в 5G-пристроїв у порівнянні з LTE-пристроями в 3,3 рази. У майбутньому цей показник буде вище за рахунок більш щільного покриття й переходу від ядра LTE EPC до пакетного 5G-ядра мережі.

### **Шлях від LTE до 5G**

Як уже було сказано, мережі 4G не дотягають до вимог, висунутих новими сценаріями застосування. Крім щільності підключень, пропускної здатності радіочастині й ін., затримки в мережах 4G досить великі. Затримки складаються із затримок у радіочастині й в інфраструктурній частині, і сьогодні вони становлять десятки мілісекунд. У довгостроковій перспективі для повноцінних 5G-мереж, у тому числі для підтримки Network Slicing і URLLC, буде потрібно як

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32



Згодом за допомогою комбінованих базових станцій LTE+5G-NR можна здійснити розширення зони покриття 5G за рахунок застосування технології DSS (Dynamic Spectrum Sharing – динамічний поділ спектра), коли нижній діапазон частот E-UTRAN (<2 ГГц) ділиться динамічно з 5G -NR. До впровадження операторами ядра 5G-мережі зможуть працювати в такий спосіб.

Від етапу #3, коли оператори стільниковому зв'язку інтегрують ядро 5G NGCN, вони можуть переходити до цільового й фінального режиму SA (опції #2 і #5 на мал. 29), коли використовується одна технологія радіодоступу – або E-UTRAN, або 5G-NR.

Для задоволення зростаючої потреби eMBB можна задіяти середні частоти (2–7 ГГц), побільшавши в такий спосіб швидкості передачі даних, у тому числі й за рахунок агрегації частот. Нижче частота – більше покриття, але й менше ширина каналу. Однак істи спосіб побільшати покриття, зберігаючи високу швидкість вивантаження за допомогою додаткового каналу лінії нагору (SUL, Supplementary Uplink). На мал. 33 показане, як «парному» (UL/DL) радіоресурсу із середніх частот для UE призначається додатковий непарний канал лінії «нагору» (SUL) з низьких частот. Тоді в одній соті UE одержує 1 ×DL (середні частоти) і 2×UL (низькі й середні частоти) каналу, використання яких буде контролюватися мережею. У цьому випадку на границі стільник в DL-каналі використовується середньочастотний сигнал з підвищеною потужністю з «парного» діапазону, а в UL-каналі – низькочастотний сигнал у непарному Sul-Діапазоні. У підсумку базова станція «бачить» UE на більш далеких відстанях, а швидкість завантаження зберігається та ж, як при використанні середніх частот.

### **Прогноз покриття мереж 5G і «остання миля»**

Зі сценаріїв розгортання мереж 5G і застосовуваних частотних смуг впливає логіка розподілу частотних смуг під різні сценарії. Цієї концепції підкоряється технологія Network Slicing, певна специфікацією 3GPP: вона дозволить операторам стільникового зв'язку розвертати ізольовані друг від друга

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

мережі, кожен з яких можна буде виділяти під певні потреби (для «Інтернету речей», трансляції потокового відео й ін.).

Враховуючи доцільність зазначених сценаріїв у мегаполісах, малих містах і селищах, можна скласти узагальнену схему покриття мережами. Як відомо, у світі або вже відмовилися від мереж 3G, або заявили про плани на їхнє відключення. За планами європейських операторів, замість повільного 3G у селища прийде швидкий LTE при збереженні 2G для голосового трафіка. Покриття в пригороді буде відрізнятися більш високими швидкостями й низькими затримками, а мегаполіси зможуть похвастатися більшим числом підключень і надшвидкісним Інтернетом у місцях покриття частотного діапазону FR2. Як видно, у найближчі роки 5G-мережі не замінять 4 G-мережі, а поступово інтегруються з ними, значно поліпшивши загальний стан справ.

Окремо варто сказати, що такий розподіл мереж породить різкий ріст ринку FWA (Fixed Wireless Access). Виробники CPE (Customer Premises Equipment – настінне або внутрішнбудинкове телекомунікаційне устаткування, розташоване в приміщенні абонента) зможуть забезпечити високошвидкісним Інтернетом жителів територій, куди високошвидкісне й надійне покриття 5G з якихось причин «не дійшло».

Звичайно в такі місця приходять провайдери провідного й оптоволоконного Інтернету. Але 5G FWA створить серйозну погрозу цьому сектору бізнесу. Адже з 5G в FWA якість ширококутового Інтернету не поступиться оптоволоконному, а вартість підключення й зовсім буде поза конкуренцією, оскільки виключаються підведення оптоволоконна/кабелю, монтажні роботи й налаштування в кожного абонента окремо. Установка CPE так само проста, як установка Wi-Fi роутера, і майже не вимагає обслуговування.

Можливо, у підсумку ринок оптоволоконного/провідного Інтернету сильно перетворить, знайде своє специфічне застосування, але вже ніколи не буде таким масовим, як сьогодні. І навпроти, за прогнозом експертів SNS Telecom, до 2030 року через сервіс FWA за допомогою 5G буде підключено 345 млн

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

абонентів, а абонентських пристроїв CPE буде продано понад 90 млн. У Україні даний сервіс через довжину території може бути досить затребуваний навіть на первісній стадії розгортання мереж 5G.

### **Абонентські модулі 5G Simcom Wireless Solutions**

5G-смартфони й планшети вже зробили в продаж. Компанія Simcom Wireless Solutions, з 2002 року, що спеціалізується на розробках і виробництві модулів стільниковому зв'язку для M2M-ринку, в 2019 році аносувала плани розширити продуктову лінійку модулями 5G. Сьогодні портфоліо модулів поповнено чотирма моделями: SIM8200G, SIM8200EA-M2, SIM8300NA (поки версія тільки для Північної Америки) і SIM8300G-M2.

Усі чотири модулі побудовані на платформі Soc Snapdragon X55 (або SDX55) від Qualcomm, зробленої за технологією 7 нм. Модулі відповідають 15-му релізу специфікації 3GPP. Підтримуються Fallback на LTE-FDD/LTE-TDD/3G, режим EN-DC, massive MIMO і глобальний набір частотних діапазонів. Абонентське устаткування на базі даних модулів зможе працювати як у мережах 5G перехідного періоду в режимі NSA, так і у фінальних мережах 5G у режимі SA, тобто скрізь, де є покриття E-UTRAN або 5G-NR. Модулі 82-й серії підтримують роботу в sub6 G-Діапазоні, а 83-я серія підтримує й міліметровий діапазон (mmWave). Модулі виконані у дві форм-факторах – у корпусі LGA під пайку й у вигляді карти M2. Перший цікавий, коли від модуля потрібен великий набір інтерфейсів і/або механічний спосіб монтажу протипоказаний умовами експлуатації кінцевого виробу. Картки M2 мають стандартний розмір і інтерфейси (PCIe 3.0, USB 3.1, USIM...), що дозволяє передбачити у виробі стільниковий зв'язок як опціональну. У деяких випадках LTE-карту навіть можна замінити на карту 5G.

На даний момент уже є кілька прикладів реалізації проектів на базі модулів 5G, таких як CPE, роутери, дрон-літак, USB-модеми і т.д. По досвіду компанії, від розроблювача потрібна висока компетенція в області конструювання ВЧ-техніки подібного класу, особливо у випадку з модулями 83-й

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

серії, оскільки для роботи в міліметровому діапазоні (mmWave) вони вимагають підключення 2-4 зовнішніх антенних модулів QTM525-2 або QTM527-2 (мал. 40), які повинні задовольняти певним умовам взаємного розташування.

Антенні модулі усередині корпуса сполучають шарувату антенну структуру, блок живлення, фільтри, підсилювачі й ланцюг частотного перетворення. Антенний модуль з'єднується з модулем 5G через гнучкий шлейф і парний ВЧ-кабель, через які поширюються сигнали вертикальної й горизонтальної поляризації (IF-V і IF -H). Для роботи антенних модулів потрібні два джерела живлення, один з них поставляється безпосередньо від модуля, а іншої – від зовнішнього джерела. При цьому модуль управляє включенням і вимиканням антенних модулів окремим цифровим сигналом.

Розроблювачам для тестування модулів 5G надаються відладочні набори, за допомогою яких можна на початковому етапі оцінити роботу в діапазонах sub6G і mmWave без більших витрат часу.

Говорити, що мережі 5G придбали фінальний вид, ще рано. Нам має бути дочекатися 16-го релізу, який за задумом консорціуму закрий 2-ю фазу специфікацій і визначить початок масового впровадження опорних мереж 5-го покоління. Однак це не заважає вже сьогодні починати роботи з вивчення нової технології, що закладе фундамент для майбутніх проектів, адже мережі радіодоступу 5G-NR у загальному доступі вже є, хоч і в обмеженому виді. Необхідно розуміти, що мережі 5G рано або пізно стануть нашою повсякденністю й перехід від Nsa-режиму в SA буде гладким і непомітним, а наробітку, зроблені сьогодні, не пропадуть даремно.

### 3.2 Розробка структурної схеми

Відчутний ріст показника швидкості широкосмугового доступу в мережах 5G буде в основному забезпечуватися за рахунок застосування технології Massive MIMO (дана технологія має на увазі використання багатоелементних цифрових

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

антенних ґрат, з кількістю антенних елементів 128, 256 і більш) при передачі даних у більш високому міліметровому діапазоні хвиль (відомий як mmWave, який відповідає частотам від 30 ГГц до 300 ГГц), а також новими радіо - алгоритмами, які дозволять більш ефективно використовувати наявний частотний ресурс. Новий дизайн архітектур і алгоритмів вплине на всі складові частини нових 5G-систем, від антен і радіочастотних складених елементів передавального устаткування до алгоритмів обробки вихідного сигналу (baseband). Продуктивність цих підсистем настільки тісно зв'язана, що їх необхідно розробляти й оцінювати разом.

Нові розробки 5G у новому міліметровому діапазоні хвиль також зажадають використання антенних ґрат Massive MIMO із сотнями антенних елементів на базових станціях мережі (enodeb). Наявність безлічі антенних елементів, компактно розташовуваних у межах щодо невеликого простору, є надзвичайно важливим фактором, що виявляють істотний вплив на досягнення високої ефективності застосування технології формування адаптивної діаграми спрямованості для частот mmWave. Тому що від робочої довжини хвилі прямо залежить припустимий розмір випромінюючих елементів, то розмір нових антенних елементів може виявитися до 100 раз менше, чим застосовувані зараз у сучасних антенних ґратах для надвисоких частот. Високонправленні промені дозволяють також мінімізувати втрати при передачі сигналу, тому що фокусування потужності передачі сигналу здійснюється в певному напрямку. Поведінкове (функціональне) моделювання радіочастотних і цифрових елементів систем Massive MIMO може значно прискорити розробку й оптимізацію адаптивної діаграми спрямованості.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

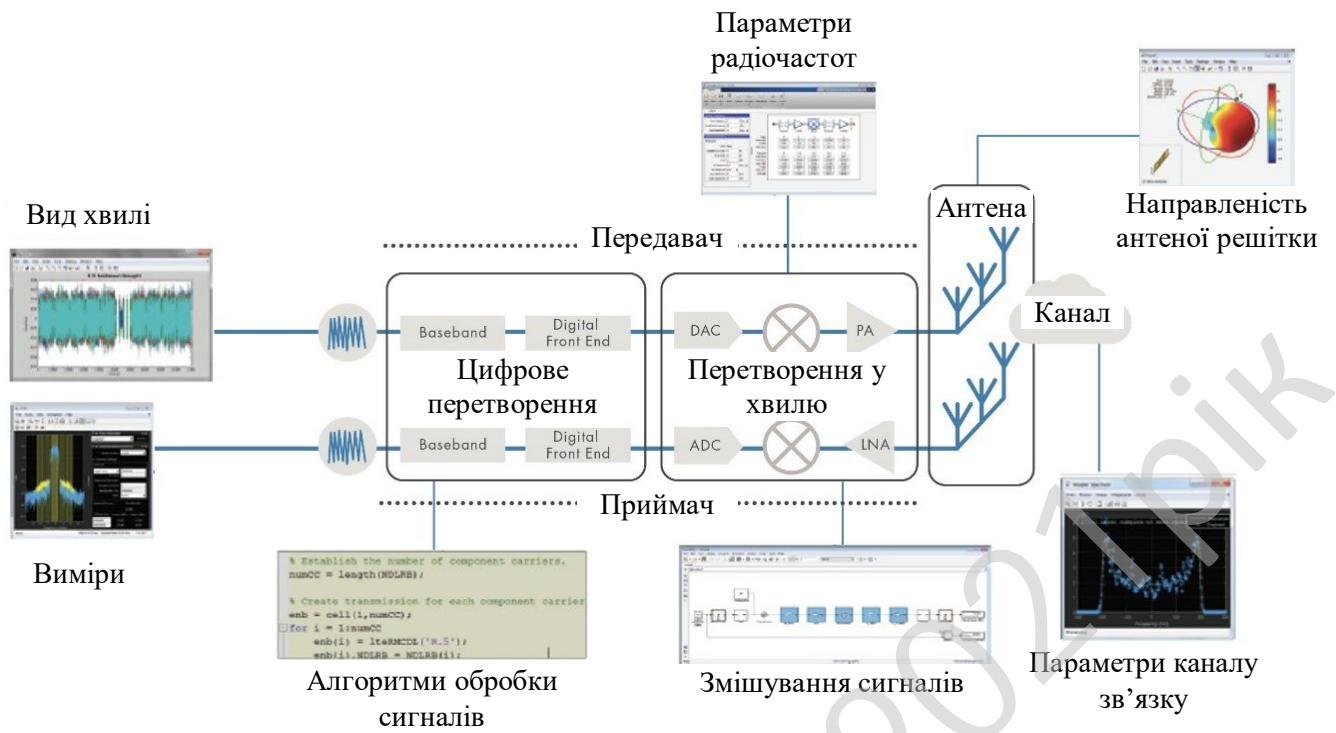


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи

Новий дизайн архітектур і алгоритмів вплине на всі складові частини 5G-систем, від антен і радіочастотних складених елементів передавального устаткування до алгоритмів обробки вихідного сигналу (baseband). Продуктивність цих підсистем настільки тісно зв'язана, що їх необхідно розробляти й оцінювати разом.

### Поведінкове (функціональне) моделювання для Massive MIMO

Досягнення оптимального дизайну сучасних бездротових систем вимагає використання комбінованих моделей антенних ґрат і алгоритмів формування адаптивної діаграми спрямованості для моделювання їх взаємодії, а також визначення ступені впливу на продуктивність усієї системи в цілому. Це може виявитися непосильним завданням для нині використовуваного інструментарію для проектування 3G– і 4G-рішень, у яких, звичайно, функціональні можливості для дизайну антени відділені від розробки архітектури системи й алгоритмів формування діаграми спрямованості. Також, у більшості випадків, час симуляції MIMO триває в десятки раз довше, чим симуляція 3G і 4G.

Моделювання антеною ґрати на поведінковому рівні дозволить розв'язати ці проблеми й буде тем ефективніше, чим більше 5G-симуляцій буде проведено. Моделювання на рівні поведінки суттєво зменшує час симуляції. Це дозволяє інженерам експериментувати з різними архітектурами антенних ґрат і алгоритмами, імітувати продуктивність цих антенних ґрат і пов'язаних з ними алгоритмів, а також ітераційно коректувати параметри для зменшення негативного ефекту від перетинання сигналу антен і домагатися кращого керування діаграмою спрямованості.

### 3.3 Розробка функціональної схеми

У міру того, як менші довжини хвиль дозволяють здійснювати реалізації Massive MIMO у рамках невеликих форм-факторів, інженери зіштовхнуться з новими проблемами, пов'язаними з визначенням траєкторії сигналу і його передачею в цілому, тому що завантаженість частот mmWave буде рости в міру того, як буде з'являтися усе більше бездротових систем і рішень з підтримкою 5G New Radio. В ідеалі, щоб добитися кращого керування діаграмою спрямованості й забезпечити більшу гнучкість для майбутніх систем, необхідно мати незалежний контроль навантажень для кожного елемента антеною ґрати, реалізованого за допомогою модуля передачі/приймання (transmit/receive, T/R), виділеного для кожного такого елемента. Однак, як правило, такий підхід є недоцільним через обмеження за вартістю, розміру й споживаної потужності.

Формування діаграми спрямованості гібридної антени – це спосіб, який розділяє ваше завдання забезпечення кращого керування діаграмою спрямованості на цифрові й радіочастотні складові, дозволяючи знизити вартість кінцевого продукту, прямо пов'язаної з кількістю використовуваних радіочастотних ланцюгів. Діаграми спрямованості гібридних антен дозволяють об'єднати частина елементів антеною ґрати в підрешітки, визначивши для кожної такий підрешітки по одному модулю передачі/приймання.

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Для інженерів, які прагнуть використовувати цю стратегію у своїх проєктах 5G, ключовою проблемою, з якої вони зіштовхнуться, стане знаходження оптимального балансу між забезпеченням необхідних параметрів продуктивності й дотриманням обмежень по витратах на реалізацію кінцевого продукту. Програмні платформи, такі як Simulink, дозволять сполучати уніфіковане мульти-доменне моделювання й проведення симуляцій радіочастотних і цифрових доменів. Можливість пакетної симуляції схем радіочастотних елементів забезпечує значне прискорення моделювання гібридної системи.

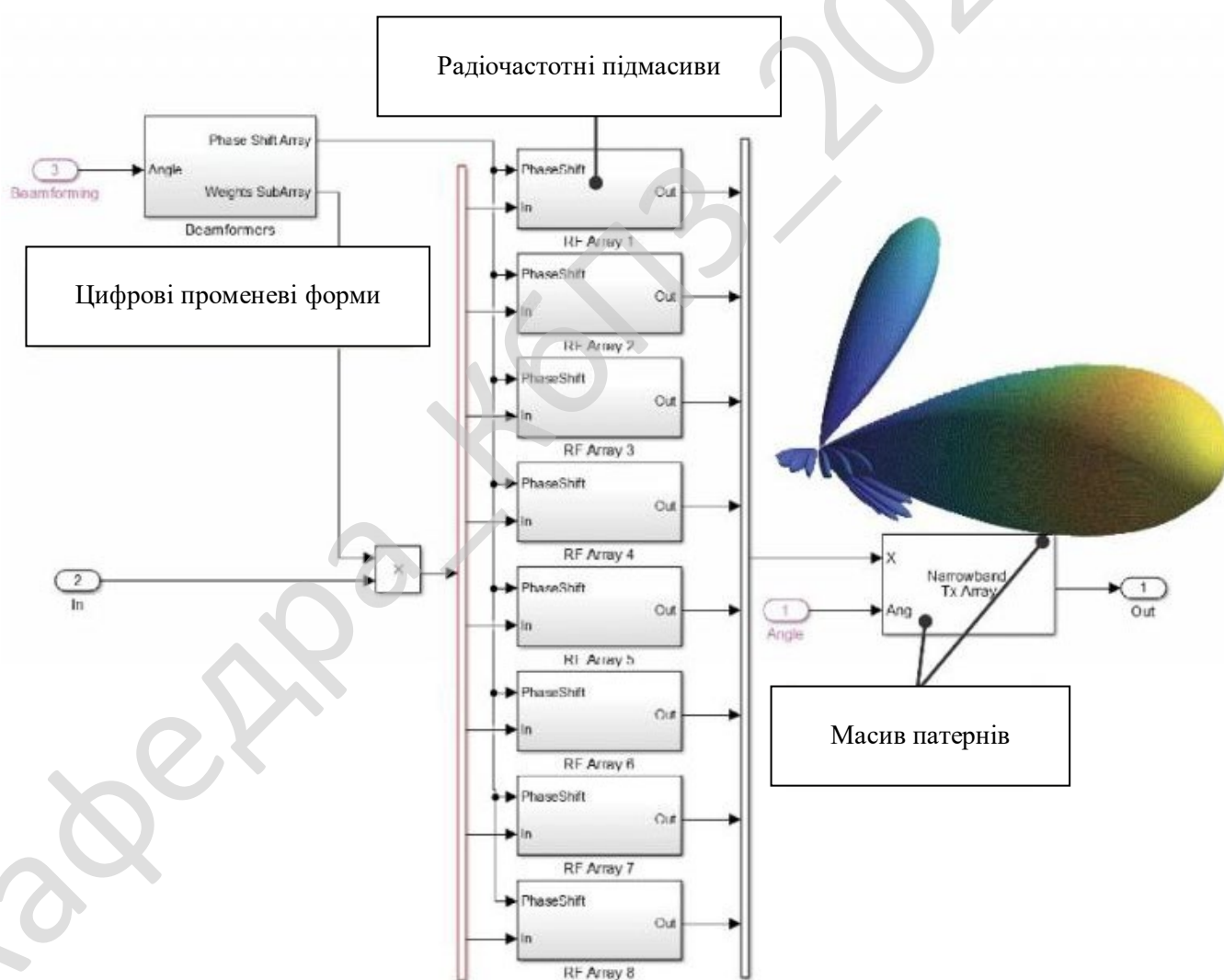


Рисунок 3.2 – Функціональна схема системи

На рисунку 3.2 продемонстрований сегмент мульти-доменної моделі, що містить цифрові значення діаграми спрямованості, які використовуються для формування сигналів радіочастотних підрешіток, де застосовуються фазові зрушення. Отримані гібридні значення створюють потрібні паттерни для антеною ґрат і допомагають підготувати системи для проведення моделювання.

Сегмент мульти-доменної моделі, що містить цифрові значення діаграми спрямованості, які використовуються для формування сигналів радіочастотних підрешіток, де застосовуються фазові зрушення.

### **Моделювання й лінеаризація підсилювачів потужності для систем 5G New Radio**

Строгі вимоги до лінійності підсилювачів потужності (power amplifiers, PA) як бу ли важливі для минулих стандартів, так і продовжать залишатися критично важливою характеристикою кожного майбутнього передавача 5G. Відсутність винної уваги до характеристик підсилювачів потужності при розробці нових продуктів для роботи у високолінійних регіонах приведе до того, що рішення виявляться попросту неконкурентоспроможними, особливо коли мова йде про більш високі частоти й широкосмугових каналах зв'язку, які прямо асоціюються з 5G. Із цієї причини для підвищення ефективності передавача й одночасного обмеження викривлення сигналу й нівелювання міжканальних перешкод звичайно застосовуються методи цифрового передвикривлення (digital predistortion, DPD).

Розробка високоякісного алгоритму DPD є складним завданням, оскільки вона вимагає глибокого розуміння ефектів, створюваних підсилювачем потужності й суміжними підсистемами, такими як антена. Оскільки підсилювачі потужності самі формують нелінійні викривлення, що залежать від ефекту пам'яті, то характеристика підсилювачів потужності сильно залежить від типу сигналу, з яким він працює.

Через ці складності алгоритми DPD найчастіше розробляються в лабораторіях, використовуючи платформи швидкого прототипування, які

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

дозволяють проводити тестування алгоритмів на основі реально існуючого підсилювача потужності. Хоча цей підхід і корисний для перевірки й тонкого настроювання алгоритмів, його набагато складніше застосовувати, коли реально існуючий підсилювач потужності ще недоступний, або коли основна мета моделювання – вивчення області проектування алгоритму цифрового передвикривлення.

### **Адаптація до нових радіочастотних алгоритмів 5G**

Стандарт бездротового зв'язку 5G забезпечить значно більш високу пропускну здатність мобільного широкосмугового зв'язку завдяки режиму поліпшеного мобільного широкосмугового доступу (enhanced Mobile Broadband, eMBB). Ключовими елементами нового стандарту 5G є:

- Більш коротка тривалість слотів, відповідна до збільшення кількості, що піднесуть, яка дозволяє побільшати пропускну здатність каналу й зменшити час затримки.

- Нові просунуті схеми кодування, такі як LDPC (Low-density parity-check code, код з малою щільністю перевірок на парність) для передачі даних і полярні коди для контролювання переданої інформації, які використовуються для виправлення помилок і підвищення швидкості передачі даних.

- Удосконалена форма передачі сигналу завдяки поліпшеним характеристикам позаполосного випромінювання (out-of-band emissions, OOBЕ), яка дозволяє більш ефективно використовувати ресурси смуги пропускання.

- Моделі просторових каналів для роботи на нинішні (<6 ГГц) і більш високих mmWave (> 28 ГГц) частотах.

У той час, як у цих елементах закладений потенціал для підвищення ефективності майбутніх систем, вони можуть значно побільшати складність дизайну нових рішень і внести істотні затримки у ваш графік розробки. Тому, при реалізації вищезгаданих технологій для нових продуктів 5G, використання моделювання допоможе інженерам упоратися з вищезгаданими труднощами на більш ранніх стадіях проекту.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Спеціалізовані інструменти для проектування дозволяють значно спростити вивчення різних алгоритмів і пошук компромісів при проектуванні архітектури ще на ранніх стадіях розробки. Завдяки моделюванню різних компонентів системи 5G в одній і тій же середовищі з реалістичними каналами поширення, інженери мають можливість перевірити продуктивність системи повного циклу ще до того, як вона буде відправлена в тестову лабораторію.

### 3.4 Розробка діаграми процесів

Відповідно до методичних рекомендацій розроблення графічної частини кваліфікаційної бакалаврської роботи розглянемо розроблену діаграму процесів яка зображена на рисунку 3.3.

Розроблена діаграма взаємодії процесів використовується для представлення та візуалізації процесів обробки даних тобто структурного проектування бакалаврської роботи.

Основні складові елементи діаграми взаємодії процесів це потоки даних:

- Репозиторії, потік сховища даних.
- Потоки зовнішні по відношенню до системи сутності.
- Процеси які являють собою трансформацію даних в рамках описуваної системи.
- Потоки даних гібридні між елементами трьох попередніх типів.

Відповідно до документації основна будова діаграми процесів полягає у графічному представленні складу сукупностей даних, що характеризуються як співвідношення різних частин кожної з сукупностей. Склад статистичної сукупності графічно може бути представлений як за допомогою абсолютних, так і відносних показників. Графічне зображення складу сукупності по абсолютними і відносними показниками сприяє проведенню більш глибокого аналізу і дозволяє проводити аналіз системи.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



## 4 РЕАЛІЗАЦІЯ РОБОТИ. РОЗРАХУНКИ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВІРНІСТЬ ПРОЕКТНИХ ТА ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ

### 4.1 Блок-схеми та опис алгоритмів функціонування системи

Розглянемо алгоритм роботи основної програми. Його блок-схема зображена на рисунку 4.1. З рисунку видно, що після запуску програми спочатку відбувається вивід основного вікна системи.

Потім здійснюється збір інформації про мережу з відображенням структури та поточного стану мережі. Далі відбувається виведення даних робочих станцій мережі та поточного стану трафіку з подальшим запитом оптимізації з скануванням та розрахунком оптимального розташування елементів мережі. У подальшому проходить запити перегляду ресурсів та внесення змін до мережі з проведенням відповідних змін.

На рисунку 4.2 зображено виклик підпрограми де відбувається ініціалізація обертів архітектури, сканування моделі мережі, отримання списку всіх елементів та подальша обробка даних системи.

Приведена нижче функція реалізує вищеперераховані дії.

```
procedure TForm1.ClickMeClick(Sender: TObject);
var
  N: TNetworkNeighborhood;
  List: TStringList;
  i, j: Integer;
  ListViewItem: TListItem;
  WorkgroupNode, ComputerNode: TTreeNode;
begin
  Screen.Cursor:=crHourGlass;
  try
    // Ініціалізація об'єктів та сканування корпоративної мережі
    N:=TNetworkNeighborhood.Create;
```

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

try

// Отримання списку всіх комп'ютерів в корпоративній мережі

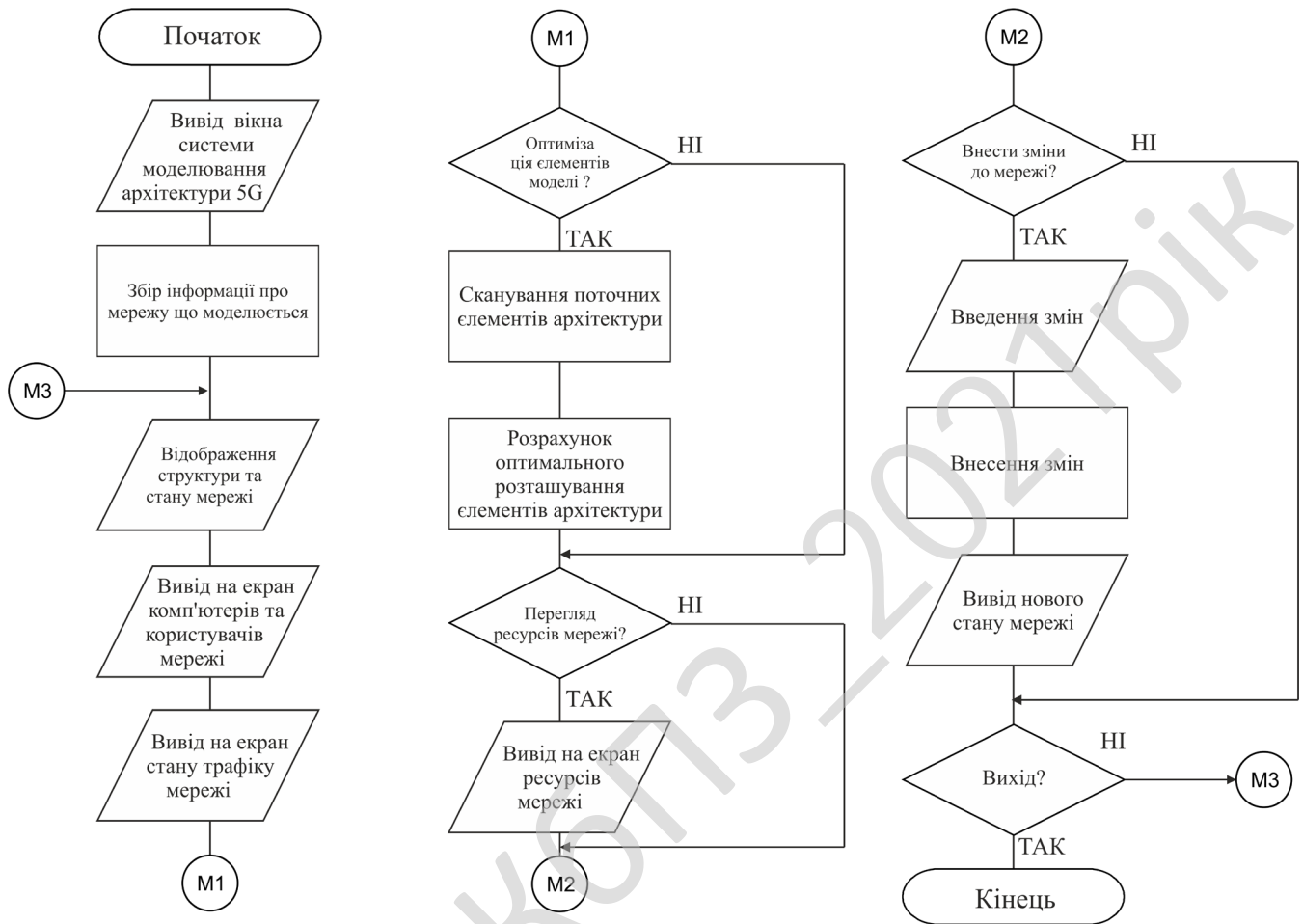


Рисунок 4.1 – Блок-схема основної програми

```
Memol.Lines.Clear;  
N.ListComputers(Memol.Lines);  
// Отримання списку всіх робочих груп і комп'ютерів в корпоративній  
мережі, відсортованих в алфавітному порядку  
List:=TStringList.Create;  
ListView1.Items.Clear;  
try  
N.ListNetwork(List);  
for i:=0 to List.Count - 1 do begin  
  ListViewItem:=ListView1.Items.Add;  
  ListViewItem.Caption:=List[i];  
  ListViewItem.ImageIndex:=Integer(List.Objects[i]);  
end;
```



SDynArrayCountError = `Перевищена довжина масиву (%d)`;

SSharedMemoryError = `Не могу створити файл`;

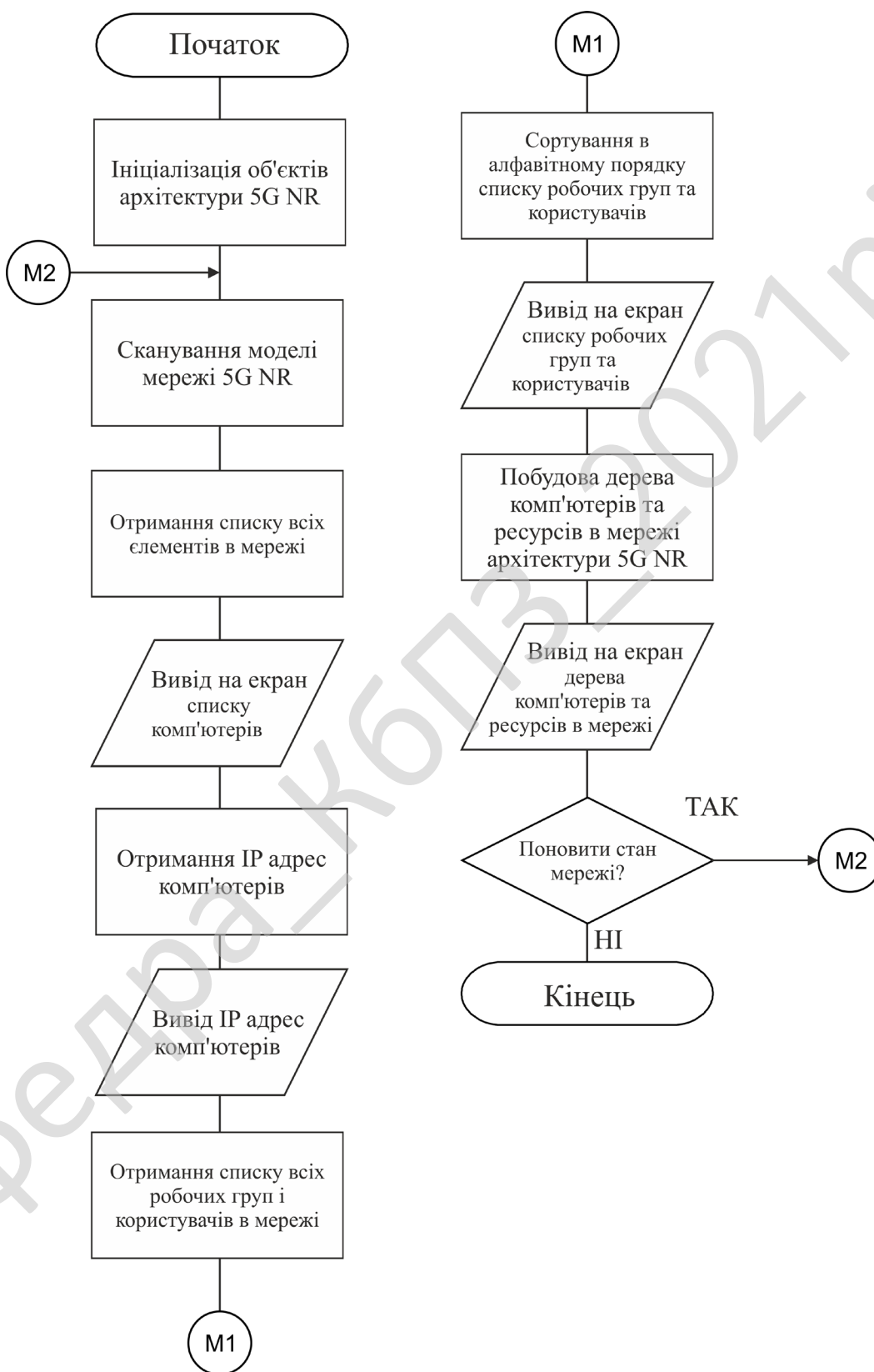


Рисунок 4.2 – Блок-схема роботи підпрограми

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ

Арк.

49

SCannotInitTimer = ` Не можу ініціалізувати таймер`;

SPrinterIndexError = ` Принтер не доступний (%d)`;

SIndicesOutOfRange = ` Недопустимий індекс матриці [%d:%d]`;

SRowIndexOutOfRange = ` Недопустиме занчення рядка матриці (%d)`;

SColIndexOutOfRange = ` Недопустиме занчення стовбчика матриці (%d)`;

SNoAdminRights = ` У Вас немає прав адміністратора`;

SFileError = ` Помилка %s файл %s%s`;

SFileReading = ` читання`;

SFileWriting = ` запис`;

SFileError002 = ` - файл не знайдено `;

SFileError003 = ` - шлях не знайдено `;

SFileError004 = ` - не можу відкрити файл`;

SFileError005 = ` - немає доступу`;

SFileError014 = ` - не достатньо пам"яті`;

SFileError015 = ` - не можу знайти драйвер`;

SFileError017 = ` - не можу перемістити файл`;

SFileError019 = ` - носій захищений від запису`;

SFileError020 = ` - не можу знайти пристрій`;

SFileError021 = ` - пристрій не відкривається для читання`;

SFileError022 = ` - пристрій не може розпізнати команду`;

SFileError025 = ` - вказана область не знайдена `;

SFileError026 = ` - пристрій недоступний`;

SFileError027 = ` - сектор не знайдено `;

SFileError029 = ` - помилка запису на пристрій`;

SFileError030 = ` - помилка читання з пристроєм`;

SFileError032 = ` - файл використовується іншою програмою`;

SFileError036 = ` - занадто багато відкритих файлів`;

SFileError038 = ` - досягнутий кінець файлу`;

SFileError039 = ` - диск переповнений`;

SFileError050 = ` - запит не підтримується`;

SFileError051 = ` - віддалений комп'ютер недоступний`;

SFileError052 = ` - у корпоративній мережі знайдені ідентичні імена`;

SFileError053 = ` - мережний шлях не знайдено `;

SFileError054 = ` - корпоративна мережа зайнята`;

SFileError055 = ` - ресурс корпоративної мережі або пристрій недоступний`;

SFileError057 = ` - апаратна помилка в мережному адаптері`;

SFileError058 = ` - сервер не в змозі виконувати дану дію`;

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50



$$\vec{a}(X) = \vec{a} = \sum_{i=0}^{N-1} a_i X^i = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_{N-2}, a_{N-1}]$$

Як і будь-який молодий алгоритм, NTRUEncrypt погано вивчений, хоча й був офіційно затверджений для використання в сфері фінансів комітетом Accredited Standards Committee X9.[1]

Існує реалізація NTRUEncrypt з відкритим вихідним кодом.[2]

NTRUEncrypt, що споконвічно називався NTRU, був винайдений в 1996 році й представлений на конференціях CRYPTO, Конференція RSA, Eurocrypt. Причиною, що послужила початком розробки алгоритму в 1994 році, стала стаття [3], у якій говорилося про легкість злому існуючих алгоритмів на квантових комп'ютерах, які, як показало час, не за горами[4]. У цьому ж році, математики Jeffrey Hoffstein, Jill Pipher і Joseph H. Silverman, що розробили систему разом із засновником компанії NTRU Cryptosystems, Inc. (пізніше перейменованої в SecurityInnovation), Даніелем Лієманом (Daniel Lieman) запатентували свій винахід.[5]

### Кільця усічених багаточленів

NTRU оперує над багаточленами ступеня не переважаючої  $N - 1$ :

$$\mathbf{a} = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \dots + a_{N-2} X^{N-2} + a_{N-1} X^{N-1},$$

де коефіцієнти  $a_0, \dots, a_{N-1}$  – цілі числа. Щодо операцій додавання й множення за модулем багаточлена  $X^N - 1$ . Такі багаточлени утворюють кільце  $R$ , назване кільцем усічених багаточленів, що ізоморфно кільцю відносин:

$$\mathbb{Z}[X]/(X^N - 1).$$

NTRU використовує кільце усічених багаточленів  $R$  разом з діленням за модулем на взаємно прості числа  $p$  і  $q$  для зменшення коефіцієнтів багаточленів.

У роботі алгоритму також використовуються зворотні багаточлени в кільці усічених багаточленів.

Слід зазначити, що не всякий багаточлен має зворотний, але якщо зворотний поліном існує, то його легко обчислити.[6][7]

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52







$$b = a \pmod{3} = -X - X^2 + X^3 + X^4 + X^5 + X^7 - X^8 - X^{10} \pmod{3}$$

Заключний крок – перемноження полінома  $b$  із другою половиною закритого ключа  $f_p$ :

$$c = f_p \cdot b = f_p \cdot f \cdot m \pmod{3} = m \pmod{3}$$

$$c = -1 + X^3 - X^4 - X^8 + X^9 + X^{10}$$

Який є вихідним повідомленням, що передавала Аліса.

Кафедра КБПЗ – 2021 рік

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

## 5 МЕТОДИКА ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ В ПРОМИСЛОВУ ЕКСПЛУАТАЦІЮ

Програма має простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який зображений на рисунку 5.1. З рисунку головного вікна можна побачити що інтерфейс головного вікна розподілено на наступні функціональні розділи:

- Функціональної кнопки управління ресурсами.
- Навігаційного меню яке викликається натисканням правої клавіші маніпулятора миші.
- Розділів: Списку користувачів; Адреси хоста; Дерева ресурсів; Просканованих ресурсів; Ім'я ПК хоста; Пакетів даних .
- Розділу виведення результату роботи системи.

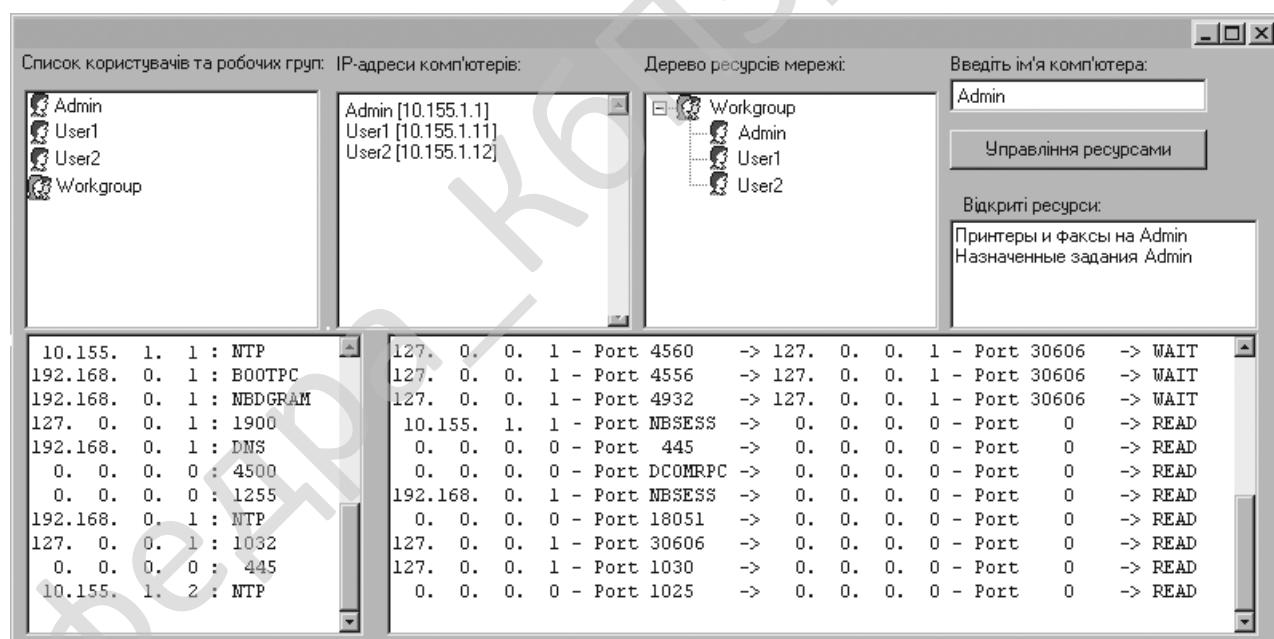


Рисунок 5.1 – Головне вікно ПЗ

На рисунку 5.2 зображено авторські дані розробленого програмного забезпечення. Розроблена програма має дуже простий і зрозумілий інтерфейс з

користувачем. Кожен, хто в достатньому обсязі володіє операційним середовищем Windows без особливих складностей освоїть і цю програму, оскільки її інтерфейс інтуїтивно зрозумілий. Якщо програма не видала ніяких помилок, і працює, то можна використовувати, інакше слід слідувати інструкціям, які пропонує програма.

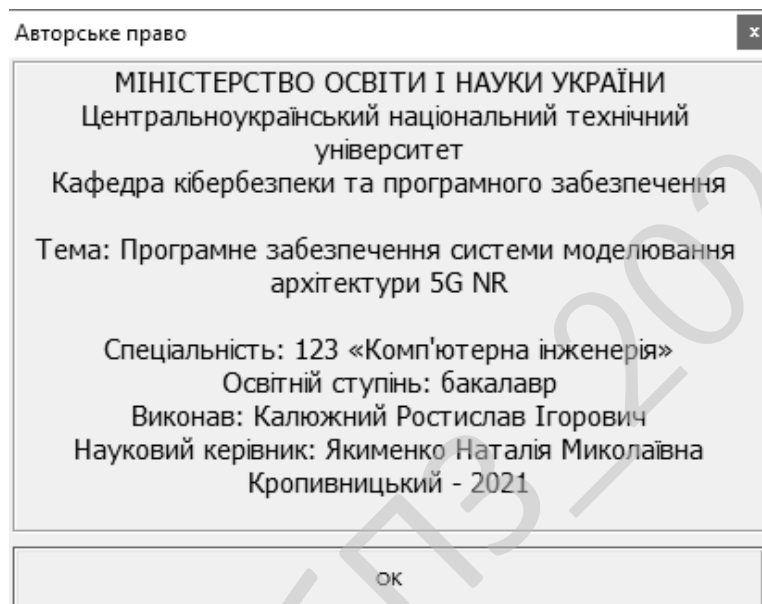


Рисунок 5.2 – Авторське право

Розглянемо процес впровадження програмного забезпечення, це процес налаштування програмного забезпечення під певні умови використання, а також навчання користувачів роботі з програмним продуктом. Впровадження програмного забезпечення це усі дії, що роблять розроблену програмну систему готовою до використання. Даний процес є частиною життєвого циклу програмного забезпечення.

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		58

## 6 ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

Програмне забезпечення, створене в результаті виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи, призначено для системи моделювання архітектури 5G NR.

В межах України в недостатній мірі представлені вітчизняні розробки в цій області.

Рішення завдання полягало у вирішенні наступних задач:

- Був проведений огляд існуючих систем моделювання архітектури 5G NR.
- Досліджена система моделювання архітектури 5G NR.
- На основі отриманих результатів досліджень створена програмна реалізація системи моделювання архітектури 5G NR.

Розроблені під час виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи алгоритми дозволяють успішно вирішувати завдання моделювання архітектури 5G NR.

Розроблене програмне забезпечення має простий, дружній та зручний інтерфейс користувача, що забезпечує легкість у освоєнні роботи програмного продукту, зручність у використанні, і не потребує особливих спеціальних знань.

При створенні програмного забезпечення було використано об'єктно-орієнтований підхід, що відповідає сучасним тенденціям у галузі розробки комерційних програмних систем.

Програма реалізована на мові високого рівня Delphi 10.4 Sydney. Дана мова програмування дозволяє найбільш ефективно обробляти дані призначені для системи моделювання архітектури 5G NR. Це дозволило мінімізувати строк розробки програмного забезпечення, і, як слід, зменшити витрати на його розробку. Запропоноване програмне забезпечення ділиться на загальне програмне забезпечення, що поставляється із засобами обчислювальної техніки й спеціальне

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

програмне забезпечення, що спеціально розроблене для даної конкретної системи й включає програми, що реалізують її функції.

Програма призначена для виконання під управлінням багатозадачної операційної системи Windows 10.

Даються необхідні рекомендації з установки розробленого програмного забезпечення.

Для підвищення рівня безпеки запропоновано застосовувати алгоритм NTRU.

В цілому створене програмне забезпечення підтверджує правильність використаних проектних рішень та повністю відповідає вимогам технічного завдання. Створене програмне забезпечення має потенційну можливість для подальшого вдосконалення і застосування у різних галузях.

					КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Батуев Б. Б. SIM7000E/SIM7000E-N: применение энергосберегающих режимов PSM и eDRX в сети NB-IoT // Беспроводные технологии. 2017. №3
2. Кормен Т. Алгоритмы: построение и анализ / Томас Кормен, Чарльз Лейзерсон, Рональд Ривест, Клиффорд Штайн. – М.: "Вильямс", 2005. – 1296 с.
3. Конахович Г.Ф. Сети передачи пакетных данных / Г.Ф. Конахович, В.М. Чуприн. – К.: МК-Пресс, 2006. – 272 с.
4. Королев А.В. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях / А.В. Королев, Г.А. Кучук, А.А. Пашнев. – Х.: ХВУ, 2003. – 224 с.
5. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Евгений Андреевич Кучерявый. – СПб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.
6. Кучук Г.А. Управление ресурсами инфотелекоммуникаций / Г.А. Кучук, Р.П. Гахов, А.А. Пашнев. – М.: Физматлит, 2006. – 220 с.
7. Лагутин В.С., Степанов С.Н. Телетрафик мультисервисных сетей связи / В.С. Лагутин, С.Н. Степанов. – М.: Радио и связь, 2000. – 320 с.
8. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах: пер. с англ. / Э. Майника; под ред. Е.К. Масловского. – М.: Мир, 1981. – 321 с.
9. Мохамад Гани Абу Таам Разработка математической GERT-модели технологии распространения компьютерных вирусов в информационно-телекоммуникационных сетях / А.А. Смирнов, Мохамад Гани Абу Таам // Информационные системы в управлении, образовании, промышленности: монография / Под редакцией профессора В.С. Пономаренко. – Х.: Вид-во ТОВ «Щедра садиба плюс», 2014. – 498 с.
10. Мохамад Гани Абу Таам Метод управления доступом в интеллектуальных узлах коммутации / Мохамад Гани Абу Таам,

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

А.А.Смирнов // Информационные технологии и защита информации в информационно-коммуникационных системах: монография / Под редакцией профессора В.С. Пономаренко. – Х.: Вид-во ТОВ «Щедра садиба плюс», 2015. – 486 с.

11. Мохамад Гани Абу Таам Математическая GERT-модель технологии передачи метаданных в облачные антивирусные системы / В.В.Босько, А.А.Смирнов, И.А.Березюк, Мохамад Гани Абу Таам // Збірник наукових праць "Системи обробки інформації". – Випуск 1(117). – Х.: ХУПС – 2014. – С. 137-141.

12. Мохамад Гани Абу Таам Структурно-логическая GERT-модель технологии распространения компьютерных вирусов / А.А.Смирнов, И.А.Березюк, Мохамад Гани Абу Таам // Системи управління, навігації та зв'язку. – Випуск 1(29). – П.: ПНТУ. – 2014. – С. 120-125.

13. Мохамад Гани Абу Таам Сравнительные исследования математических моделей технологии распространения компьютерных вирусов в информационно-телекоммуникационных сетях / Мохамад Гани Абу Таам, А.А. Смирнов, А.В. Коваленко, С.А. Смирнов // Збірник наукових праць "Системи обробки інформації". – Випуск 9(125). – Х.: ХУПС – 2014. – С. 105-110.

14. Мохамад Гани Абу Таам Математическая модель интеллектуального узла коммутации с обслуживанием информационных пакетов различного приоритета / Мохамад Гани Абу Таам, А.А. Смирнов, Н.С. Якименко, С.А. Смирнов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Випуск 4 (41). – Харків: ХУПС. – 2014. – С. 48-52.

15. Мохамад Гани Абу Таам Исследование показателей качества функционирования интеллектуальных узлов коммутации в телекоммуникационных системах и сетях / Мохамад Гани Абу Таам, А.А. Смирнов, Н.С. Якименко, С.А. Смирнов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Випуск 4(17). – Харків: ХУПС. – 2014. – С.90-95.

16. Мохамад Гани Абу Таам Усовершенствованный алгоритм управления доступом к «облачным» телекоммуникационным ресурсам / Мохамад Гани Абу

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Таам, А.А. Смирнов, Н.С. Якименко, С.А. Смирнов // Збірник наукових праць "Системи обробки інформації". – Випуск 1(126). – Х.: ХУПС – 2015. – С. 150-153.

17. Мохамад Гани Абу Таам Анализ и исследование методов управления сетевыми ресурсами для обеспечения антивирусной защиты данных / Мохамад Гани Абу Таам, А.А. Смирнов, С.А. Смирнов // Системи озброєння і військова техніка. – Випуск 3(43) – Х.: ХУПС – 2015. – С. 100-107.

18. Мохамад Гани Абу Таам Исследование эффективности метода управления доступом к облачным антивирусным телекоммуникационным ресурсам / Мохамад Гани Абу Таам, А.А. Смирнов, С.А. Смирнов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Випуск 3(19). – Х.: ХУПС. – 2015. – С. 134-141.

19. Mohamad Abou Taam Method of controlling access to intellectual switching nodes of telecommunication networks and systems / A.A. Smirnov, Mohamad Abou Taam, S.A. Smirnov // International Journal of Computational Engineering Research (IJCER). – Volume 5, Issue 5. – India. Delhi. – 2015. – P. 1-7.

20. Мохамад Гани Абу Таам GERT-модель технологии передачи данных в облачные антивирусные системы / А.А. Смирнов, В.В. Босько, Мохамад Гани Абу Таам // Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку». м. Харків. 12-13 березня 2014 р. – Харків. АВВ МВС. – 2014. – С. 18-19.

21. Мохамад Гани Абу Таам Математическое моделирование технологии передачи сигнатур в облачные антивирусные системы / Мохамад Гани Абу Таам, А.А. Смирнов // Збірник тез VI міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми і перспективи розвитку ІТ-індустрії”. м. Харків. 17-18 квітня 2014 р. – Харків: ХНЕУ. – 2014. – С. 260.

22. Мохамад Гани Абу Таам Анализ требований к качеству обслуживания в информационно-телекоммуникационных системах / А.А. Смирнов, Мохамад Гани Абу Таам // Збірник тез XVI

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

міжнародного науково-практичного семінару «Комбінаторні конфігурації та їх застосування». м. Кіровоград. 11-12 квітня 2014 р. – Кіровоград: КНТУ. – 2014. – С. 124-126.

23. Мохамад Гані Абу Таам Дослідження та реалізація GERT-моделі технології розповсюдження комп'ютерних вірусів для захисту телекомунікаційних систем / Мохамад Гані Абу Таам, С.А. Смирнов // Збірник тез науково-практичної конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія». м. Кіровоград. 4 грудня 2014 р. – Кіровоград: КНТУ. – 2014. – С. 168.

24. Мохамад Гані Абу Таам Исследование математических моделей технологии распространения компьютерных вирусов / А.А. Смирнов, Мохамад Гані Абу Таам, С.А. Смирнов // Збірник наукових праць міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні питання забезпечення кібернетичної безпеки та захисту інформації». м. Київ. 25-28 лютого 2015 р. – Київ: Європейський університет. – 2015. – С. 90-91.

25. Мохамад Гані Абу Таам Метод управления доступом к «облачным» ресурсам для защиты телекоммуникационных систем / Мохамад Гані Абу Таам, А.А. Смирнов, С.А. Смирнов // Збірник тез всеукраїнської науково-практичної конференції «Інформаційна безпека держави, суспільства та особистості». м. Кіровоград. 16 квітня 2015. – Кіровоград: КНТУ. – 2015. – С. 50-52.

26. Мохамад Гані Абу Таам Разработка метода управления доступом в интеллектуальных узлах коммутации / А.А. Смирнов, Мохамад Гані Абу Таам, С.А. Смирнов // Збірник тез VII міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку ІТ-індустрії». м. Харків. 17-18 квітня 2015 р. – Харків: ХНЕУ. – 2015. – С. 14.

27. Мохамад Гані Абу Таам Реализация метода управления доступом в интеллектуальных узлах коммутации / А.А. Смирнов, Мохамад Гані Абу Таам // Збірник тез XVII міжнародного науково-практичного семінару «Комбінаторні конфігурації та їх застосування». м. Кіровоград. 17-18 квітня 2015 р. – Кіровоград: КНТУ. – 2015. – С. 91-92.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

28. Мохамад Гани Абу Таам Реализация математической модели интеллектуального узла коммутации для обеспечения защищенности телекоммуникационной сети / Мохамад Гани Абу Таам, А.А. Смирнов, С.А. Смирнов // Збірник тез II Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції «Інформаційна та економічна безпека» (INFECO-2015)». м. Харків. 21-22 травня 2015 р. – Харків: ХІБС УБС НБУ. – 2015. – С. 20-24.

29. Мохамад Гани Абу Таам Разработка математической модели технологии распространения компьютерных вирусов в информационно-телекоммуникационных сетях / Мохамад Гани Абу Таам, А.А. Смирнов, С.А. Смирнов // Сборник тезисов XI международной конференции "Стратегия качества в промышленности и образовании". г. Варна. Болгария. 01 – 06 июня 2015 г – Варна. ТУВ. – 2015. – С. 488-491

30. Мохамад Гани Абу Таам Метод управления доступом к облачным телекоммуникационным ресурсам для обеспечения защиты данных / Мохамад Гани Абу Таам, А.А. Смирнов, С.А. Смирнов // Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерні технології та інформаційна безпека». м. Кіровоград. 2-3 липня 2015 р. – Кіровоград: КНТУ. – 2015. – С. 4-5.

31. Мохамад Гани Абу Таам Имитационная модель системы управления доступом к облачным антивирусным телекоммуникационным ресурсам / Мохамад Гани Абу Таам, А.А. Смирнов, С.А. Смирнов // Збірник тез першої всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективні напрями захисту інформації». м. Затока. 7-9 вересня 2015 р. – Одеса: ОНАЗ. – 2015. – С. 90-94.

32. МСЭ-Т Рекомендация G.101. Международные телефонные соединения и цепи – Общие определения //11/2003. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: [http://www. telecom61.ru/SharedFiles/Download.aspx? ...pageid=106](http://www.telecom61.ru/SharedFiles/Download.aspx?...pageid=106)

33. Одом Ш. Коммутаторы CISCO / Ш. Одом, Х. Ноттингем – М.: "Кудиц-Образ", 2003. – 528 с.

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65





49. Столлингс В. Современные компьютерные сети / Вильям Столлингс.– СПб.: Питер, 2003. – 778 с.

50. Таненбаум Э. Компьютерные сети / Эндрю Таненбаум; пер. с англ. А. Леонтьев. – СПб.: Питер, 2002. – 848 с.

51. Телекоммуникационные системы и сети: учебное пособие. В 3 томах / [В.В. Величко, Е.А. Субботин, В.П. Шувалов, А.Ф. Ярославцев]; под ред. В.П. Шувалова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005, т. 3 – 592 с.

52. Уолрэнд Дж. Телекоммуникационные и компьютерные сети / Дж. Уолрэнд. – М.: Постмаркет, 2001. – 480 с.

53. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1103 с.

54. Шелухин О.И. Фрактальные процессы в телекоммуникациях: моногр. / О.И. Шелухин, А.М. Тенякшев, А.В. Осин – М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.

A. Elwalid Routing and Protection in GMPLS Networks: From Shortest Paths to Optimized Designs / A. Elwalid, D. Mitra, I. Saniee, and I. Widjaja. // Journal of lightwave technology. – 2003. – №21(11), P. 2828-28-38.

55. A.V. Bagula Online Traffic Engineering: The Least Interference Optimization Algorithm / A.V. Bagula, M. Botha, and A.E Krzesinski. // IEEE Communications Society – 2004, P. 1232-1236.

56. Anees. Shaikh Evaluating the Impact of Stale Link State on Quality-of-Service Routing / Anees Shaikh, Jennifer Rexford, and Kang G. Shin. // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2001. – №9(2), P. 162-176.

57. Chakraborty Basabi Simultaneous Search for Multiple Routes using Genetic Algorithm / Basabi Chakraborty // IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement System and Applications Boston. MA, USA, 14-16, July 2004, P. 77-80/

					<b>КБР-123.21.0031.00.00.ПЗ</b>	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68