

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ,  
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО  
“ ” 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА  
РОБОТА  
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР**

**Тема:** «Розрахунок надійності надземних телекомунікаційних систем»

**Виконавець:** \_\_\_\_\_ Антон МАРІНІН  
(підпис)

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Олексій ЗУЄВ  
(підпис)

**Нормоконтролер:** \_\_\_\_\_ Денис БАХТІЯРОВ  
(підпис)

**Київ 2023**

## НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО

“ ” 2023 р.

### ЗАВДАННЯ

#### на виконання кваліфікаційної роботи

Мариніна Антона Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Розрахунок надійності надземних телекомунікаційних систем»

затверджена наказом ректора від «29» березня 2023 р. №421/ст

2. Термін виконання роботи: з 22.05.2023 р. по 25.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: сучасні базові станції

4. Зміст пояснювальної записки: Аналіз принципів побудови базових станцій Ericsson , Flexi Multiradio, Airspan Air4G (MacroMAXe) та Huawei DBS3900 LTE, Розрахунок структурної надійності, Моніторинг надійності варіантів резервування базових станцій.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: слайди презентації в програмному пакеті Microsoft PowerPoint

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	22.05.2023- 24.05.2023	Виконано
2	Вступ	25.05.2022	Виконано
3	АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ ERICSSON, FLEXI MULTIRADIO BTS GSM/EDGE ТА ІНШИХ	26.05.2022- 29.05.2022	Виконано
4	РОЗРАХУНОК СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ	30.05.2022- 07.06.2022	Виконано
5	МОНІОРИНГ НАДІЙНОСТІ ВАРІАНТІВ РЕЗЕРВУВАННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ	08.06.2022- 14.06.2022	Виконано
6	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	15.06.2023- 25.06.2023	Виконано

7. Дата видачі завдання: “19” травня 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_

(підпис керівника)

Антон МАРІНІН

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_

(підпис випускника)

Олексій ЗУЄВ

(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Розрахунок надійності надземних телекомунікаційних систем»

містить 62 сторінок, 14 рисунків, 4 таблиці, 13 використаних джерел.

Ключові слова використовувані у кваліфікаційній роботі. Структура базової станції, Надійність базової станції, Діагностика технічного стану базової станції, Контроль та управління базової станції.

Об'єкт дослідження – сучасні базові станції .

Предмет дослідження – інформаційні технології, які використовуються у системах технічного обслуговування та ремонту БС з метою підвищення їх ефективності.

Мета кваліфікаційної роботи – розрахувати надійність та інтенсивність відмов базових станцій Ericsson, Flexi Multiradio BTS GSM/EDGE, Airspan Air4G (MacroMAXe) та Huawei DBS3900 LTE.

Метод дослідження – теорія експлуатації та ремонту технічних систем, теорія оптимізації систем, теорія автоматизації систем.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати у навчальному процесі.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	6
ВСТУП .....	8
1. АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ ERICSSON, FLEXI MULTIRADIO BTS GSM/EDGE ТА ІНШИХ.....	10
1.1. Особливості побудови базових станцій Ericsson.....	10
1.2. Особливості побудови базових станцій Flexi Multiradio.....	14
1.3. Особливості побудови базових станцій Airspan Air4G (MacroMAXe).....	18
1.4. Особливості побудови базової станції Huawei DBS3900 LTE.....	20
1.5. Висновок до розділу 1.....	26
2. РОЗРАХУНОК СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ.....	28
2.1. Поняття структурної надійності.....	28
2.2. Класифікація методів розрахунку надійності.....	29
2.3. Аналітичні методи розрахунку надійності.....	33
2.4. Повний розрахунок безвідмовності.....	35
2.5. Висновок до розділу 3.....	36
3. МОНІОРИНГ НАДІЙНОСТІ ВАРІАНТІВ РЕЗЕРВУВАННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ.....	37
3.1. Теоретична база для моніторингу надійності варіантів резервування.....	37
3.2. Розрахунок надійності варіантів резервування.....	47
3.3. Висновки до розділу 4.....	56
ВИСНОВКИ .....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	61

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БС – Базова станція.

BSC – Контролер базових станцій.

TRU (Transceiver Unit) – Прийомо передавальний блок.

DXU (Distribution Switch Unit) – Блок розподілу і комутації.

ECU (Energy Control Unit) – Блок контролю енергетичними параметрами.

CDU (Combining and Distribution Unit) – Блок об'єднання і розподілу.

HCS (Hierarchical cell Structures) – Ієрархічна структура сот.

IDB (Installation Data Base) – Інсталяційна база даних.

HDLC (High level Data Link Controller concentrator) – Концентратор контролера каналів даних високого рівня.

PCM-part – Інтерфейсний комутатор.

FFR (Fractional Frequency Reuse) – Технологія повторного використання частот.

SFR (Soft Frequency Reuse) – Технологія повторного використання програм.

FUSC – Повне використання піднесення.

PUSC – Часткове використання піднесення.

RRU – Віддалений радіо блок.

DRB – Максимальна кількість одночасних радіо несучих частот для передачі даних користувача.

ТО – Технічне обслуговування.

ЩПІ – Гауссівська щільність розподілу імовірностей.

РК – Радіо компоненти.

НТС – надземна телекомунікаційна система.

RRH (Remote Radio Head) – виносна радіо головка.

ЕІМ – Ефективна випромінювана потужність.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день, базові станції стали більш потужними та можуть обслуговувати більше користувачів одночасно, що дозволяє забезпечувати якісний мобільний зв'язок навіть в густонаселених місцях. Також, вони мають покращену функціональність та більш широкі можливості зв'язку, що дозволяє їм працювати з різноманітними технологіями мобільного зв'язку. Проте, наразі є кілька проблем, пов'язаних з надійністю базових станцій. Одна з них - це проблема енергоспоживання. БС вимагають значної кількості електроенергії для своєї роботи, що може призвести до високих витрат та забруднення довкілля. Крім того, існують проблеми, пов'язані з технічними несправностями та невідповідністю до встановлених стандартів.

То, вирішення проблем, пов'язаних з надійністю та енергоефективністю базових станцій, стає все важливішим завданням для операторів мобільного зв'язку.

Забезпечення надійності БС є критично важливою задачею для розгортання ефективних та надійних мереж мобільного зв'язку. З надійною роботою базових станцій зв'язок може бути забезпечений з високою якістю та швидкістю, що є ключовим для багатьох різних видів діяльності. Однак, на жаль, базові станції можуть бути підвернуті різним впливам, таким як погодні умови, технічні несправності, крадіжки або вандалізм. Ці чинники можуть спричинити збої у роботі БС, які можуть призвести до перерв у зв'язку, що може мати серйозні наслідки для бізнесу та індивідуальних користувачів.

Отже, забезпечення надійності БС залишається актуальною проблемою, яка потребує постійного вдосконалення технологій та методів для забезпечення максимальної стабільності та ефективності мереж мобільного зв'язку.

У даній кваліфікаційній роботі обґрунтовані основні принципи дії БС, таких як Ericsson, Flexi Multiradio, WiMAX/LTE: Airspan Air4G та Huawei DBS3900 LTE. Обґрунтовані принципи побудови системи, структурні схеми, технічні характеристики та особливості вище названих БС. Результати моніторингу можуть



бути застосовані для обґрунтування варіантів резервування апаратури формування сигналів та оцінки їх ефективності.

**Мета і завдання дослідження.** Вивчити принцип роботи, принципи побудови, таких базових станцій, таких як Ericsson, Flexi Multiradio, WiMAX/LTE: Airspan Air4G та Huawei DBS3900 LTE, також представити можливості для їх удосконалення.

**Об'єктом дослідження.** Процес розрахунку надійності сучасних базових станцій.

**Предметом дослідження.** Базові станції Ericsson, Flexi Multiradio, WiMAX/LTE: Airspan Air4G та Huawei DBS3900 LTE.

**Методи досліджень.** Теорія експлуатації та ремонту технічних систем, теорія оптимізації систем, теорія автоматизації систем.

**Апробація отриманих результатів.** Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

Науково-практична конференція «Політ», м. Київ, 2023 р.

Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем», м. Київ, 2023 р.

## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ ERICSSON, FLEXI MULTIRADIO BTS GSM/EDGE ТА ІНШИХ

### 1.1. Особливості побудови базових станцій Ericsson

Базова станція RBS 2000 - друге покоління базових радіостанцій, розроблене компанією Ericsson у відповідності зі специфікаціями GSM. Гнучка конструкція надає можливість створення певної кількості конфігурацій і розширень у міру зростання мережі. Базова станція підтримує ієрархічну структуру сот HCS (Hierarchical cell Structures) до трьох рівнів. Рівнями можуть бути: макро стільниками для забезпечення загального радіо покриття, мікро стільники на вуличному рівні і пікосоти для забезпечення покриття в приміщеннях. Сімейство RBS 2000 підтримує як все спрямовану, так і секторизовану конфігурацію сот.

Таблиця 1.1

#### Основні функції блоків RBS 2000

Блоки RBS 2000	Функції
DXU (Distribution Switch Unit) - блок розподілу і комутації	Інтерфейс з каналом 2 Мбіт / с. Підключає певні тайм-слоти до певних передавачів; Формування тактовою послідовності; Робота з базою даних, що містить інформацію по всьому устаткуванню RBS.

<p>TRU (Transceiver Unit) - блок приймача</p>	<p>Виконує функції по формуванню і обробці фізичних каналів на парі несучих частот;                      Радіоприйом;                      Радіопередача;                      Посилення потужності.</p>
<p>ECU (Energy Control Unit) - блок контролю енергетичними параметрами</p>	<p>Контроль і управління схемами живлення і кліматичної установкою.</p>
<p>CDU (Combining and Distribution Unit) - блок об'єднання і розподілу</p>	<p>Об'єднання переданих сигналів;                       Розподіл сигналів.</p>

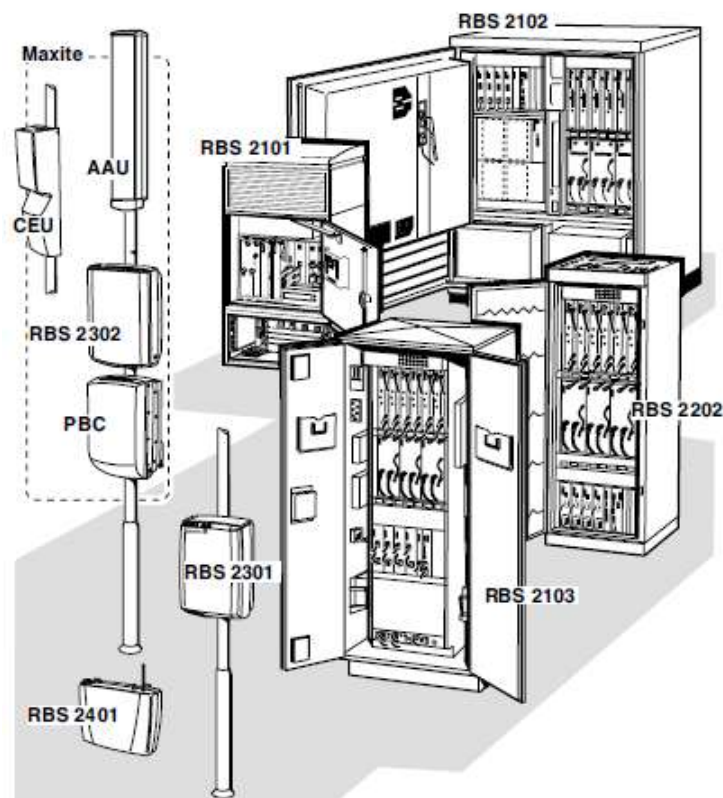


Рис. 1.1. Серії базових станцій RBS 2000

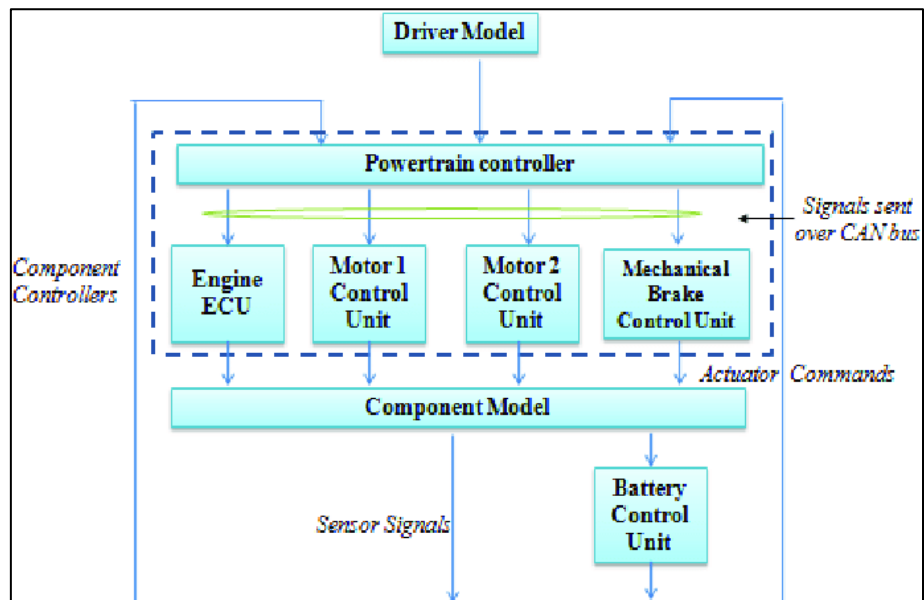


Рис. 1.2. Функціональна схема базової станції RBS 2000

Блок розподілу і комутації (DXU) - це центральний керуючий блок RBS. До складу RBS входить один блок DXU. Цей блок забезпечує системний інтерфейс за допомогою крос-комутації E1 цифрових потоків транспортної мережі і окремих часових інтервалів (тайм-слотів) до відповідних їм прийомо-передатчика. DXU реалізує функції, загальні для однієї RBS:

- Розподільну комутацію;
- Інтерфейс з контролером базових станцій (BSC);
- Синхронізацію;
- Збір аварійних сигналів (Alarm);
- Інтерфейс локальної шини типу RS 485;
- Контроль помилок передачі;
- Інтерфейс з ОМТ (OMT interface) типу RS 232;
- Концентрація каналів управління (з сигналізацією LAPD) у напрямку до BSC;
- Підтримання бази даних по обладнанню стійки.

За допомогою даних функцій DXU організовує з'єднання з BSC і комутує окремі тайм-слоти до певних прийомо-передатчиком.

Сигнал тактової частоти для RBS генерується за допомогою виділення синхронізуючої інформації з каналу E1 або від внутрішнього джерела.

Додатково, для спрощення обслуговування обладнання, існує база даних, яка містить інформацію про встановлений (інстальована) обладнанні - інсталяційна база даних (IDB - Installation Data Base). IDB інтегрована з DXU, вона містить ідентифікатор кожного блоку, його місце розташування і відповідні параметри конфігурації. Ідентифікатор блоку включає його артикул, номер версії та серійний номер [12].

Конфігурацією DXU управляє BSC допомогою сигналізації LAPD, що не задіє інформаційні тайм-слоти каналу E1.

DXU розділений на наступні основні секції:

- ІКМ-частину (PCM-part), або інтерфейсний комутатор;
- Блок центрального процесора (CPU - Central Processing Unit);
- Блок синхронізації (CTU - Central Timing Unit);
- Концентратор контролера каналів даних високого рівня (High level Data Link Controller (HDLC) concentrator).

Інтерфейсний комутатор (PCM-part) - Призначається для виділення тайм-слотів з A-bis каналу і передачі їх до блокам прийомо-передатчиків (TRU) по локальній шині. До портів А / В блоку DXU можна підключити дві ІКМ лінії, що може бути використано для підвищення ємності або забезпечення надмірності на каналах передачі.

Крім того, PCM-part може перенаправляти в інші напрямки тайм-слоти, які не використовуються в даній БС. Ця функція, що збільшує гнучкість системи, називається мультискидання (MultiDrop) або каскадування. Наприклад, до однієї E1 лінії від BSC може бути підключено до п'яти БС. Вхідні тайм-слоти підключаються до порту А блоку DXU. Вихідні тайм-слоти, що направляються на інші БС, підключається на порт В. Функція каскадування активізується за допомогою ОМТ при інсталяції.

Блок центрального процесора (CPU) здійснює управління ресурсами БС. Додатково цей блок відповідає:

- За завантаження і зберігання програмного забезпечення знімних блоків;
- За інтерфейс з ОМТ;
- За експлуатацію та підтримку;
- За обробку внутрішніх і зовнішніх аварійних сигналів;
- За виділення інформації сигналізації LAPD.

Блок синхронізації (CTU) генерує стабілізовані синхронізуючі послідовності для прийомо-передатчиків. CTU може бути за синхронізований від каналу A-bis або від зовнішнього джерела, додатково поставляється плати синхронізації - приймача глобальної системи позиціонування (GPS).

Концентратор (HDLC) забезпечує функцію концентрації і мультиплексування каналів LAPD. Це збільшує ємність ІКМ лінії. Концентратор HDLC зчитує інформацію сигналізації для передавачів і розподіляє її до блокам TRU або блоку CPU в DXU.

## **1.2. Особливості побудови базових станцій Flexi Multiradio**

Модель Flexi Multiradio Base Station побудована на базі вже відомої на ринку платформи Flexi Base Station і сумісна з нею. Вона підтримує технології GSM/EDGE, WCDMA/HSPA та LTE. Базова система Flexi Multiradio BTS GSM/EDGE від Nokia Siemens Networks заснована на технології активних антени, яка об'єднує антену та радіообладнання в єдиний функціональний блок, що має окремі підсилювачі потужності для кожного елемента антени. Активна антена дозволяє здійснювати формування променів – фокусування окремого радіо підключення та його направлення на конкретного користувача – а також використовувати різні технології в одному блоці.



Рис. 1.3. Базова станція Flexi Multiradio BTS GSM/EDGE



Рис. 1.4. Структурна схема Базової станції Flexi Multiradio BTS GSM/EDGE

Базова станція Flexi Multiradio BTS GSM/EDGE використовується у мережах 3G та LTE.

Базовий опис:

- Працює зі смугами частот від 1.4 МГц до 20 МГц у режимі LTE.
- Також підтримує GSM/EDGE та UMTS/HSPA.

Модулі NSN Flexi, зовнішня установка на антенній щоглі.

Специфікація:

- Може використовуватися всередині та поза приміщеннями, з установкою на підлозі, на стіні, на жердині, на щоглі, у розподілених та без фідерних конфігураціях майданчика.

- Частотні діапазони: спарені та неспарені смуги частот у діапазонах 700, 800, 850, 900, 1800, 1900, 1700/2100, 2100, 2300 та 2600 МГц.

- Конфігурації з кількома трансиверами: 2 три секторний радіо модуль Flexi + 2 системний модуль GSM/RDGE + 2 системний модуль WCDMA/HSPA та LTE. Також підтримується рішення з виносною радіо головою (RRH або Remote Radio Head).

- Максимальна ємність. До 6+6+6 GSM, або до 4+4+4 WCDMA, або 1+1+1 LTE із смугою 20 МГц та гнучкою комбінацією всіх перерахованих технологій у конкурентному режимі. Для нарощування ємності на одному сайті можна вміщати кілька стандартних модулів.

- Для підключення до транспортної мережі у Flexi Multiradio Base Station є вбудований IP/Ethernet-інтерфейс.

- Технологія підсилювача потужності радіосигналу: мультистандартний підсилювач потужності з багатьма несучими.

- 133 x 447 x 560 мм (розміри модуля). Може використовуватися в приміщеннях та поза приміщеннями, може встановлюватися у стійку 19"

- Чистий об'єм – 25 літрів (для одного модуля).

- Діапазон робочих температур: -35С до +55С.

- Джерела живлення: 40,5 – 57 Вольт постійного струму, 184 – 276 Вольт змінного струму.

- Типове споживання потужності: 790 Вт для комбінованого сайту GSM та WCDMA.

- Вихідна потужність: 180 Вт з кожного радіомодуля або 60 Вт з віддаленої радіо головки (RRH).

- Клас захисту від вологості – IP 65.

Базова станція Flexi, перевірена платформа, яка використовується у мережах 3G та LTE. Користувачі відзначають такі її переваги:

- легке конструювання сайту та легке встановлення, що знижує вартість інсталяції на 25%.

- максимальне пере використання наявного обладнання сайту.



- знижені вимоги до початкових вкладень за рахунок можливості швидкого розгортання мережі.
- суттєве зниження енергоспоживання (у ряді випадків на 70%), зменшення розмірів та потужності систем живлення.
- скорочення довжини необхідних антенних кабелів, що у типовому випадку вдвічі покращує радіо параметри станції.
- гнучкий дизайн, адаптивність до переходу на технології майбутнього
- на 20% компактніше і легше за типову базову станцію.
- Виконання, що дозволяє її використовувати поза приміщеннями в будь-яких погодних умовах.
- Модульна, масштабована та найбільш компактна базова станція в галузі.
- Працює зі смугами частот від 1.4 МГц до 20 МГц у режимі LTE.
- Також підтримує GSM/EDGE та UMTS/HSPA.



Рис. 1.5. Модуль NSN Flexi

Модулі NSN Flexi, зовнішня установка на антенній щоглі, це шести секторна конфігурація (WCDMA).

З точки зору надійності має високий рівень. Бо можна встановлювати: всередині та поза приміщеннями, з установкою на підлозі, стіні, жердині, щоглі, у розподілених та без фідерних конфігураціях майданчика. Високий частотний радіус дії, є допоміжні модулі для розширення можливостей БС і т.д.

### 1.3. Особливості побудови базових станцій Airspan Air4G (MacroMAXe)

Базові станції WiMAX/LTE: Airspan Air4G (MacroMAXe) Air4G (MacroMAXe) - лінійка базових станцій WiMAX/LTE виробництва фірми Airspan Networks, представлена трьома модифікаціями: Air4G-W24 (тільки WiMAX), Air4G-WL24 (WiMAX + LTE), Air4G-L44 (тільки LTE).

Система Air4G працює в діапазонах 2.3, 2.5 і 3.х ГГц і включає антенну систему MIMO з кількістю передавачів і приймачів відповідно:

2x4 для Air4G-W24 (WiMAX) та Air4G-WL24 (WiMAX + LTE);

4x4 для Air4G-L44 (LTE).



Рис. 1.6. Базова станція WiMAX/LTE: Airspan Air4G (MacroMAXe)



Рис. 1.7. Приклад кріплення Базової станції WiMAX/LTE: Airspan Air4G (MacroMAXe)

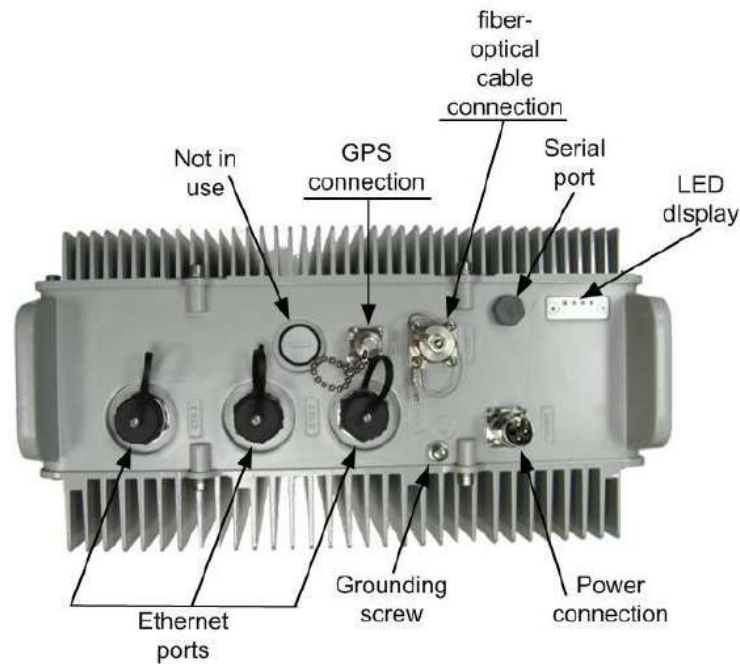


Рис. 1.8. Порти на Базовій станції WiMAX/LTE: Airspan Air4G (MacroMAXe)

При цьому досягається ефективна випромінювана потужність (ЕІПМ) до 60dBi. Система Air4G підтримує значення ширини каналу: 3.5 МГц, 5 МГц, 7 МГц та 10 МГц, а також режим "dual MAC/PHY", що дозволяє використовувати смуги 2×7 МГц та 2×10 МГц.

Air4G призначена для розгортання у три секторній конфігурації, яка вважається оптимальною для розгортання мереж мобільного WiMAX та LTE. Система повністю підтримує протокол R6 для роботи зі шлюзом мережі доступу (ASN Gateway) як розподілений, так і централізованим.

При розгортанні мереж мобільного доступу найбільш значущим фактором є частотний ресурс, отже ефективність його використання повинна бути максимальною. Щоб отримати коефіцієнт повторного використання частот рівний одиниці ( $N=1$ ), необхідно дотриматися балансу між максимальним завантаженням спектра і придушенням інтерференційних перешкод. Для цієї мети в системі Air4G реалізована технологія повторного використання частот FFR (Fractional Frequency Reuse) та SFR (Soft Frequency Reuse) з оптимальним поєднанням повного (FUSC) та часткового (PUSC) використання піднесення. При цьому забезпечується максимально щільна зона абонентського покриття з максимально компактним

частотно-територіальним планом та мінімальним впливом інтерференційних перешкод.

Основні особливості Air4G:

- Відповідність профілю Mobile WiMAX 802.16e-2005 (для Air4G-W24 та Air4G-WL24);
- Оптимізована для діапазонів 2.3, 2.5 та 3.3-3.8 ГГц;
- Два радіо блоки з вихідною потужністю по 40 dBm (4 радіо блоки для Air4G-L44);
- Підтримка STC та MIMO Matrix A/B;
- Ширина радіоканалу: 3.5, 5, 7, 10, 2x7 та 2x10МГц;
- Підтримка SOFDMA 512, 1024, 2048 FFT;
- Легкий компактний форм-фактор;
- Можливість роботи як із централізованим, так і з розподіленим ASN GW, а також без ASN-GW;
- Низьке енергоспоживання;
- Автоматичне виділення ресурсів для VoIP із використанням VoiceMAXe-сервера.

#### **1.4. Особливості побудови базової станції Huawei DBS3900 LTE**

Базова станція Huawei DBS3900 забезпечує просту структуру та швидке розгортання мережі. DBS3900 має тільки два типи основних функціональних модулів, таким чином значно скорочуючи витрати на запасні частини та обслуговування [12].

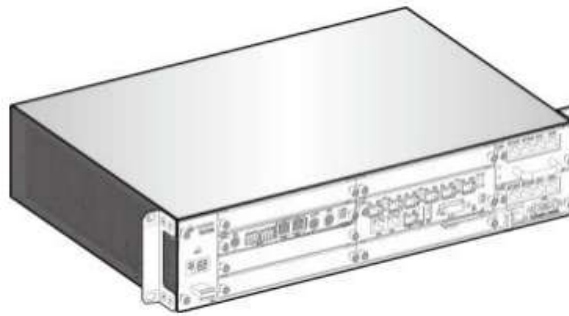


Рис. 1.9. Базова станція Huawei DBS3900 LTE

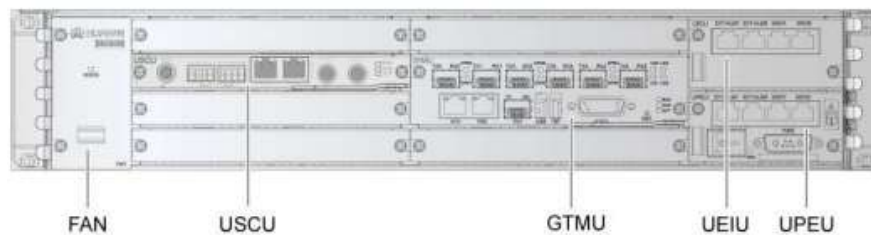


Рис. 1.10. Панель базової станції Huawei DBS3900 LTE

Таблиця 1.2

Порти на платах DBS 3900

Назва	Порт	Специфікація	Функції
GTMU	CPRI	Для зв'язку з РФ модуль (6 портів)	Надає еталонний годинник  Контролює та керує всією системою BTS
	E1/T1	Підтримка чотирьох E1/T1	
	ETH	Для місцевого обслуговування і введення в експлуатацію	
	FE0	Електричний порт для IP-транспорту інтерфейс Abis	
	FE1	Оптичний порт для передачі IP через Інтерфейс Abis	
	TST	Для перевірки годинника	
	USB	Зарезервований порт	

UPEU	PWR	Порт живлення	Перетворює вхідну потужність –48 В постійного струму або +24 В постійного струму на +12 В постійного струму
	MON0	Підтримка одного сигналу RS485	
	MON1	Підтримка одного сигналу RS485	
	EXT-ALM0	Підтримка сигналізації з чотирма сухими контактами сигнали	Забезпечує порти тривоги та отримує сигнали моніторингу від пристроїв моніторингу середовища та передає сигнали тривоги на головну плату керування
	EXT-ALM1	Підтримка сигналізації з чотирма сухими контактами сигнали	
UEIU	MON0	Підтримка одного сигналу RS485	Забезпечує сигнальні порти та отримує моніторинг сигнали з навколишнього середовища пристрої контролю та передає сигнали тривоги на головний щит управління
	MON1	Підтримка одного сигналу RS485	
	EXT-ALM0	Підтримка сигналізації з чотирма сухими контактами	
	EXT-ALM1	Підтримка сигналізації з чотирма сухими контактами	

USCU	GPS	Використовується для прийому сигналів GPS	Надає абсолютну інформацію про час і 1 Імпульс на секунду (PPS) опорний тактовий сигнал для головної плати керування та забезпечує порти RGPS і порт BITS
	RGPS	Використовується для прийому сигналів RGPS	
	TOD0	Використовується для прийому або передачі сигналів 1PPS+TOD	
	TOD1	Використовується для прийому або передачі сигналів 1PPS+TOD і отримання сигналів TOD від M1000	
	BITS	Використовується для отримання годинника BITS сигналів, що підтримують адаптивне введення	
	M-1PPS	2,048 МГц і 10 МГц довідкове джерело	

Маючи чудову пристосованість до умов середовища, основні модулі легко адаптуються до умов майданчика для ефективного розгортання. То є відсутні додаткові витрати на будівництво приміщення розміщення обладнання [12].

Віддалений радіо модуль забезпечує наступні переваги:

- оскільки радіочастотний модуль DBS3900 може монтуватися на вежі, довжина лінії живлення значно скорочується і витрати на підводні лінії також скорочуються;

- скорочення втрат на живильних лініях призводить до збільшення коефіцієнта посилення потужності від 3 до 5 дБ та підвищення радіусу покриття більш як на 20%. Таким чином, може бути досягнуто покриття традиційні макро-BTS за допомогою меншої потужності шафи.

- завдяки технології віддаленого радіо модуля, DBS3900 підтримує розподілене встановлення радіо модулів, що значно підвищує гнучкість при проектуванні покриття вздовж залізничних колій.

DBS загалом, як з'єднані з нею BBU і всі RRU, фактично являють собою одну соту. Найбільш значуща перевага подібної схеми полягає у зниженні числа хендоверів між стільниками. Порівняно з репітером, кожен RRU може виробляти радіосигнали та керувати ними незалежно, пасивні перешкоди у проміжних вузлах

не накопичуються, та DBS може керуватися повністю (BBU і все RRU) єдиним інтерфейсом обслуговування.

Схема подвійного покриття за допомогою однієї частоти дозволяє двом BTS, працюючим в активному або резервному режимі, покривати ту саму зону. Крім того, у будь-який конкретний момент часу функціонує лише один з BTS. Ці дві BTS використовуюють ідентичні частоти. За нормальних умов активна BTS працює в штатному режимі, тоді як резервна BTS працює, але не передає потужність. Якщо активна BTS виходить із ладу, BSC запускає перемикання з активної резервної BTS. При цьому раніше активна BTS знижується до статусу «резервної BTS», тоді як раніше резервна BTS підвищується до статусу активної BTS. Це надмірне покриття не вимагає додаткових частот, на відміну від одиночного покриття, що підвищує експлуатаційну готовність мережі та забезпечує безперервне функціонування мережі навіть у разі відмови BTS [12].

RRU підключаються до активних та резервних BBU. Тобто кожен RRU підключається до двох BBU. За нормальних умов експлуатації RRU обмінюється даними лише з активним BBU. Завдяки функції надмірності BBU, RRU підтримує автоматичне перемикання CPRI - портів у разі відмови BBU. У разі відмови активного BBU, BSC здійснює перемикання з активних на резервні BBU; останні стають активними. У свою чергу, RRU запускають перемикання CPRI-порту. Після перемикання RRU обмінюються даними з новими активними BBU.

Завдяки вдосконаленій конструкції апаратної частини, а також комплексу функцій енергозбереження ПЗ, таких як інтелектуальне керування РА, енергоспоживання DBS3900 значно знижено. В теж час, конструкція природної віддачі тепла дозволяє радіочастотному модулю працювати без вентиляторів, що ще більше знижує енергоспоживання, виключаючи шум та пов'язані з вентиляторами відмови. Завдяки всьому вищесказаному операторами можуть бути створені екологічні мережі.

Максимальна пропускна здатність однієї стільниці (20 МГц):

- Пропускна здатність низхідного каналу на рівні керування доступом до середовища (MAC) = 150 Мбіт/с (2x2 MIMO);



- Пропускна здатність висхідного каналу на рівні MAC = 70 Мбіт/с (2x2 MU-MIMO або 2x4 MU-MIMO).

- Пропускна здатність висхідного та низхідного каналу на рівні MAC = 1500 Мбіт/с.

Максимальна кількість UE в режимі RRC\_CONNECTED на eNodeB:

- на 1,4 МГц – 3024 UE;

- на 3 МГц – 6480 UE;

- на 5 МГц/10 МГц/15 МГц/20 МГц – до 10 800 UE.

Максимальна кількість одночасних радіо несучих частот для передачі даних користувача (DRB) на UE – 8.

Характеристики VBU3900:

- На платі UMPT – один електричний порт FE/GE; один оптичний порт FE/GE;

- Вхідна потужність -48 В DC (діапазон напруг: від -38,4 до -57 DC);

- Розміри (висота x ширина x глибина) - 86x442x310 мм;

- Вага становить 12 кг за повної конфігурації;

- Робоча температура від -20 до +50 °C при тривалій експлуатації та від +50 до +55 °C при короткочасній експлуатації;

- Відносна вологість від 5 до 95%;

- Клас захисту від зовнішніх впливів (IP) – IP 20;

- Атмосферний тиск від 70 до 106 кПа.

Характеристики віддаленого радіо блоку RRU:

- Вхідна потужність -48 В DC; діапазон напруги від -57 до -36 DC;

- Температура експлуатації від -40 до +50° C (з урахуванням сонячного випромінювання 1120 Вт/м<sup>2</sup>), від -40 до +55° C (без урахування сонячного випромінювання);

- Відносна вологість від 5 до 100%;

- Атмосферний тиск від 70 до 106 кПа;

- Клас захисту від зовнішніх впливів (IP) – IP65.

З точки зору надійності – Huawei кращій. Вибило один радіо блок - вилетів один сектор, а не вся чи половина станції (залежно від конфігурації). З Huawei працюємо давно, радіо блоки не пригадаю, щоб замінювали.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

В даному розділі було розглянуто побудову 4 базових станцій DME, а саме Ericsson, Flexi Multiradio, Airspan Air4G (MacroMAXe) та Huawei DBS3900 LTE та їх структурні схеми.

Базова станція RBS 2000 - друге покоління базових радіостанцій, розроблене компанією Ericsson у відповідності зі специфікаціями GSM. Гнучка конструкція надає можливість створення певної кількості конфігурацій і розширень у міру зростання мережі. Базова станція підтримує ієрархічну структуру сот (Hierarchical cell Structures - HCS) до трьох рівнів.

Базова система Flexi Multiradio BTS GSM/EDGE від Nokia Siemens Networks заснована на технології активних антени, яка об'єднує антену та радіообладнання в єдиний функціональний блок, що має окремі підсилювачі потужності для кожного елемента антени. Активна антена дозволяє здійснювати формування променів – фокусування окремого радіо підключення та його направлення на конкретного користувача – а також використовувати різні технології в одному блоці.

БС WiMAX/LTE: Airspan Air4G (MacroMAXe), призначена для розгортання у три секторній конфігурації, що є оптимальним для розгортання мереж мобільного WiMAX та LTE. Система повністю підтримує протокол R6 для роботи зі шлюзом мережі доступу (ASN Gateway) як розподіленим, так і централізованим.

При розгортанні мереж мобільного доступу найбільш значущим фактором є частотний ресурс, отже ефективність його використання повинна бути максимальною. Щоб отримати коефіцієнт повторного використання частот рівний одиниці ( $N=1$ ), необхідно дотриматися балансу між максимальним завантаженням спектра і придушенням інтерференційних перешкод. Для цієї мети в системі Air4G реалізована технологія повторного використання частот FFR (Fractional Frequency

Reuse) та SFR (Soft Frequency Reuse) з оптимальним поєднанням повного (FUSC) та часткового (PUSC) використання піднесе. При цьому забезпечується максимально щільна зона абонентського покриття з максимально компактним частотно-територіальним планом та мінімальним впливом інтерференційних перешкод.

Базова станція Huawei DBS3900 забезпечує просту структуру та швидке розгортання мережі. DBS3900 має тільки два типи основних функціональних модулів, таким чином значно скорочуючи витрати на запасні частини та обслуговування. Віддалений радіо модуль має наступні переваги:

- може монтуватися на вежі, довжина лінії живлення значно скорочується і витрати на підводні лінії також скорочуються;

- скорочення втрат на живильних лініях що призводить до збільшення коефіцієнта посилення потужності від 3 до 5 дБ та підвищення радіусу покриття більш як на 20%. Тобто, може бути досягнуто покриття традиційної макро-BTS за меншої потужності шафи.

- підтримка розподільного встановлення радіо модулів, що значно підвищує гнучкість при проектуванні покриття вздовж залізничних колій.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРАХУНОК СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ

#### 2.1. Поняття структурної надійності

Під розрахунком надійності будемо розуміти визначення числових значень показників надійності за тими чи іншим вихідним даним. Певні значення показників надійності дозволяють оцінити експлуатаційні властивості технічного об'єкта на етапі його проектування або експлуатації [10].

Сутність розрахунку зводиться до визначення основних показників надійності ТО за відомими показниками надійності його елементів. Відповідні показники комплектуючих елементів беруться на підставі довідкових даних або результатів експлуатації і спеціально планованих експериментів [10].

Розрахунок надійності складається з таких етапів:

1. Визначення складу показників надійності, що розраховуються.
2. Складання структурної схеми надійності, що базується на аналізі функціонування системи (які блоки увімкнені, у чому полягає принцип їх роботи, перелік властивостей справної системи і т. п.), вибір методу розрахунку надійності.
3. Складання математичної моделі, що пов'язує показники надійності системи, які розраховуються, з показниками надійності її елементів.
4. Виконання розрахунку, аналіз отриманих результатів, коригування розрахункової моделі.

Для розрахунку надійності необхідно складання моделі надійності системи, яка зазвичай складається на основі функціональної, принципової або структурної схеми. В якості моделі надійності застосовуватися логічні схеми або графи переходів. У графах переходів стани позначають прямокутниками і кружечками, переходи між станами – стрілочками. Біля кожної стрілочки вказують інтенсивності переходів (відмов). Але при застосуванні графів станів складаються диференціальні рівняння, які в більшості випадків громіздкі при вирішенні, а в деяких випадках не

мають аналітичного розв'язку. Число рівнянь дорівнює числу станів. Зліва стоять похідні відповідних станів від часу. Кожен член правої частини рівнянь отримують шляхом множення інтенсивності переходу, що стоїть над стрілкою, пов'язаною з даним станом, на відповідну ймовірність стану. Знак залежить від напрямку стрілки. «+» – стрілка спрямована вістрям до стану, «-» – стрілка спрямована в протилежну сторону. Сума членів правих частин рівняння має дорівнювати нулю. Система доповнюється нормувальною умовою:

$$\sum_{j=1}^n P_j(t) = 1. \quad (2.1)$$

де:  $P_j t$  – ймовірність знаходження ТО в  $j$ -тому стані;  $m+1$  – число можливих станів.

Ймовірність станів знаходять в результаті розв'язку диференціальних рівнянь. Ймовірність безвідмовної роботи протягом напрацювання визначається сума всіх ймовірностей працездатних станів:

$$p(t_i) = \sum_{j=c}^{n-1} P_j(t_i). \quad (2.2)$$

## **2.2. Класифікація методів розрахунку надійності. Аналітичні методи розрахунку надійності**

Всі методи розрахунку надійності можна поділити на дві групи за видами відмов: за раптовими відмовами та за поступовими відмовами. За джерелом отримання інформації розрізняють аналітичні методи розрахунку надійності (розрахункові) та методи за даними експлуатації (статистичний розрахунок). За повнотою розрахунку та інформації, яка в результаті цього розрахунку отримана методи поділяються на повні та наближені. Більш детальна класифікація наведена на рис. 3.1. Далі розглянемо більш детально кожен метод [10].

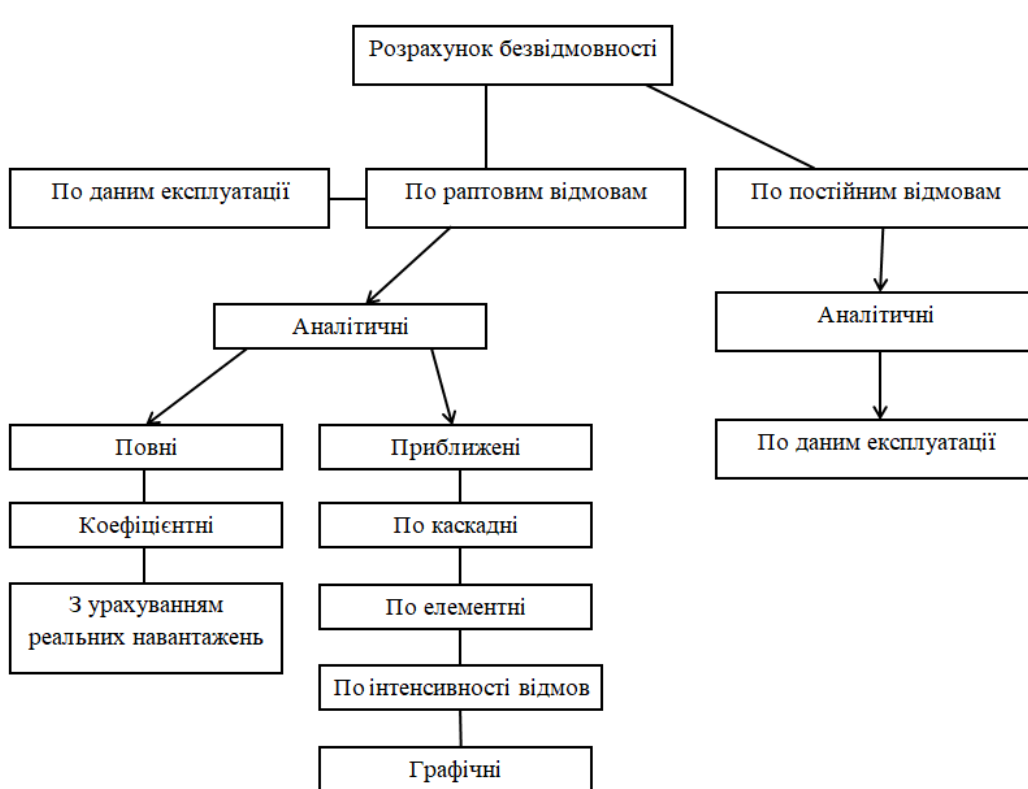


Рис. 2.1. Класифікація методів розрахунку надійності

Для розрахунку безвідмовності об'єкт необхідно представити у вигляді розрахункової логічної схеми. Залежно від повноти вихідних даних розрізняють наближений і повний розрахунки безвідмовності. Для наближеного розрахунку безвідмовності досить знання функціональної схеми об'єкта (до каскаду). При повному розрахунку безвідмовності необхідне знання принципової схеми об'єкта (до елемента), їх режими роботи і навантаження, що діють на елемент [10].

Приближені методи. Застосовуються на етапі проектування, коли принципова схема ще не розроблена. Застосовують з метою перевірки виконуваності вимог технічного завдання за показниками надійності і з метою порівняння різних варіантів реалізації схем.

Розрахунок безвідмовності за раптовими відмовами. Для наближеного розрахунку безвідмовності можуть бути використані по каскадний, по елементний, графічний методи та метод розрахунку за інтенсивностями відмов.

По каскадний метод розрахунку дає оцінку безвідмовності в першому наближенні, застосовують його на самих ранніх етапах проектування. В якості

вихідних даних використовуються число каскадів в спроектованій апаратурі і належність апаратури до певної групи.

Розрахунок показників надійності здійснюється за допомогою виразів справедливих для послідовного з'єднання. Для оцінки значення сумарної інтенсивності відмов використовується вираз:

$$\lambda, 1/\text{ч} = 10^{-4n_k \cdot k_a} \quad (2.3)$$

де  $n_k$  – кількість каскадів в спроектованій НТС;  $k_a$  – коефіцієнт що враховує умови експлуатації НТС, він дорівнює:  $k_a = 1,8$ .

По елементний метод розрахунку дозволяє отримати більш точну оцінку безвідмовності, його застосовують на наступних етапах проектування. В якості вихідних даних використовують загальне число елементів в складі спроектованої апаратури і їх тип, а також дані експлуатації аналогічного типу апаратури (по схемному використанню елементів і їх навантажень). Розрахунок показників безвідмовності здійснюється за допомогою виразів що і в першому випадку. Для оцінки значення сумарної інтенсивності відмов використовують дані, отримані при експлуатації аналогічної НТС. Для цього випадку справедливо:

$$\lambda, 1/\text{ч} = \frac{\lambda_{\Sigma, a}}{n_{\Sigma, a}} = \frac{\lambda_{n, a}}{n_{n, a}} \quad (2.4)$$

де  $\lambda$  – сумарна інтенсивність експлуатуємо та проектуемого аналога,  $n$  – кількість елементів в приладах.

$$\lambda_{n, a} = \frac{n_{n, a}}{n_{\Sigma, a}} \times \lambda_{\Sigma, a} \quad (2.5)$$

Розрахунок показників безвідмовності здійснюється за допомогою виразів що і раніше. Порядок проведення розрахунку наступний:

1) відповідно до принципової схеми і специфікації на неї проводять розбивку всіх елементів НТС на групи, що мають приблизно однакові інтенсивності відмов. Підраховують число елементів в кожній групі;

2) за довідковими даними для використовуваних елементів знаходять максимальні і мінімальні значення інтенсивностей відмов –  $\lambda_{i \max}$ ,  $\lambda_{i \min}$ .

3) визначають максимальні і мінімальні групові інтенсивності відмов  $n_i \lambda_{i \max}$ ,  $n_i \lambda_{i \min}$ .

Таблиця 2.1

Показники безвідмовності

Тип елемента	Інтенсивність відмов елемента, $\lambda$ , (1/год)	Кількість елементів в групі, $n$ , шт	Групова інтенсивність відмов, $n$ (1/ год)
--------------	--	---------------------------------------	--

4) визначають загальну інтенсивність відмов за виразом:

$$\Lambda(t) = \sum_{i=1}^n n_i \lambda_i(t). \quad (2.6)$$

5) використовуючи цей же вираз, визначають ймовірність безвідмовної роботи і середній час напрацювання до відмови.

$$P(t) = \exp[-n_i \int_0^1 \lambda_i(t) dt] = \exp\left[-\frac{t}{T_0}\right]. \quad (2.7)$$

$$T_0 = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.8)$$

Графічний метод розрахунку безвідмовності. Застосовують цей метод, якщо відома залежність інтенсивності появи відмов від часу. У цьому випадку розрахунок показників безвідмовності також здійснюється за допомогою виразу:



$$P(t) = p_1(t) + p_2(t) + \dots + p_n(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t). \quad (2.9)$$

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \exp[-\int_0^t \lambda_i(t) dt] = \exp[\int_0^t \lambda_i(t) dt] = \exp[-\int_0^t \lambda(t) dt]. \quad (2.10)$$

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (2.11)$$

Розрахунок сумарної інтенсивності відмов об'єкта виконують графічно за відомими залежностями. З цією метою проводять підсумовування ординат характеристики рис. 2.2. Потім визначають площу кривої рис. 2.2.

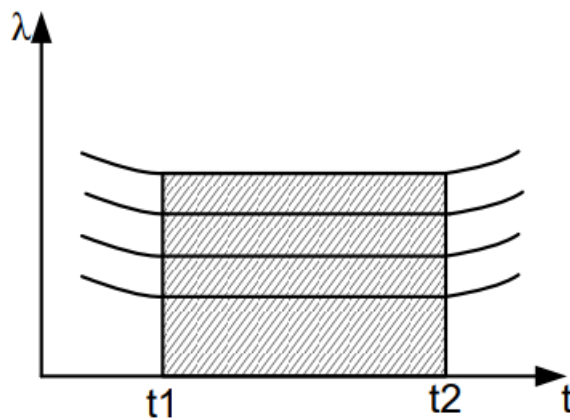


Рис. 2.2. Визначення надійності графічним методом

$$S_\lambda = \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t). \quad (2.12)$$

$$p(t) = \exp[-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt] = \exp[-S_\lambda]. \quad (2.13)$$

### 2.3. Повний розрахунок безвідмовності

Повний розрахунок безвідмовності передбачає облік режимів роботи комплектуючих об'єкт елементів. Залежно від повноти обліку розрізняють коефіцієнтний метод і метод врахування реальних навантажень елементів. Всі перераховані методи розрахунку припускають наявність повних відомостей про об'єкт та умови його експлуатації [10].

Коефіцієнтний метод дозволяє отримати досить повні і достовірні дані при наявності повних даних про коефіцієнти надійності застосовуваних елементів. Він

передбачає наявність найпростішого потоку відмов. Коефіцієнт надійності являє собою відношення інтенсивності відмов елементів  $i$ -ї групи  $\lambda_i$ , за даних умов експлуатації до інтенсивності відмов деякого основного елемента  $\lambda_0$ , кількісні характеристики якого в досить близьких умовах експлуатації достовірно відомі:

$$K_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_0}. \quad (2.14)$$

Цей вираз передбачає однаковий вплив режимів роботи як на основний елемент, так і на всі інші.

Облік умов експлуатації в коефіцієнтний метод здійснюється за допомогою обліку впливу цих умов на поведінку основного елемента:

$$\lambda(z) = \lambda_0(z) \sum_{i=1}^k n_i K_i, \quad (2.15)$$

де  $\lambda_0(z)$  – інтенсивність відмов основного елемента з урахуванням впливу  $z$ -го фактора.

Для підвищення достовірності та точності оцінки безвідмовності необхідно значення коефіцієнтів ( $K$ ) уточнювати, погоджуючи їх з реальною конструкцією НТС, умовами її експлуатації і реальними режимами роботи елементів. Розрахунок безвідмовності доцільно вести по блоках з метою виявлення слабких місць даного типу НТС [10].

Метод врахування реальних навантажень елементів дозволяє отримати результати, які найближчі до дійсності, оскільки в розрахунок вводиться справжнє значення інтенсивності відмов з урахуванням реальних режимів роботи і впливу відповідних факторів [10].

В якості вихідних даних використовують всі наявні дані про досліджуваний об'єкт НТС, а також залежність інтенсивності відмов комплектуючих його елементів від впливу реально діючих в заданих умовах експлуатації факторів  $\lambda_i(z)$ . В цьому випадку вираз набуде вигляду:

$$\lambda(z) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(z). \quad (2.16)$$

## 2.4. Розрахунок за поступовими відмовами

Поряд з раптовими відмовами, особливо для складних об'єктів НТС, характерна значна кількість поступових відмов, особливо в період старіння. Число таких відмов може досягати до 50% від загального числа всіх відмов. Облік старіння елементів особливо важливий для НТС та ТК з великим терміном зберігання [10].

Основою розрахунку є дані про закономірності зміни визначальних параметрів даного об'єкта в часі, а також встановлені на них допуски. Дослідження поведінки параметрів численних типів об'єктів НТС показують, що розподіл часу безвідмовної роботи при поступових відмовах відповідає нормальному закону, отже, для кожного параметра можуть бути знайдені свої значення  $t_{cp}$  і  $\sigma_i$  [10].

Як було показано ймовірність безвідмовної роботи по  $i$ -му параметру буде визначатися виразом:

$$p_{ni}(t) = \frac{F_0\left(\frac{t_{cpi} - t}{\sigma_i}\right)}{F_0\left(\frac{t_{cpi}}{\sigma_i}\right)}. \quad (2.17)$$

У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи всього об'єкта НТС та ТК за поступовими відмовами, якщо вважати відмови елементів незалежними, можна знайти з виразу:

$$P_{\Pi}(t) = \prod_{i=1}^L P_{\Pi i}(t). \quad (2.18)$$

де  $L$  – число визначальних параметрів об'єкта.

Значення, як правило, знаходять на підставі статистичних даних експлуатації подібного типу технічних об'єктів.

В кінці варто відзначити, що загальна ймовірність безвідмовної роботи об'єкта з урахуванням раптових і поступових відмов визначається виразом:

$$P_{\Sigma}(t) = P_B(t) \times P_{\Pi}(t) = \exp[-t \sum_{i=1}^k n_i \lambda_i] \times \prod_{j=1}^L P_{\Pi_j}(t). \quad (2.19)$$

## ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

У розділі наведено пояснення різних методів розрахунку надійності з формулами, що використовуються різних надземних телекомунікаційних системах.

**Оцінка безпеки:** Розрахунки структурної надійності дозволяють оцінити, наскільки безпечною є конструкція або система. Вони допомагають інженерам виявити можливі слабкі місця, де можуть виникнути пошкодження або відмови, і розробити заходи для підвищення безпеки.

**Прогнозування тривалості служби:** Розрахунки структурної надійності дозволяють прогнозувати тривалість служби конструкції або системи. Вони допомагають встановити, як довго буде працювати конструкція без необхідності ремонту або заміни.

**Вибір оптимального матеріалу:** Розрахунки структурної надійності допомагають вибрати оптимальний матеріал для конструкції або системи. Вони дозволяють порівняти різні матеріали за їхньою міцністю, стійкістю до пошкоджень і тривалістю служби, щоб знайти найкращий варіант.

**Вдосконалення дизайну:** Розрахунки структурної надійності допомагають вдосконалити дизайн конструкції або системи. Вони дозволяють інженерам виявити слабкі місця, де можна вдосконалити конструкцію для забезпечення більшої надійності і тривалості служби.

**Визначення резерву надійності:** Розрахунки структурної надійності дозволяють визначити резерв надійності конструкцій.

### РОЗДІЛ 3

## МОНІОРИНГ НАДІЙНОСТІ ВАРІАНТІВ РЕЗЕРВУВАННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ

### 3.1. Теоретична база для моніторингу надійності варіантів резервування

Під час виконання розрахунків без урахування умов експлуатації БС використовують методику орієнтовного методу розрахунку надійності. При виконанні розрахунків з урахуванням умов експлуатації БС використовують методику повного розрахунку надійності [11].

Виконуючи розрахунки, роблять ряд припущень: РК елементів БС як надійність з'єднані послідовно; інтенсивності відмов РК є постійними величинами; відмови РК є незалежними подіями; наробітки до відмови РК підкоряються експоненціальному розподілу[11].

Середній наробіток на відмову БС без урахування умов її експлуатації й без резервування її елементів  $T_{0\text{ БС}}$  визначають так:

$$T_{0\text{ БС}} = \frac{T_{\text{сп}}}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2 + \bar{n}_3}, \quad (3.1)$$

де  $T_{\text{сп}}$  – інтервал спостереження;  $\bar{n}_i$  – середня кількість відмов  $i$ -го елемента БС на інтервалі  $[0, T_{\text{сп}}]$ .

Параметр  $\bar{n}_i$  визначають так:

$$\bar{n}_i = \frac{T_{\text{сп}}}{T_{0i}}, \quad (3.2)$$

де  $T_{0i}$  – середнє напрацювання на відмову  $i$ -го елемента БС без резервування.

З урахуванням цих припущень про експоненціальний закон розподілу напрацювання на відмову та інших припущень параметр  $T_{0i}$  визначають так:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^3 n_{ij} \times \lambda_{0ij}, \quad (3.3)$$

$$\lambda_{\text{BC}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, \quad (3.4)$$

$$T_{0i} = \lambda_i^{-1}, \quad (3.5)$$

де  $n_{ij}$  – кількість РК  $j$ -ї групи, що входять до принципової схеми  $i$ -го елемента БС;  $\lambda_{0ij}$  – середня інтенсивність відмов РК  $j$ -ї групи при нормальних умовах, що входять до складу  $i$ -го елемента БС.

До складу кожного елемента БС входять три групи РК (мікросхеми, резистори, конденсатори);  $\lambda_i$  – середня інтенсивність відмов  $i$ -го елемента БС;  $\lambda_{\text{BC}}$  – середня інтенсивність відмов БС.

З урахуванням умов експлуатації БС параметр  $\lambda_i$  визначають так:

$$\lambda_i = \left( \prod_{l=1}^3 K_l \right) \sum_{j=1}^3 n_{ij} \lambda_{0ij}, \quad (3.6)$$

де  $K_l$  – значення коефіцієнта, що враховує вплив умов експлуатації на надійність БС. У роботі враховано, що є три чинника умов експлуатації, які впливають на надійність БС.

З урахуванням формул (3.2) і (3.5) параметр  $T_{0 \text{PEA}}$  визначають так:

$$T_{0 \text{BC}} = \frac{T_{\text{сп}}}{\left( \frac{T_{\text{сп}}}{T_{01}} + \frac{T_{\text{сп}}}{T_{02}} + \frac{T_{\text{сп}}}{T_{03}} \right)} = \frac{1}{\left( \frac{1}{T_{01}} + \frac{1}{T_{02}} + \frac{1}{T_{03}} \right)} = \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)}, \quad (3.7)$$

Середню тривалість відновлення БС без резервування її елементів  $T_{\text{В BC}}$  визначають так:

$$T_{\text{В BC}} = \sum_{l=1}^3 Q_l \times t_{\text{В}l}, \quad (3.8)$$

де  $Q_i$  – середня ймовірність відмов  $i$ -го елемента БС на інтервалі спостереження  $T_{\text{сп}}$ ;  $t_{\text{В}i}$  – середня тривалість відновлення працездатності  $i$ -го елемента БС.

Параметри  $Q_1, Q_2, Q_3$  визначають так:

$$\begin{aligned}
Q_1 &= \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2 + \bar{n}_3} = \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)}, \\
Q_2 &= \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2 + \bar{n}_3} = \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)}, \\
Q_3 &= \frac{\bar{n}_3}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2 + \bar{n}_3} = \frac{\lambda_3}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)}.
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Середні сумарні витрати на ремонт на заданому інтервалі спостереження  $T_{\text{сп}}$  –  $m_1(C_{\text{сум.р.БС}}(T_{\text{сп}}))$  визначають із урахуванням припущення, що інтенсивності відмов елементів БС  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  є постійними величинами, і тому напрацювання на відмову кожного елемента та всієї БС має експоненціальний закон розподілу. Тоді розподіл кількості відмов на інтервалі спостереження має закон Пуассона. Середню кількість відмов на інтервалі спостереження  $T_{\text{сп}}$  визначають так:

$$m_1\left(\frac{n}{T_{\text{сп}}}\right) = \frac{T_{\text{сп}}}{T_{0,\text{БС}}} = T_{\text{сп}} \times \lambda_{\text{БС}}, \tag{3.10}$$

де  $T_{0,\text{БС}}$   $\lambda_{\text{БС}}$  – середнє напрацювання на відмову та інтенсивність відмов БС відповідно.

Параметр  $m_1(C_{\text{сум.р.БС}}(T_{\text{сп}}))$  визначають так:

$$m_1(C_{\text{сум.р.БС}}(T_{\text{сп}})) = m_1\left(\frac{n}{T_{\text{сп}}}\right) \times m_1(C_{\text{р.БС}}). \tag{3.11}$$

Параметр  $m_1(C_{\text{р.БС}})$ , визначають так:

$$m_1(C_{\text{р.БС}}) = \sum_{i=1}^3 Q_i \times m_1(C_{\text{р.}i}), \tag{3.12}$$

де  $m_1(C_{\text{р.БС}})$ , – середня вартість одного ремонту  $i$ -го елемента БС.

На інтервалі спостереження  $T_{\text{сп}}$  відбувається випадкова кількість відмов. Крім того, вартість одного ремонту БС, у загальному випадку, також є випадковою величиною. Внаслідок цього реальні витрати на ремонт можуть перевищувати середні сумарні витрати  $m_1(C_{\text{сум.р.БС}}(T_{\text{сп}}))$ . Реальний рівень витрат запропоновано

характеризувати за допомогою граничного рівня сумарної вартості ремонту БС  $C_{\text{сум.гр.р.БС}}$ , що визначають із урахуванням допущення про гауссівську щільність розподілу імовірностей (ЩРІ) випадкової величини сумарних витрат і визначають так:

$$\begin{aligned} C_{\text{сум.гр.р.БС}} &= m_1(C_{\text{сум.р.БС}}(T_{\text{сп}})) + B \times \sigma(C_{\text{сум.р.БС}}(T_{\text{сп}})), \\ \sigma(C_{\text{сум.р.БС}}(T_{\text{сп}})) &= [(m_1(C_{\text{р.БС}}))^2 \times \mu_2(\frac{n}{T_{\text{сп}}})]^{1/2}, \\ B &= 1,65, \end{aligned} \quad (3.13)$$

де  $B$  – коефіцієнт, що відповідає рівню перевищення поточних сумарних витрат на ремонт БС граничного рівня  $C_{\text{сум.гр.р.БС}}$  з імовірністю не більше 0,05;  $\sigma(C_{\text{сум.р.БС}}(T_{\text{сп}}))$ , – середнє квадратичне відхилення сумарних витрат на ремонт БС від математичного сподівання;  $\mu_2(\frac{n}{T_{\text{сп}}})$  – дисперсія випадкової кількості відмов БС на інтервалі  $T_{\text{сп}}$ .

Формула (3.13) має такий вигляд з урахуванням припущення про те, що дисперсія вартості одного ремонту БС  $\mu_2(C_{\text{р.БС}}) \ll 1$ . Для закону розподілу випадкової кількості відмов Пуассона параметр  $\mu_2(\frac{n}{T_{\text{сп}}})$  визначають так:

$$\mu_2(\frac{n}{T_{\text{сп}}}) = m_1(\frac{n}{T_{\text{сп}}}) = T_{\text{сп}} \times \lambda_{\text{БС}}. \quad (3.14)$$

Такий підхід дозволяє більш адекватно оцінити можливі витрати ресурсів на ремонт БС.

Коефіцієнт готовності БС визначають як імовірність того, що об'єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачено [11].

Коефіцієнт готовності БС без резервування визначають так:

$$K_{\Gamma \text{ БС}} = \frac{T_{0 \text{ БС}}}{(T_{0 \text{ БС}} + T_{\text{В БС}})}, \quad (3.15)$$



де  $T_{0\text{BC}}$  – середнє напрацювання на відмову БС без резервування;  $T_{\text{ВБС}}$  – середня тривалість відновлення БС без резервування.

Формула (3.14) має вигляд для будь-якого закону розподілу напрацювань на відмову і закону розподілу часу відновлення БС.

Необхідно виконати розрахунок наведених показників надійності і граничного рівня витрат на ремонт без урахування та з урахуванням умов експлуатації і оцінити зміну значень цих параметрів[11].

Необхідно розв'язати завдання підвищення надійності досліджуваної БС на основі резервування частини її елементів і виконати порівняльний аналіз результатів резервування за допомогою техніко-економічного показника ефективності для  $j$ -го варіанта резервування  $E_j$  [11].

Під час порівняння варіантів резервування використовують критерій максимуму показника  $E_j$ . Для цього необхідно розрахувати три значення показника  $E_j$  і обрати найбільш ефективний відповідно з прийнятим критерієм ефективності.

Техніко-економічний показник ефективності резервування оцінює збільшення коефіцієнта готовності БС порівняно з базовим рівнем з урахуванням сумарних витрат на ремонт БС і її вартості. Базовий рівень коефіцієнта готовності визначають як відсоток від значення коефіцієнта готовності БС без її резервування  $K_{\text{ГБС}}$ .

Показник ефективності  $E_j$  для  $j$ -го варіанта резервування визначають так:

$$E_j = \frac{(K_{\text{Грез.БС}j} - K_{\text{Гбаз}})}{C_{\text{сум.рез.БС}j}}, \quad (3.16)$$

де  $K_{\text{Грез.БС}j}$  – коефіцієнт готовності для  $j$ -го варіанта резервування БС;  $K_{\text{Гбаз}}$  – базовий рівень коефіцієнта готовності;  $C_{\text{сум.рез.БС}j}$  – сумарні витрати на ремонт  $j$ -го варіанта резервованої БС і вартість цієї БС.

Параметр  $K_{\text{Гбаз}}$  у формулі (3.15) визначають так:

$$K_{\text{Гбаз}} = D \times K_{\text{Гбаз}}, \quad 0 \leq D \leq 1, \quad (3.17)$$

де  $D$  – коефіцієнт для визначення  $K_{Г}$  баз.

Параметр  $C_{\text{сум.рез.БС}j}$  визначають так:

$$C_{\text{сум.рез.БС}j} = C_{\text{сум.гр.рез.БС}j} + C_{\text{рез.БС}j}, \quad (3.18)$$

де  $C_{\text{сум.гр.рез.БС}j}$  – граничний рівень сумарних витрат на ремонт БС;  $C_{\text{рез.БС}j}$  – вартість резервованої БС для  $j$ -го варіанта резервування.

Параметр  $C_{\text{рез.БС}j}$  визначають так:

$$C_{\text{рез.БС}j} = \sum_{i=1}^3 \sum_{l=1}^3 n_{jil} \times C_l, \quad (3.19)$$

де  $n_{jil}$  – кількість РК 1-го типу для  $i$ -го елемента БС і для  $j$ -го варіанта резервування;  $C_l$  – вартість однієї РК 1-го типу.

$n_{jil}$  урахує номер варіанта резервування  $j$ . Якщо в  $j$ -му варіанті резервування  $i$ -й елемент БС не резервується, то враховують кількість РК, які входять тільки в цей елемент. Якщо в  $j$ -му варіанті резервування  $i$ -й елемент БС резервується дублюванням, то тоді кількість РК подвоюється.

Розглядаючи резервовану групу елементів, яка складається з основного і резервного елементів, ураховують, що при відмові одного з них його відновлення ремонтною бригадою не виконується. Ремонт резервованої групи елементів виконується тільки тоді, коли відмовлять обидва елементи. Цей варіант резервування можна назвати як варіант резервування без поточного відновлення працездатності.

При такому допущенні середній наробіток на відмову не досягає тієї величини як у випадку, коли при відмові одного з елементів відразу ж починається його відновлення ремонтною бригадою. Цей варіант резервування можна назвати як варіант резервування з поточним відновленням працездатності.

Середнє напрацювання на відмову  $i$ -ї резервованої групи елементів при дублюванні і резервуванні заміщенням у ненавантаженому режимі без поточного

відновлення працездатності елементів, що відмовили, у резервованій групі визначають так:

$$T_{0 \text{рез.ел.}i}(\bar{H}) = 2 \times T_{0 \text{ел.}i}, \quad (3.20)$$

де  $T_{0 \text{рез.ел.}i}(\bar{H})$  – середнє напрацювання на відмову резервованої групи елементів при резервуванні заміщенням  $i$ -го основного елемента БС в ненавантаженому режимі без поточного відновлення;  $T_{0 \text{ел.}i}$  – середнє напрацювання на відмову  $i$ -го основного елемента нерезервованої БС.

Середнє напрацювання на відмову  $i$ -ї резервованої групи елементів при дублюванні  $i$  резервуванні заміщенням у навантаженому режимі без поточного відновлення працездатності елементів, що відмовили, у резервованій групі визначають так:

$$T_{0 \text{рез.ел.}i}(H) = 1,5 \times T_{0 \text{ел.}i}. \quad (3.21)$$

У роботі ураховано припущення про експоненціальний розподіл напрацювань на відмову для резервованих груп елементів поза залежністю від того передбачено або не передбачено поточне відновлення елементів, що відмовили. Тоді надійні властивості резервованих груп елементів можна характеризувати за допомогою одного параметра – середнього напрацювання на відмову. Тоді, наприклад, для одного з варіантів інтенсивність відмов  $i$ -ї резервованої групи елементів визначають так:

$$\lambda_{\text{рез.ел.}i} = \frac{1}{T_{0 \text{рез.ел.}i}(\bar{H})}, \quad (3.22)$$

де  $T_{0 \text{рез.ел.}i}(\bar{H})$  – середнє напрацювання на відмову  $i$ -ї резервованої групи для резервування заміщенням у ненавантаженому режимі без поточного відновлення працездатності елемента, що відмовив.

Формули (3.1) і (3.2) використовують для визначення середнього напрацювання на відмову всієї БС для j-го варіанта резервування, а також для визначення ймовірностей відмов нерезервованих і резервованих груп елементів.

При резервуванні без поточного відновлення працездатності елементів, що відмовили, у резервованій групі ураховують, що середня тривалість відновлення працездатності резервованої групи на 70% більше середньої тривалості відновлення працездатності одного елемента як при ненавантаженому, так і при навантаженому резервуванні.

При резервуванні використовують обмеження на обсяг ресурсів, виділених на підвищення надійності БС – резервуванню будуть підлягати два із трьох елементів БС; кратність резервування дорівнює одиниці (варіант дублювання); резервування здійснюється заміщенням, при якому один резервний елемент перебуває в навантаженому режимі, а інший - в ненавантаженому режимі; при розрахунках роблять припущення про те, що при увімкненні резервних елементів перемикаючі пристрої мають імовірність безвідмовної роботи рівну одиниці.

При таких обмеженнях можливі варіанти, коли має значення черговість у використанні резервних елементів, що перебувають у різних режимах роботи.

Варіанти резервування елементів БС:

варіант 1 –  $\bar{H}_1$ ,  $H_2$ ;

варіант 2 –  $H_1$ ,  $\bar{H}_3$

варіант 3 –  $\bar{H}_2$ ,  $H_3$ ;

варіант 4 –  $H_2$ ,  $\bar{H}_3$

У наведених варіантах символом  $\bar{H}$  позначають ненавантажений режим резервування, а символом  $H$  навантажений режим резервування.

Для найбільш ефективного варіанта резервування досліджуваної БС необхідно визначити коефіцієнт оперативної готовності, коефіцієнт технічного використання, а також визначити вираз для ймовірності безвідмовної роботи резервованої БС і вираз для ймовірності безвідмовної роботи об'єкта без резервування і побудувати графіки цих функцій.

Коефіцієнт оперативної готовності та коефіцієнт технічного використання є комплексними показниками надійності БС. Вони характеризують надійнісні властивості об'єкта як з погляду безвідмовності, так і з погляду ремонтпридатності.

Коефіцієнт оперативної готовності – це ймовірність того, що за винятком тих запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачено, він у довільний момент часу виявиться у працездатному стані і надалі виконуватиме потрібну функцію протягом заданого інтервалу часу.

Коефіцієнт технічного використання – це відношення математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта у працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані та у простоях, зумовлених технічним обслуговуванням і ремонтом за той самий період.

Коефіцієнт оперативної готовності резервованої БС визначають із урахуванням припущення про те, що закони розподілу напрацювань на відмову елементів БС і всієї апаратури підкоряються експоненціальному закону. Цей показник надійності визначають так:

$$K_{OG \text{ рез.БС}}(\tau) = K_{Г \text{ рез.БС}} \times P_{\text{рез.БС}}(\tau), \quad (3.23)$$

де  $K_{Г \text{ рез.БС}}$  – коефіцієнт готовності резервованої БС для найбільш ефективного варіанта резервування;  $\tau$  – інтервал часу, протягом якого визначають ймовірність безвідмовної роботи резервованої БС.  $P_{\text{рез.БС}}(\tau)$  – ймовірність безвідмовної роботи БС для найбільш ефективного варіанта резервування.

Параметр  $K_{Г \text{ рез.БС}}$  визначають із урахуванням формул (7), (8), (14).

При визначенні ймовірності безвідмовної роботи резервованої БС  $P_{\text{рез.БС}}(\tau)$  вважають, що відмови елементів є незалежними подіями, тому, наприклад, вираз для  $P_{\text{рез.БС}}(\tau)$  у випадку коли перший елемент резервується в ненавантаженому режимі за допомогою четвертого елемента, а другий елемент резервується в навантаженому режимі за допомогою п'ятого елемента заміщенням без поточного відновлення елементів, що відмовили, у резервованих групах має вигляд:

$$P_{\text{рез.БС}}(\tau) = P_{\text{рез.ел.1,4}}(\tau) \times P_{\text{рез.ел.2,5}}(\tau) \times P_{\text{ел.3}}(\tau), \quad (3.24)$$

де  $P_{\text{рез.ел.1,4}}(\tau)$  – імовірність безвідмовної роботи резервованої групи елементів один і чотири при резервуванні заміщенням у ненавантаженому режимі;  $P_{\text{рез.ел.2,5}}(\tau)$  – імовірність безвідмовної роботи резервованої групи елементів два і п'ять при резервуванні заміщенням у навантаженому режимі;  $P_{\text{ел.3}}(\tau)$  – імовірність безвідмовної роботи третього елемента за припущення про експоненціальний закон розподілу напрацювань на відмову цього елемента.

Вираз для  $P_{\text{рез.ел.1,4}}(\tau)$  визначають так:

$$P_{\text{рез.ел.1,4}}(\tau) = e^{-\lambda_{\text{ел.1}}(1+\lambda_{\text{ел.1}}\tau)}. \quad (3.25)$$

Вираз для  $P_{\text{рез.ел.2,5}}(\tau)$  визначають так:

$$P_{\text{рез.ел.2,5}}(\tau) = 1 - Q_{\text{ел.2}}(\tau) \times Q_{\text{ел.5}}(\tau) = 1 - [1 - e^{-\lambda_{\text{ел.2}}\tau}] \times [1 - e^{-\lambda_{\text{ел.5}}\tau}]. \quad (3.26)$$

Вираз для  $P_{\text{ел.3}}(\tau)$  визначають так:

$$P_{\text{ел.3}}(\tau) = e^{-\lambda_{\text{ел.3}}\tau}. \quad (3.27)$$

Під час визначення коефіцієнта технічного використання  $K_{\text{ТВ рез.БС}}$  вважають, що технічне обслуговування БС виконують відразу після ремонту апаратури, тому кількість відмов БС і робіт з технічного обслуговування (ТО) однакові. Вважають, що роботи з ТО охоплюють усі елементи БС і вони за часом перевищують середній час відновлення всієї БС. Середній час ТО на 70% більше середньої тривалості відновлення всієї БС, тобто:

$$T_{\text{ТО рез.БС}} = 1,7 \times T_{\text{В рез.БС}}. \quad (3.28)$$

Вираз для  $K_{\text{ТВ рез.БС}}$  визначають так:

$$K_{ТВ \text{ рез.БС}} = \frac{T_{0 \text{ рез.БС}}}{(T_{0 \text{ рез.БС}} + T_{В \text{ рез.БС}} + T_{ТО \text{ рез.БС}})}, \quad (3.29)$$

де  $T_{0 \text{ рез.БС}}$  – середнє напрацювання на відмову резервованої БС;  $T_{В \text{ рез.БС}}$  – середня тривалість відновлення резервованої БС;  $T_{ТО \text{ рез.БС}}$  – середня тривалість робіт з ТО на резервованій БС.

### 3.2. Розрахунок надійності варіантів резервування

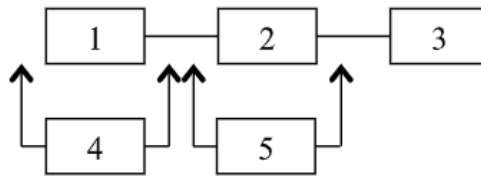


Рис. 3.1. Варіант резервування

Є основний відновлюваний об'єкт (БС), що складається з трьох послідовно з'єднаних у розумінні надійності елементів (елементи 1, 2, 3). Нехай задана така черговість резервування елементів БС: 1-й резервний елемент (має №4) перебуває в ненавантаженому режимі ( $\bar{H}$ ); 2-й резервний елемент (має №5) перебуває в навантаженому режимі (H).

Варіанти резервування елементів БС:  $\bar{H}_1, H_2$ .

Дані про кількість РК в елементах 1, 2, 3 з урахуванням того, що є три групи радіо компонент.

Таблиця 3.1

Дані про кількість РК в елементах 1, 2, 3

Номер групи РК	Номер елемента		
	Кількість радіо компонент		
	1	2	3
1	10	12	13

2	17	24	31
3	16	9	20

Дані про інтенсивності відмов однієї радіокомпоненти в групах 1, 2, 3 у випадку нормальних умов експлуатації:

1 – 1.5 (Інтенсивність відмов радіо компоненти ( $10^{-7}$  1/год);

2 – 110;

3 – 13.

Дані про значення поправкових коефіцієнтів які враховують вплив умов експлуатації БС на її надійність:

Вібрації й ударні навантаження  $K_1$  – 1,29;

Вологість і температура  $K_2$  – 1,2;

Висота над рівнем моря  $K_3$  – 3,3.

Дані про середні тривалості відновлення працездатності елементів 1, 2, 3 БС:

$t_{B1}$  – 5,2;

$t_{B2}$  – 4,4;

$t_{B3}$  – 6,8.

Дані про вартість однієї РК у групах 1,2,3:

$C_1$  – 25;

$C_2$  – 34;

$C_3$  – 42.

Дані про середню вартість ремонту елементів 1,2,3 основного об'єкта:

$M_1(C_{p1})$  – 220;

$M_2(C_{p2})$  – 215;

$M_3(C_{p3})$  – 280.

Період спостереження  $T_{сп} = 10000$  годин.



1. Розрахунок числових значень ряду показників надійності для основної відновлюваної БС і середньої сумарної вартості ремонту об'єкта на заданому інтервалі спостереження без урахування умов експлуатації.

1.1. За формулами, обчислюють значення інтенсивностей відмов елементів БС  $\lambda_{iA}$  (для  $i = 1, 2, 3$ ) і сумарну інтенсивність відмов БС,  $\lambda_{БС, Б}$ :

$$\lambda_{1Б} = (10 \times 1,5 + 17 \times 110 + 16 \times 13) \times 10^{-7} = 2093 \times 10^{-7} \text{ (1/год);}$$

$$\lambda_{2Б} = (12 \times 1,5 + 24 \times 110 + 9 \times 13) \times 10^{-7} = 2775 \times 10^{-7} \text{ (1/год);}$$

$$\lambda_{3Б} = (13 \times 1,5 + 31 \times 110 + 20 \times 13) \times 10^{-7} = 3689,5 \times 10^{-7} \text{ (1/год);}$$

$$\lambda_{БС, Б} = (2093 + 2775 + 3689,5) \times 10^{-7} = 8557,5 \times 10^{-7} \text{ (1/год).}$$

За формулою, визначаємо значення середнього напрацювання на відмову БС:

$$T_{0, БС, Б} = \frac{1}{\lambda_{БС, Б}} = \frac{1}{8557,5 \times 10^{-7}} \approx 1169 \text{ (год).}$$

1.2. За формулою, визначаємо значення ймовірностей відмов елементів БС –  $Q_1, Q_2, Q_3$ . Ці значення будуть мати однакову величину як без урахування умов експлуатації, так і з урахуванням умов експлуатації:

$$Q_1 = \frac{\lambda_{1Б}}{\lambda_{БС, Б}} = \frac{2093 \times 10^{-7}}{8557,5 \times 10^{-7}} = 0,025;$$

$$Q_2 = \frac{\lambda_{2Б}}{\lambda_{БС, Б}} = \frac{2775 \times 10^{-7}}{8557,5 \times 10^{-7}} = 0,032;$$

$$Q_3 = \frac{\lambda_{3Б}}{\lambda_{БС, Б}} = \frac{3689,5 \times 10^{-7}}{8557,5 \times 10^{-7}} = 0,043.$$

1.3. За формулою, визначаємо значення середньої кількості відмов  $m_1 \left( \frac{n}{T_{сп, Б}} \right)$  на інтервалі спостереження  $T_{сп}$ :

$$m_1 \left( \frac{n}{T_{сп, Б}} \right) = T_{сп} \times \lambda_{БС, Б} = 10000 \times 8557,5 \times 10^{-7} \approx 9.$$

1.4. За формулою, визначаємо значення середньої вартості одного ремонту всієї БС. Це значення буде мати однакову величину як без урахування умов експлуатації, так і з урахуванням умов експлуатації:

$$m_1(C_{p,BC}) = \sum_{i=1}^3 Q_1 m_1(C_{p,i}) = 0,025 \times 220 + 0,032 \times 215 + 0,043 \times 280 \approx 292 \text{ (у.г.о.)}.$$

1.5. За формулою, визначаємо значення середньої сумарної вартості ремонту всієї БС на інтервалі спостереження  $T_{сп}$ :

$$m_1(C_{сум,р.БС,Б}(T_{сп})) = m_1\left(\frac{n}{T_{сп,Б}}\right) \times m_1(C_{p,BC}) = 9 \times 292 = 2628 \text{ (у.г.о.)}.$$

1.6. За формулою, визначаємо значення середньої тривалості відновлення БС  $T_{в БС}$ . Це значення буде мати однакову величину як без урахування умов експлуатації, так і з урахуванням умов експлуатації:

$$T_{в БС} = \sum_{i=1}^3 Q_1 t_{Bi} = 0,025 \times 5,2 + 0,032 \times 4,4 + 0,043 \times 6,8 \approx 0,6 \text{ (в.ч.о.)}.$$

1.7. За формулою, визначаємо значення коефіцієнта готовності БС:

$$K_{Г БС,Б} = \frac{T_{о БС,Б}}{T_{о БС,Б} + T_{в БС}} = \frac{1169}{1169 + 0,6} \approx 0,9995.$$

2. Розрахунок числових значень ряду показників надійності для основної відновлюваної БС і середньої сумарної вартості ремонту об'єкта на заданому інтервалі спостереження  $T_{сп}$  з урахуванням умов експлуатації.

2.1. За формулами, визначаємо значення інтенсивностей відмов елементів БС (для  $i = 1, 2, 3$ ) і сумарну інтенсивність відмов БС:

$$\lambda_{1C} = (\sum_{l=1}^3 Kl) = (10 \times 1,5 + 17 \times 110 + 16 \times 13) \times 10^{-7} = 3,06 \times 2093 \times 10^{-7} \approx 6404,6 \times 10^{-7} \text{ (1/год)} ;$$

$$\lambda_{2C} = (\sum_{l=1}^3 Kl) = (12 \times 1,5 + 24 \times 110 + 9 \times 13) \times 10^{-7} = 3,06 \times 2775 \times 10^{-7} \approx 8491,5 \times 10^{-7} \quad ;$$

(1/год)

$$\lambda_{3C} = (\sum_{l=1}^3 Kl) = (13 \times 1,5 + 31 \times 110 + 20 \times 13) \times 10^{-7} = 3,06 \times 3689,5 \times 10^{-7} \approx 11289,9 \times 10^{-7}$$

(1/год);

$$\lambda_{BC,C} = (6404,6 + 8491,5 + 11289,9) \times 10^{-7} = 26186 \times 10^{-7} \quad (1/\text{год}).$$

2.2. За формулою, визначаємо значення середнього напрацювання на відмову БС:

$$T_{0\text{BC,C}} = \frac{1}{\lambda_{BC,C}} = \frac{1}{26186 \times 10^{-7}} \approx 382 \text{ (год.)}.$$

2.3. За формулою, визначаємо значення середньої кількості відмов  $m_1 \left( \frac{n}{T_{\text{сп,C}}} \right)$  на інтервалі спостереження  $T_{\text{сп}}$ :

$$m_1 \left( \frac{n}{T_{\text{сп,C}}} \right) = T_{\text{сп}} \times \lambda_{BC,C} = 10000 \times 26186 \times 10^{-7} \approx 26.$$

2.4. За формулами, визначаємо значення середньої сумарної вартості ремонту всієї БС на інтервалі спостереження  $T_{\text{сп}}$ :

$$m_1(C_{\text{сум.р.БС,C}}(T_{\text{сп}})) = m_1 \left( \frac{n}{T_{\text{сп,C}}} \right) \times m_1(C_{\text{р.БС}}) = 26 \times 292 = 7592 \text{ (у.г.о.)}.$$

2.5. За формулою, визначаємо значення коефіцієнта готовності БС:

$$K_{Г\text{BC,C}} = \frac{T_{0\text{BC,C}}}{T_{0\text{BC,C}} + T_{\text{ВБС}}} = \frac{382}{382 + 0,6} \approx 0,9984.$$

3. На основі результатів розрахунків, виконаних у п. 1 і 2, можна зробити висновок про ступінь впливу умов експлуатації на числові значення показників надійності БС і середню сумарну вартість ремонту БС на заданому інтервалі спостереження:

а) середнє напрацювання на відмову БС  $T_{0\text{ БС, С}}$ , обчислений з урахуванням умов експлуатації, зменшився на 67% порівняно зі значенням  $T_{0\text{ БС, Б}}$ , що визначався без урахування умов експлуатації:

$$\Delta(T_{0\text{ БС}})\% = \frac{1169-382}{1169} \times 100\% \approx 67\%.$$

б) середня тривалість відновлення БС  $T_{\text{В БС}}$  не змінилася:

$$T_{\text{В БС}} = 0,6 \text{ (в.ч.о.)}.$$

в) коефіцієнт готовності БС  $K_{\text{Г БС, С}}$ , обчислений з урахуванням умов експлуатації, зменшився на 0,2% порівняно зі значенням  $K_{\text{Г БС, Б}}$ , що визначався без урахування умов експлуатації:

$$\Delta(K_{\text{Г БС}})\% = \frac{0,9995-0,9984}{0,9995} \times 100\% \approx 0,2\%.$$

г) граничний рівень сумарних витрат на ремонт БС  $C_{\text{сум.гр.р.БС, С}}$ , обчислений з урахуванням умов експлуатації, збільшився на 65% порівняно зі значенням  $C_{\text{сум.гр.р.БС, Б}}$ , що визначався без урахування умов експлуатації:

$$\Delta(C_{\text{сум.гр.р.БС}})\% = \frac{7592-2628}{7592} \times 100\% \approx 65\%.$$

Таким чином, якщо об'єктивно є умови експлуатації, які негативно впливають на надійнісні властивості БС, то їх необхідно враховувати, інакше, може відбутися непередбачене збільшення середніх витрат на ремонт БС.

4. Розрахунок числових значень показників надійності для основної відновлюваної БС з урахуванням резервування першого і другого її елементів і за умови, що виконують урахування умов експлуатації БС.

4.1. За формулами, визначаємо значення інтенсивностей відмов елементів резервованої БС і сумарну інтенсивність відмов БС:

$$\lambda_{\text{рез.ел.1,4}} = \frac{6404,6 \times 10^{-7}}{1,5} = 4269,3 \times 10^{-7} \text{ (1/год);}$$

$$\lambda_{\text{рез.ел.2,5}} = \frac{8491,5 \times 10^{-7}}{2} = 4245,75 \times 10^{-7} \text{ (1/год);}$$

$$\lambda_{\text{ел.3}} = 11289,9 \times 10^{-7} \text{ (1/год);}$$

$$\lambda_{\text{рез.БС,1}} = \lambda_{\text{рез.ел.1,4}} + \lambda_{\text{рез.ел.2,5}} + \lambda_{\text{ел.3}} = (4269,3 + 4245,75 + 11289,9) \times 10^{-7} \approx \\ \approx 19804,95 \times 10^{-7} \text{ (1/год).}$$

4.2. За формулою, визначаємо значення середнього напрацювання на відмову всієї БС  $T_{0 \text{ рез.БС } 1}$  для першого варіанта резервування:

$$T_{0 \text{ рез.БС } 1} = \frac{1}{\lambda_{\text{рез.БС,1}}} = \frac{1}{19804,95 \times 10^{-7}} \approx 505 \text{ (год).}$$

4.3. За формулою, визначаємо значення ймовірності відмов елементів БС:

$$Q_{1,4} = \frac{\lambda_{\text{рез.ел.1,4}}}{\lambda_{\text{рез.БС,1}}} = \frac{4269,3 \times 10^{-7}}{19804,95 \times 10^{-7}} \approx 0,2;$$

$$Q_{2,5} = \frac{\lambda_{\text{рез.ел.2,5}}}{\lambda_{\text{рез.БС,1}}} = \frac{4245,75 \times 10^{-7}}{19804,95 \times 10^{-7}} \approx 0,21;$$

$$Q_3 = \frac{\lambda_{\text{ел.3}}}{\lambda_{\text{рез.БС,1}}} = \frac{11289,9 \times 10^{-7}}{19804,95 \times 10^{-7}} \approx 0,57.$$

4.4. За формулою, визначаємо значення середнього числа відмов  $m_1 \left( \frac{n}{T_{\text{сп,рез.БС,1}}} \right)$  на інтервалі спостереження  $T_{\text{сп}}$ :

$$m_1 \left( \frac{n}{T_{\text{сп,рез.БС,1}}} \right) = T_{\text{сп}} \times \lambda_{\text{рез.БС,1}} = 10000 \times (19804,95 \times 10^{-7}) \approx 20.$$

4.5. За формулою, визначаємо значення середньої вартості одного ремонту всієї БС:

$$m_1(C_{\text{р.рез.БС,1}}) = Q_{1,4} m_1(C_{\text{р.рез.БС,1,4}}) + Q_{2,5} m_1(C_{\text{р.рез.БС,2,5}}) + Q_3 m_1(C_{\text{р.ел.3}});$$

$$m_1(C_{p,\text{рез.БС},1,4}) = 2 m_1(C_{p,\text{ел.1}}); m_1(C_{p,\text{рез.БС},2,5}) = 2 m_1(C_{p,\text{ел.2}});$$

$$m_1(C_{p,\text{рез.БС},1}) = 0,2 \times 2 \times 220 + 0,21 \times 2 \times 215 + 0,57 \times 280 = 338 \text{ (у.г.о.)}.$$

4.6. За формулою, визначаємо значення середньої сумарної вартості ремонту всієї резервованої БС на інтервалі спостереження  $T_{\text{сп}}$ :

$$m_1(C_{\text{сум.р.БС},1}(T_{\text{сп}})) = m_1\left(\frac{n}{T_{\text{сп,рез.БС},1}}\right) \times m_1(C_{p,\text{рез.БС},1}) = 20 \times 338 = 6760 \text{ (у.г.о.)}.$$

4.7. За формулою, визначаємо значення граничного рівня сумарної вартості ремонту всієї резервованої БС для першого варіанта резервування  $C_{\text{сум.гр.р.рез.БС}}$  на інтервалі спостереження  $T_{\text{сп}}$ :

$$\begin{aligned} C_{\text{сум.гр.р.рез.БС},1} &= m_1(C_{\text{сум.р.БС},1}(T_{\text{сп}})) + \text{В}\delta(C_{\text{сум.р.рез.БС},1}(T_{\text{сп}})) = \\ &= 6760 + 1,65 \times (338^2 \times 20)^{1/2} \approx 9254 \text{ (у.г.о.)}. \end{aligned}$$

4.8. За формулою, визначаємо значення середньої тривалості відновлення БС:

$$T_{\text{В рез.БС},1} = Q_{1,4} t_{\text{В рез.ел.1,4}} + Q_{1,5} t_{\text{В рез.ел.2,5}} + Q_3 t_{\text{ВЗ}};$$

$$T_{\text{В рез.ел.1,4}} = 1,2 t_{\text{ел.1}}; T_{\text{В рез.ел.2,5}} = 1,2 t_{\text{ел.2}};$$

$$T_{\text{В рез.БС},1} = 0,2 \times 1,2 \times 5,2 + 0,21 \times 1,2 \times 4,4 + 0,57 \times 6,8 = 6,2 \text{ (в.ч.о.)}.$$

4.9. За формулою, знаходимо значення коефіцієнта готовності БС для першого варіанта резервування:

$$K_{\Gamma \text{рез.БС},1}(t) = \frac{T_0 \text{рез.БС},1}{T_0 \text{рез.БС},1 + T_{\text{В рез.БС},1}} = \frac{505}{505 + 6,2} \approx 0,9879.$$

5. Графіки ймовірності безвідмовної роботи БС без резервування і з резервуванням її елементів за визначеними умовами експлуатації БС.

5.1. За формулою, визначають вираз для ймовірності безвідмовної роботи БС без резервування її елементів:

$$P_{\text{БС}}(t) = e^{-\lambda_{\text{БС}} t} = e^{-26186 \times 10^{-7}}.$$

5.2. З урахуванням формул, знаходять вираз для ймовірності безвідмовної роботи БС з резервуванням її елементів:

$$P_{\text{рез.ел.1,4}}(t) = 1 - Q_{\text{ел.1}}(t)Q_{\text{ел.4}} = 1 - [1 - e^{-\lambda_{\text{ел.1}} t}][1 - e^{-\lambda_{\text{ел.4}} t}] = 1 - [1 - e^{-\lambda_{\text{ел.1}} t}]^2 =$$

$$= 1 - [1 - e^{-6404,6 \times 10^{-7}}]^2 \approx 1;$$

$$P_{\text{рез.ел.2,5}}(t) = e^{-\lambda_{\text{ел.2}} t} (1 + \lambda_{\text{ел.2}} t) = e^{-8491,5 \times 10^{-7}} (1 + 8491,5 \times 10^{-7}) \approx 1;$$

$$P_{\text{рез.ел.3}}(t) = e^{-\lambda_{\text{ел.3}} t} = e^{-11289,9 \times 10^{-7}} \approx 1;$$

$$P_{\text{рез.БС,1}}(t) = P_{\text{рез.ел.1,4}}(t) \times P_{\text{рез.ел.2,5}}(t) \times P_{\text{ел.3}}(t) = 1.$$

При визначенні виразу для  $P_{\text{рез.БС,1}}$  вважаємо, що елементи 1 і 4, а також елементи 2 і 5 є ідентичними.

5.3. З урахуванням формул, визначають значення середнього напрацювання на першу відмову відновлюваної БС для випадків з резервуванням і без резервування її елементів:

$$T_{0 \text{ БС}} = \frac{1}{\lambda_{\text{БС}}} = \frac{1}{26186 \times 10^{-7}} \approx 382 \text{ (год.)}.$$

$$T_{0 \text{ рез. БС,1}} = \int_0^{\infty} P_{\text{рез.БС,1}}(t) dt = 1.$$

Висновок: розбіжність середнього наробітку на відмову резервованої і нерезервованої БС, може бути зумовлено припущеннями про експоненціальний закон розподілу напрацювань на відмову елементів резервованої БС.

5.4. З урахуванням виразів, будуюмо графіки ймовірності безвідмовної роботи БС  $P_{\text{БС}}(t)$ ,  $P_{\text{рез.БС,1}}(t)$ :

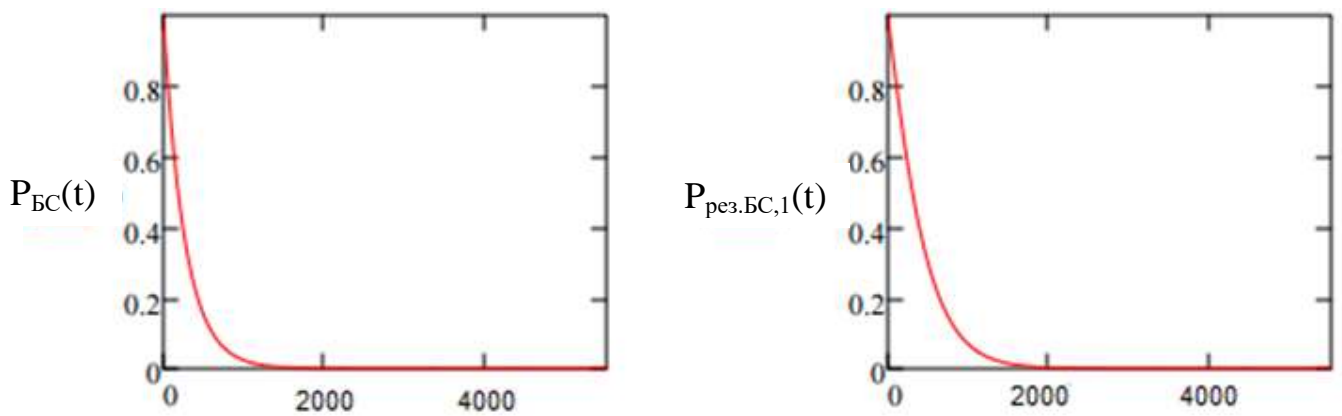


Рис. 3.2. Графік ймовірності безвідмовної роботи БС  $P_{BS}(t)$ ,  $P_{рез.БС,1}(t)$

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У даному розділі було розглянуто теоретичні відомості розрахунку надійності варіантів резервування.

Під час виконання розрахунків без урахування умов експлуатації БС використовують методику орієнтовного методу розрахунку надійності. При виконанні розрахунків з урахуванням умов експлуатації БС використовують методику повного розрахунку надійності.

Середнє напрацювання на відмову БС  $T_{0\text{БС},С}$ , обчислений з урахуванням умов експлуатації, зменшився на 67% порівняно зі значенням  $T_{0\text{БС},Б}$ , що визначався без урахування умов експлуатації. Середня тривалість відновлення БС  $T_{В\text{БС}}$  не змінилася.

Коефіцієнт готовності  $K_{Г\text{БС},С}$ , обчислений з урахуванням умов експлуатації, зменшився на 0,2% порівняно зі значенням  $K_{Г\text{БС},Б}$ , що визначався без урахування умов експлуатації.

Граничний рівень сумарних витрат на ремонт  $C_{сум.гр.р.БС,С}$ , обчислений з урахуванням умов експлуатації, збільшився на 65% порівняно зі значенням  $C_{сум.гр.р.БС,Б}$ , що визначався без урахування умов експлуатації.



Розбіжність середнього наробітку на відмову резервованої і нерезервованої БС, може бути зумовлено припущеннями про експоненціальний закон розподілу напрацювань на відмову елементів резервованої БС.

## ВИСНОВКИ

Розглянуті у роботі базові станції активно використовуються у повсякденному житті та мають дуже добрі характеристики. Забезпечення надійності БС є критично важливою задачею для розгортання ефективних та надійних мереж мобільного зв'язку. З надійною роботою базових станцій зв'язок може бути забезпечений з високою якістю та швидкістю, що є ключовим для багатьох різних видів діяльності. Однак, на жаль, базові станції можуть бути підвернуті різним впливам, таким як погодні умови, технічні несправності, крадіжки або вандалізм. Ці чинники можуть спричинити збої у роботі БС, які можуть призвести до переривань у зв'язку, що може мати серйозні наслідки для бізнесу та індивідуальних користувачів. Вирішення проблем, пов'язаних з надійністю та енергоефективністю базових станцій, є важливішим завданням для операторів мобільного зв'язку.

У першому розділі було розглянуто побудову 4 базових станцій DME, а саме Ericsson, Flexi Multiradio, Airspan Air4G (MacroMAXe) та Huawei DBS3900 LTE та їх структурні схеми.

Базова станція RBS 2000 - друге покоління базових радіостанцій, розроблене компанією Ericsson у відповідності зі специфікаціями GSM. Гнучка конструкція надає можливість створення певної кількості конфігурацій і розширень у міру зростання мережі. Базова станція підтримує ієрархічну структуру сот (Hierarchical cell Structures - HCS) до трьох рівнів.

Базова система Flexi Multiradio BTS GSM/EDGE від Nokia Siemens Networks заснована на технології активних антени, яка об'єднує антену та радіообладнання в єдиний функціональний блок, що має окремі підсилювачі потужності для кожного елемента антени. Активна антена дозволяє здійснювати формування променів – фокусування окремого радіо підключення та його направлення на конкретного користувача – а також використовувати різні технології в одному блоці. Має високий рівень надійності. Можна встановлювати: всередині та поза приміщеннями, з установкою на підлозі, стіні, жердині, щоглі, у розподілених та без фідерних

конфігураціях майданчика. Високий частотний радіус дії, є допоміжні модулі для розширення можливостей БС і т.д.

Базова система WiMAX/LTE: Airspan Air4G (MacroMAXe), призначена для розгортання у три секторній конфігурації, що є оптимальним для розгортання мереж мобільного WiMAX та LTE. Система повністю підтримує протокол R6 для роботи зі шлюзом мережі доступу (ASN Gateway) як розподіленим, так і централізованим.

Базова станція Huawei DBS3900 забезпечує просту структуру та швидке розгортання мережі. DBS3900 має тільки два типи основних функціональних модулів, таким чином значно скорочуючи витрати на запасні частини та обслуговування.

У другому розділі розглянуто питання структури розв'язування надійності, тобто розписано етапи, моделі, об'єкти що необхідні для складання картини надійності та подальшого розв'язування надійності будь-якої РЕА.

Було розглянуто такі методи:

- Аналітичні методи розрахунку надійності,
- Повний розрахунок безвідмовності,
- Розрахунок за поступовими відмовами,
- Коефіцієнтний метод,
- Наближені методи,
- Метод врахування реальних навантажень елементів.

У третьому розділі було розглянуто теоретичні відомості розрахунку надійності варіантів резервування.

Під час виконання розрахунків без урахування умов експлуатації БС використовують методику орієнтовного методу розрахунку надійності.

При виконанні розрахунків з урахуванням умов експлуатації БС використовують методику повного розрахунку надійності.

Також було приведено розрахунок надійності варіантів резервування.

Можливі варіанти резервування БС:

варіант 1 – резервуються елементи 1, 2-й елемент у ненавантаженому режимі  
–  $N_1, \bar{N}_2$ ;

варіант 2 – резервуються елементи 1, 3-й елемент у невантаженому режимі

–  $H_1, \overline{H_3}$ ;

варіант 3 – резервуються елементи 2, 3-й елемент у невантаженому режимі

–  $H_2, \overline{H_3}$ ;

варіант 4 – резервуються елементи 3, 2-й елемент у невантаженому режимі

–  $\overline{H_2}, H_3$ .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. посібник/За ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І.Правди.-К.: Вища шк., 2019.-83 с.:іл.
2. Лободзінська Р.Ф. Конструювання радіоелектронних засобів телекомунікаційних систем . Вінниця :ВНТУ, 2018.
3. Голь В.Д., Ірха М.С. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: навчальний посібник. Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 250 с.
4. Anatol Badach . Voice over IP - Die Technik: Grundlagen, Protokolle, Anwendungen, Migration, Sicherheit, Notrufdienste, Videotelefonie. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 5., überarbeitete und erweiterte Edition 2022. – 655 s.
5. Зуєв О.В, Соломенцев О.В.,Красноружев Г.І. Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронних засобів: Конспект лекцій. – Кривий Ріг. : КРАТК, 2009. – 110 с.
6. Basics of radioelectronic equipment reliability, operation and repair theory: Lecture synopsis / O.V.Zuiev, O.M. Akmalidina, O.V. Solomentchev, Ju.M. Khmelko.- Kyiv: NAU, 2011. - 60 p.
7. Системи експлуатації авіаційних радіоелектронних систем та комплексів: Конспект лекцій / О.В. Соломенцев, М.Ю. Заліський, О.В.Зуєв, С.В. Рудий.- Кривий Ріг: КК НАУ, 2017 .- 62 с.
8. Solomentsev O., Zaliskyi M., Zuiev O. Intelligence-Based Operation of Aviation Radioelectronic Equipment . Chapter in the book; Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries;, IGI Global, Pennsylvania, USA, 2020, pp. 148-179.
9. Basics of radioelectronic equipment reliability, operation and repair theory: Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 6.090702 «Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси»/ О.В.Зуєв, О.В.Соломенцев, Ю.М.Хмелько - К.: Видавництво НАУ “НАУ–друк”, 2009.– 32с.

10. Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронних засобів. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 6.090702 «Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси»/ О.В.Зуєв, О.В.Соломенцев, Ю.М.Хмелько - К.: Видавництво НАУ «НАУ–друк», 2009.– 32с.

11. Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронної апаратури: Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»/ , О.В.Соломенцев, О.В.Зуєв, М.Ю.Заліський - К.: Видавництво НАУ «НАУ–друк», 2019.– 24с.

12. Huawei technologies CO., LTD. GBSS9.0 DBS3900 Product Description: Технічний посібник Базових станцій компанії Huawei.