

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

**Пояснювальна записка**  
до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему:

**«МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ  
СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE»**

Виконав: студент 6 курсу, групи РТДМ-61  
спеціальності 172 Телекомунікації та  
радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Барін В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Рецензент

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Київ - 2021

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(цифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Мобільних та відеоінформаційних технологій

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 року

### ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Баріну Владиславу Валерійовичу

1. Тема роботи: «Методи підвищення надійності якісних показників систем мобільного зв'язку стандарту LTE», керівник роботи Кравченко Владислав Ігорович, к.т.н., доцент, директор ННІТ затверджені наказом вищого навчального закладу від \_\_\_\_\_ року № \_\_\_\_.

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Технічні характеристики системи зв'язку мобільного зв'язку;
2. Науково-технічна література.

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

1. Аналіз та основні характеристики технології LTE
2. Методи підвищення надійності систем LTE
3. Методи розрахунку показників надійності і живучість мереж зв'язку стандарту LTE

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Титул;
2. Мета роботи;
3. Вступ;
4. Архітектура LTE;
5. Радіоінтерфейс мережі;
6. Синхронізація в LTE;
7. Види резервування об'єктів;
8. Пасивне резервування;
9. Види резервних схем;
10. Розрахунок надійності резервованих систем;
11. Висновки.

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури		Виконано
2.	Аналіз та основні характеристики технології LTE		Виконано
3.	Методи підвищення надійності систем LTE		Виконано
4.	Методи розрахунку показників надійності і живучість мереж зв'язку стандарту LTE		Виконано
5.	Висновки, вступ, реферат		Виконано
6.	Розробка презентації		Виконано

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Барін В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Кравченко В.І.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 58 сторінок, 16 рисунків, 3 таблиці, 21 джерело.

*Об'єкт дослідження* – система мобільного зв'язку стандарту LTE.

*Предмет дослідження* – алгоритм підвищення показників надійності мереж стільникового зв'язку стандарту LTE.

*Мета роботи* – розробка методики підвищення показників надійності мереж стільникового зв'язку стандарту LTE.

*Методи дослідження* – теорії електров'язку, емпіричне дослідження, методи теоретичного дослідження.

В роботі проведено аналіз технічних особливостей мережі широкопasmового доступу стандарту LTE. Проаналізовані основні методи резервування ключових компонентів радіомереж: активне та пасивне резервування. Розглянуто особливості резервування зношуваних елементів та зроблено висновки щодо доцільності вибору методу резервування для побудови мережі зв'язку стандарту LTE.

БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ, ПЕРЕДАЧА ДАНИХ, РЕЗЕРВУВАННЯ, LTE, 3GPP, 4G, ШИРОКОСМУГОВИЙ ДОСТУП

## ЗМІСТ

	стр.
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГІЇ LTE...	9
1.1 Шляхи розвитку технології LTE.....	9
1.2 Короткий розгляд основних параметрів технології LTE.....	16
1.3 Архітектура мережі стандарту LTE.....	17
1.4 Принципи побудови радіоінтерфейсу за технологією LTE....	19
1.5 Спектр послуг, що надаються мережами LTE.....	24
2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ LTE.....	26
2.1 Заходи для підвищення надійності систем LTE.....	26
2.2 Основні поняття, визначення і класифікація методів резервованих систем зв'язку.....	31
2.3 Розрахунок надійності систем при структурному резервуванні.....	38
3 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ І ЖИВУЧІСТЬ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE.....	40
3.1 Види резервування об'єктів.....	42
Пасивне резервування з незмінним навантаженням і	
3.2 навантажене активне резервування з дуже надійними перемикаючими пристроями.....	48
3.3 Резервування зношуваних елементів.....	53
ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	56
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	58

## ВСТУП

На сьогоднішній день оператори стільникового зв'язку надають користувачам смартфонів широкий спектр телекомунікаційних послуг. Починаючи з відеотелефонії і закінчуючи хмарними сховищами, в яких можливо не лише зберігати інформацію, але і проводити хмарні обчислення. Звісно, за кожну з цих додаткових послуг необхідно знімати плату з абонента, яка частково піде на оплату праці, а інша частина – на обслуговування обладнання мережі.

Мережа стільникового зв'язку стандарту LTE – сучасна телекомунікаційна мережа, яка надає користувачу повний спектр інфокомунікаційних послуг, а отже – обладнання мережі (базові станції, ЦОДи, сервери та інші мережеві компоненти) перебувають під постійним навантаженням, що призводить до його зносу, а з постійним процесом оновлення телекомунікаційного обладнання – до його морального та фізичного старіння.

Основним способом підтримки працездатності мережі – є постійна робота з її компонентами: моніторинг працездатності, обслуговування, своєчасний ремонт та заміна. Тому, мережа повинна бути спроектована та побудована таким чином, щоб кожен елемент був зарезервованим, або вихід його з ладу, до заміни або ремонту, не позначався на працездатності та якості послуг оператора зв'язку.

В роботі представлені методи щодо підвищення показників надійності телекомунікаційної мережі. Проаналізовані основні аспекти побудови мережі та заходи щодо визначення показників надійності та сталості мережі. Визначено основні заходи для стабільної роботи мережі та можливості надання мережевих послуг в режимі «постійно онлайн».

# 1 АНАЛІЗ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГІЇ LTE

## 1.1 Шляхи розвитку технології LTE

Безпроводові цифрові комунікації продовжують розвиватися з високою швидкістю. Цьому сприяє неухильний прогрес в мікроелектроніці, що дозволяє випускати усе більш складні і при цьому, усе більш дешеві – засоби безпроводового зв'язку. Пік розвитку стільникового зв'язку, порівнянний лише із зростанням виробництва персональних комп'ютерів і розвитком Інтернету, не сповільнюється вже чверть століття. Мобільних телефонів у всьому світі вже значно більше, чим звичайних стаціонарних телефонних апаратів. Швидкими темпами розвиваються персональні мережі, широко упроваджуються безпроводові мережі регіонального масштабу. Низька вартість, швидкість розгортання, широкі функціональні можливості передачі даних, телефонії, відео потоків роблять безпроводові мережі одним з основних напрямів розвитку телекомунікаційної ІТ-індустрії [5].

Розвиток радіозв'язку супроводжується неперервною зміною технологій, в основі яких лежать стандарти стільникового зв'язку GSM і CDMA, а також стандарти систем передачі даних IEEE 802 (рис. 1.1).

Нові покоління мобільного зв'язку починали розроблятися практично через кожні десять років з моменту переходу від розробок першого покоління аналогових стільникових мереж в 1970-і роки (1G) до мереж з цифровою передачею (2G) в 1980-х роках. Від початку розробок до реального впровадження проходила достатня кількість часу (наприклад, мережі 1G були впроваджені в 1984 році, мережі 2G – в 1991 році). Історично технології радіозв'язку розвивалися по двох незалежних напрямках – системи телефонного зв'язку (стільниковий зв'язок) і системи передачі інформації (LTE, LTE, Wi-MAX). Але останнім часом спостерігається явна тенденція до злиття цих функцій. У 1990-х роках почав розроблятися стандарт 3G, який базується на методі множинного

доступу з кодовим розділенням каналів; він був впроваджений тільки в 2000-х роках.

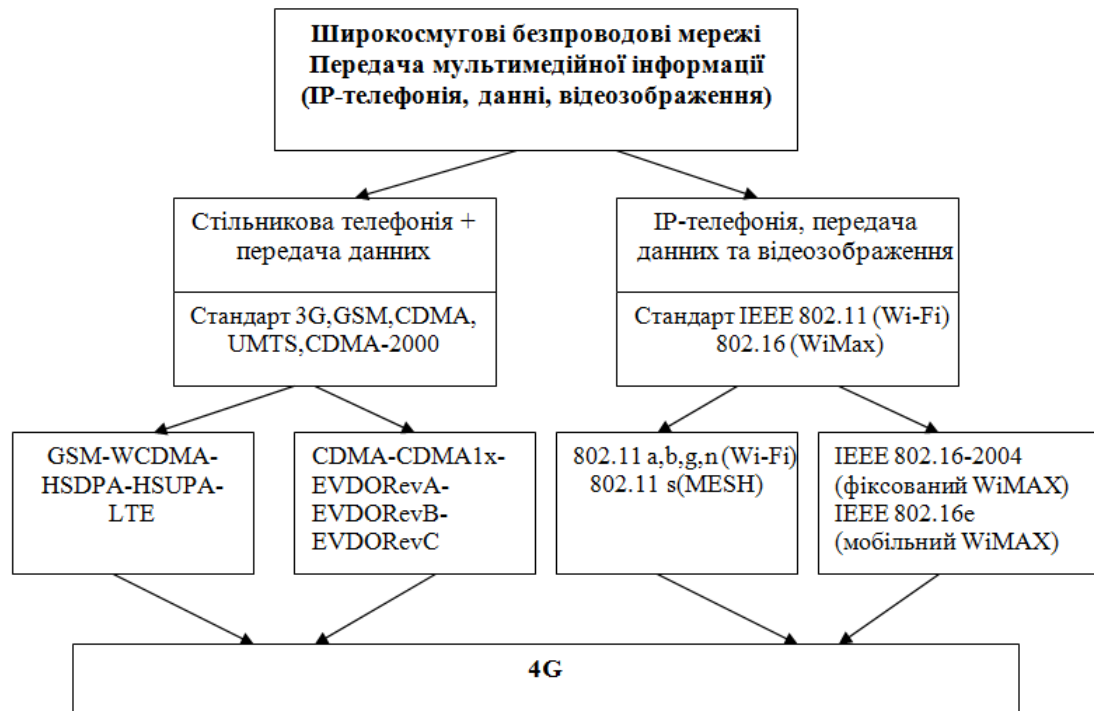


Рис. 1.1 Основні напрями розвитку технології широкопугового зв'язку

До того ж об'єм пакетних данних в мережах стільникового зв'язку третього покоління (3G) вже перевищує обсяг голосового трафіку, що пов'язане з впровадженням технологій HSPA [6]. У свою чергу, сучасні мережі передачі інформації обов'язково забезпечують заданий рівень якості послуг для різних видів та типів трафіку. Реалізується підтримка пріоритезації окремих потоків інформації, причому як на мереженому/транспортному рівнях (на рівні TCP/IP), так і на MAC – рівні (стандарти IEEE 802.16). Це дозволяє використовувати їх для надання послуг голосового зв'язку, передачі мультимедійної інформації і тому подібне.

Технологія фіксованого Wi-MAX (IEEE 802.16-2004) не виправдала надій, що поклалися на неї, по швидкодії, об'єму зони покриття і ціновим характеристикам. Проте оператори справедливо чекають від Wi-MAX (IEEE 802.16e) прориву та якісних мобільних послуг.

Але вимоги користувачів постійно підвищуються [10-12].



Мобільні мережі використовуються не лише для стільникового зв'язку, але і для передачі відео, музики і роботи в мережі Інтернет з високими швидкостями. Саме з цією метою в рамках проекту співпраці в створенні мережі третього покоління 3GPP була почата розробка технології LTE покоління зв'язку з підвищеними вимогами. [2, 5, 8]

Четвертому поколінню притаманні перспективні технології, що дозволяють здійснювати передачу даних зі швидкістю більше 100 Мбіт/с мобільним і 1 Гбіт/с – стаціонарним абонентам. Розробка технології LTE офіційно розпочалася в кінці 2004 р. Основною метою досліджень на початковому етапі був вибір технології фізичного рівня, яка змогла б забезпечити високу швидкість передачі даних. Основними були запропоновані два варіанти: розвиток існуючого радіоінтерфейсу W-CDMA (використаного в HSPA) і створення на основі технології OFDM - нового.

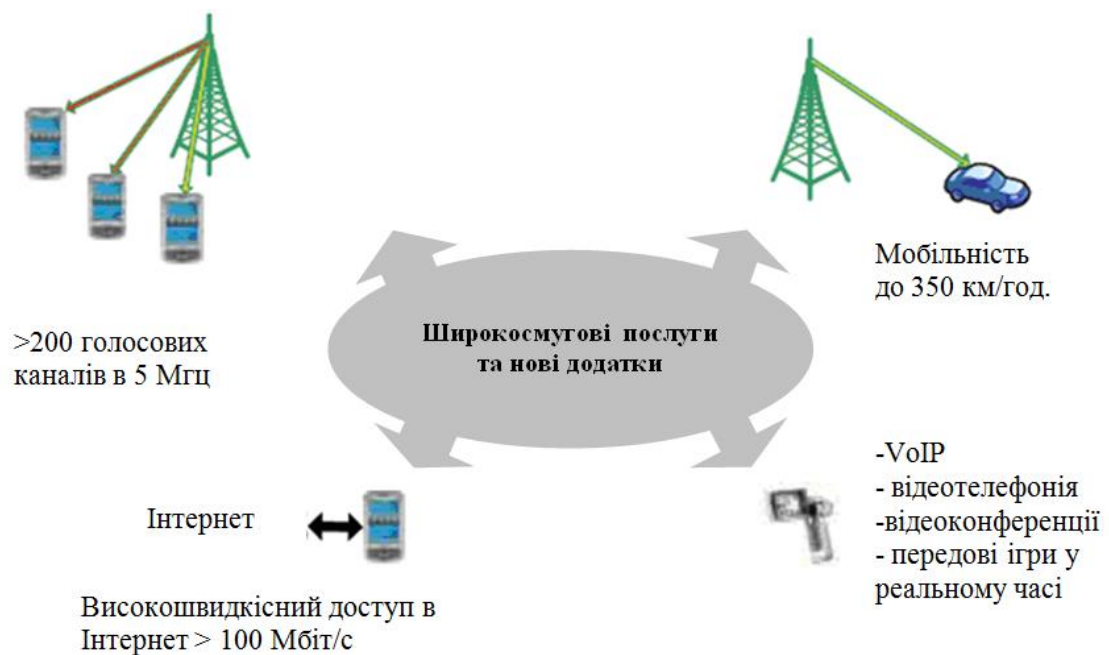


Рис. 1.2 Широкополосні послуги і нові застосування, стимулюючі еволюцію систем 3G

В результаті проведених досліджень єдиною відповідною технологією виявилася OFDM – ортогонального частотного ущільнення, що володіє властивостями, які дозволяють забезпечити тенденції часу. Тобто, LTE базується

на трьох основних технологіях: мультиплексування за допомогою ортогональних OFDM несучих, що транслюються за допомогою багатопроменевих систем MIMO та на еволюційній системній архітектурі мережі SAE. Суть технології MIMO заключається в тому, що передавальні і приймальні антени рознесені так, щоб досягти слабкої кореляції між сусідніми антенами. Це важливо для сучасних систем доступу на базі LTE, які вимагають досягнення максимальних швидкостей передачі інформації в порівнянні з іншими технологіями [8, 13]. Структурна схема мережі LTE представлена на рис. 1.3.

Також принциповим рішенням є організація дуплексного розділення каналів, яке може бути як частотним (FDD), так і часовим (TDD).

Обмін між базовою станцією (БС) і мобільною станцією (МС) будується за принципом передавання радіокадрів, що циклічно повторюються. Тривалість радіокадра становить 10 мс. В технології LTE всі часові параметри розраховуються на основі мінімального часового кванта:

$$T_s = 1 / (2048 \cdot \Delta f),$$

де  $\Delta f$  – крок між носівними, який дорівнює 15 кГц.

Таким чином, тривалість радіокадру складає  $307200 T_s$ . Сам же квант часу відповідає тактовій частоті 30,72 МГц, яка кратна стандартній для 3G-систем частоті 3,84 МГц.

Технологіям LTE Advanced (LTE-A) і Mobile Wi-MAX Release 2 (також відомі, як WirelessMAN-Advanced або IEEE 802.16m) присвоєно офіційне позначення IMT-Advanced, що дозволяє їх кваліфікувати як технологій 4G [6].

Специфікації будь-якого покоління зв'язку, як правило, відносяться до зміни фундаментального характеру обслуговування, технологій передачі, більш високим піковим бітрейтом, новими смугами частот, ширшим каналом смуги пропускання, а також більшою місткістю для множини одночасної передачі даних (більш високій системі спектральної ефективності).

У березні 2008 року сектор радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU) визначив ряд вимог для стандарту міжнародного мобільного широкосмугового зв'язку 4G, що дістав назву специфікацій International Mobile

Telecommunications Advanced (IMT-Advanced), зокрема встановивши вимоги до швидкості передачі даних для обслуговування абонентів: швидкість 100 Мбіт/с повинна надаватися високорухливим абонентам (наприклад, потягам і автомобілям), а абонентам з невеликою рухливістю (наприклад пішоходам і фіксованим абонентам) повинна надаватися швидкість 1 Гбіт/с [145, 148-150].

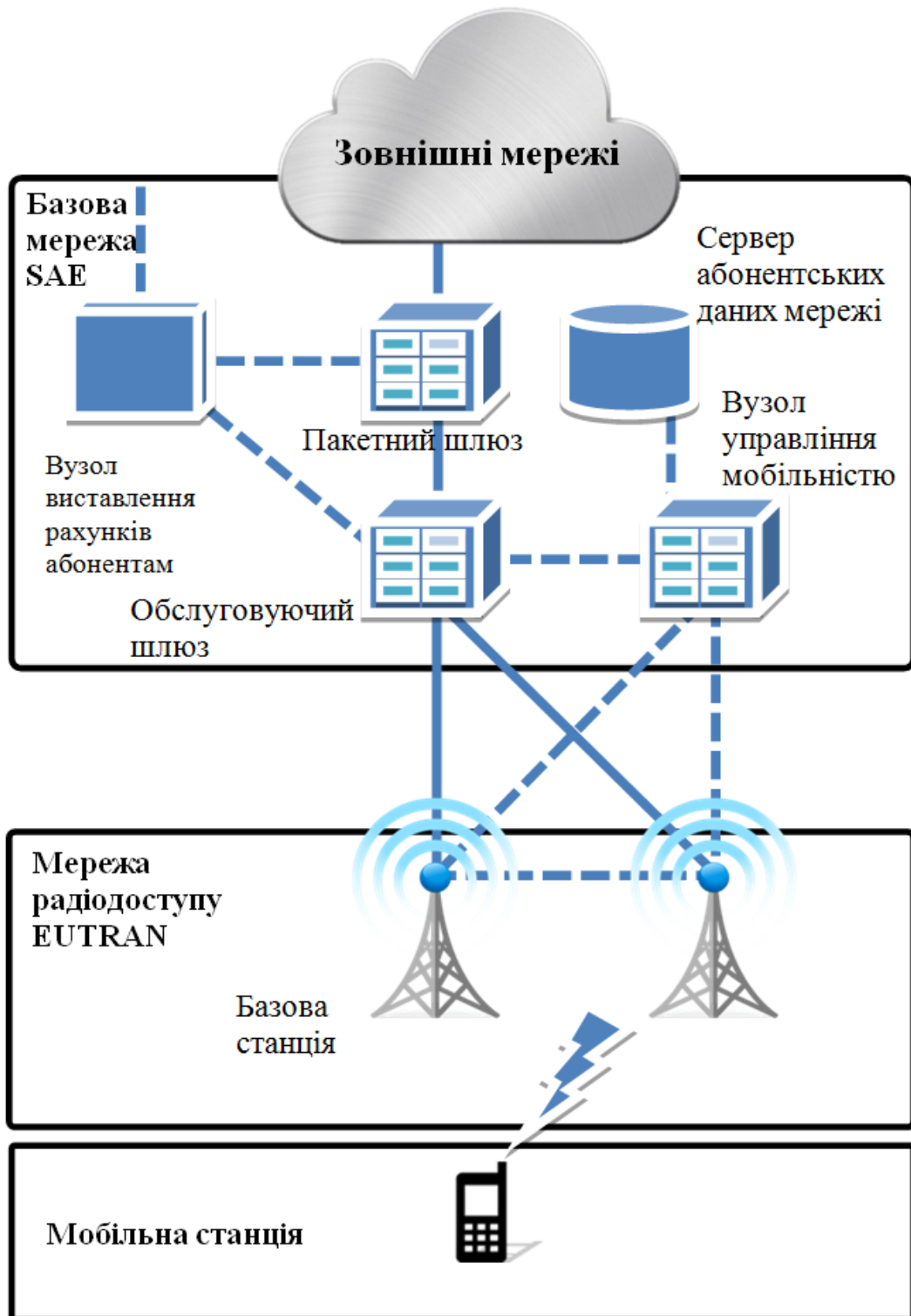


Рис. 1.3 Структурна схема мережі LTE

Основні дослідження при створенні систем зв'язку четвертого покоління ведуться у напрямі використання пакетних протоколів передачі даних. Для пересилки даних використовується протокол IPv4; в майбутньому планується підтримка IPv6.

В грудні 2008 року затверджена версія стандартів 3GPP (Release 8), фіксуючі архітектурні і функціональні вимоги до систем LTE.

Передові міжнародні мобільні телекомунікаційні системи (IMT-Advanced), визначені сектором радіозв'язку MCE, повинні відповідати деяким вимогам, щоб вважатися мережами покоління 4G:

- базуються на комутації пакетів, використовуючи протоколи IP;
- пікові швидкості передачі даних від 100 Мбіт/с для користувачів з високою мобільністю (від 10 км/год до 120 км/год) і від 1 Гбіт/с для користувачів з низькою мобільністю (до 10 км/год);
- використовуються мережеві ресурси, що динамічно розділяються, для підтримки більшої кількості одночасних підключень до одного стільника;
- їх масштабована смуга частот каналу 40 МГц;
- мінімальні значення для пікової спектральної ефективності 15 біт/с/Гц в низхідному каналі і 6,75 біт/с/Гц у висхідному каналі (мається на увазі, що швидкість передачі інформації 1 Гбіт/с в низхідному каналі має бути можлива при смузі пропускання радіоканалу менше 67 МГц);
- спектральна ефективність на сектор в низхідному каналі від 1,1 до 3 біт/с/Гц/сектор і у висхідному каналі від 0,7 до 2,25 біт/с/Гц/сектор;
- плинний хендовер через різні мережі;
- висока якість мобільних послуг.

Подальший розвиток технологія LTE одержала у рамках 3GPP як продовження CDMA і UMTS спочатку не відносився до четвертого покоління мобільного зв'язку [9, 36, 37].

Міжнародним союзом електрозв'язку як стандарт зв'язку, що відповідає усім вимогам безпроводового зв'язку четвертого покоління, було обрано стандарт 3GPP Release 10 (LTE Advanced), який уперше був представлений японською

компанією NTT DoCoMo. Оскільки цей стандарт можна реалізувати на існуючих стільникових мережах, він став популярніший у операторів стільникового зв'язку. У квітні 2008 року компанія Nokia заручилася підтримкою ряду компаній (Sony Ericsson, NEC) для розвитку стандарту LTE і надання цьому стандарту конкурентоспроможності проти Wi-MAX [5].

У 2009 року Шведська телекомунікаційна компанія TeliaSonera, спільно з Ericsson оголосила про запуск першої в світі комерційної мережі четвертого покоління стандарту LTE в Стокгольмі і Осло.

Сформульовані основні вимоги, яким задовольняє LTE Advanced, по суті, це вимоги до стандарту мобільних мереж четвертого покоління (4G):

- максимальна швидкість передачі даних в низхідному радіоканалі до 1 Гбіт/с, у висхідному – до 500 Мбіт/с (середня пропускна спроможність на одного абонента – в три рази вище, ніж в LTE);
- смуга пропускання в низхідному радіоканалі – 70 МГц, у висхідному – 40 МГц;
- максимальна ефективність використання спектру в низхідному радіоканалі – 30 біт/с/Гц, у висхідному – 15 біт/с/Гц (втричі вище, ніж в LTE);
- повна сумісність і взаємодія з LTE й іншими 3GPP системами.
- радіоканали (до 100 МГц), асиметричне розділення смуг пропускання між висхідним і низхідним каналом в разі частотного дуплексу; більш за удосконалену систему кодування і виправлення помилок; гібридну технологію OFDMA і SC-FDMA для висхідного каналу, а також передові рішення в області антенних систем (MIMO). Ця технологія сьогодні знаходиться у стадії динамічного розвитку.

## 1.2 Короткий розгляд основних параметрів технології LTE

LTE володіє високою гнучкістю радіоінтерфейсу. Тип мережі носить назву E-UTRAN — Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (універсальна наземна мережа радіо доступу яка розвивається). Основні параметри технології:

Технологія множинного доступу:

прямий канал (Downlink — DL) — OFDMA;

зворотний канал (Uplink — UL) — SC-FDMA;

Робочий діапазон частот: 450 МГц; 700 МГц; 800 МГц;

1800 МГц; 2,1 ГГц; 2,4 — 2,5 ГГц; 2,6 — 2,7 ГГц.

Бітова швидкість:

прямий канал (DL) MIMO 2TX Ч 2RX: 100 - 300 Мбіт/с.;

зворотний канал (UL): 50 - 172,8 Мбіт/с.

Ширина смуги радіоканалу: 1,4 - 20 МГц.

Радіус: 5 - 30 км.

Ємність (кількість обслуговуваних абонентів):

більше 200 користувачів при смузі 5 МГц;

більше 400 користувачів при смузі більше 5 МГц.

Мобільність: швидкість переміщення до 250 км/г.

Параметри MIMO:

прямий канал (DL): 2TX Ч 2RX, 4TX Ч 4RX;

зворотний канал (UL): 2TX Ч 2RX.

Значеннями затримки (latency): 5мс.

Спектральна ефективність: 5 біт/сек/Гц.

Підтримувані типи модуляції:

прямий канал (DL): 64 QAM, QPSK, 16 QAM.

зворотний канал (UL): QPSK, 16 QAM.

Дуплексний поділ каналів: FDD, TDD.

### 1.3 Архітектура мережі стандарту LTE

Архітектура мережі LTE розроблена так, щоб забезпечити підтримку пакетного трафіку з «безшовною» мобільністю, мінімальними затримками доставки пакетів і високими показниками якості обслуговування. Основною метою розробників стандарту LTE було максимально можливе спрощення структури мережі і виключення дублюючих функцій мережевих протоколів, характерних для системи 3G UMTS.

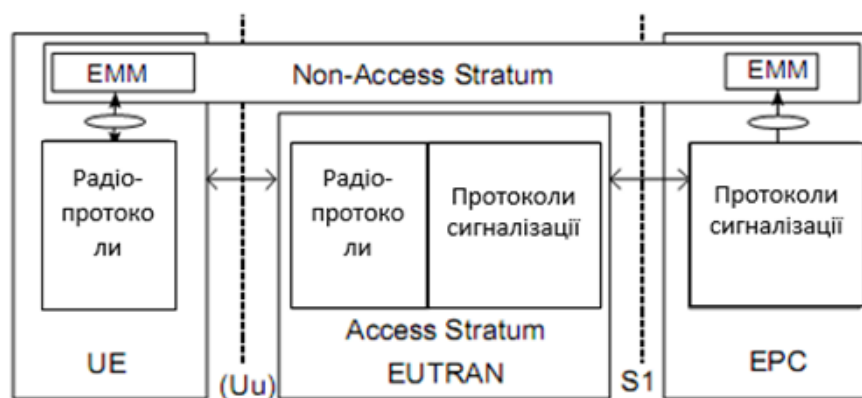


Рис. 1.4. Узагальнена структура мережі LTE

В архітектурі стандарту LTE вся мережева взаємодія відбувається між двома вузлами: базовою станцією (eNB) і блоком управління мобільністю (MME), який включає в себе мережевий шлюз GW (Gateway).

На фізичному рівні мережа LTE складається з двох компонентів: мережі радіодоступу E-UTRAN і базової мережі SAE (System Architecture Evolution).

Мережа E-UTRAN складається з базових станцій eNB. Базові станції є елементами повної мережі і з'єднані між собою за принципом «один з одним». Кожна eNB має інтерфейс S1 з базовою мережею SAE, побудованою за принципом комутації пакетів. На eNB в мережах LTE покладені такі функції: управління радіоресурсами, шифрування потоку даних користувача, маршрутизація в користувальницькій площині пакетів даних.

Базова мережа SAE, звана ще EPC (Evolved Packet Core), містить вузли MME/UPC, що складаються з логічних елементів MME і UPC. Логічний елемент

ММЕ (Mobility Management Entity) відповідає за вирішення завдань управління мобільністю абонентського терміналу і взаємодіє з базовими станціями за допомогою протоколів площини управління С-plane. Крім цього, ММЕ розподіляє повідомлення виклику (paging) до eNB, управляє протоколами площини управління, призначає ідентифікатори абонентських терміналів, забезпечує безпеку мережі, перевіряє справжність повідомлень абонентів та управляє роумінгом.

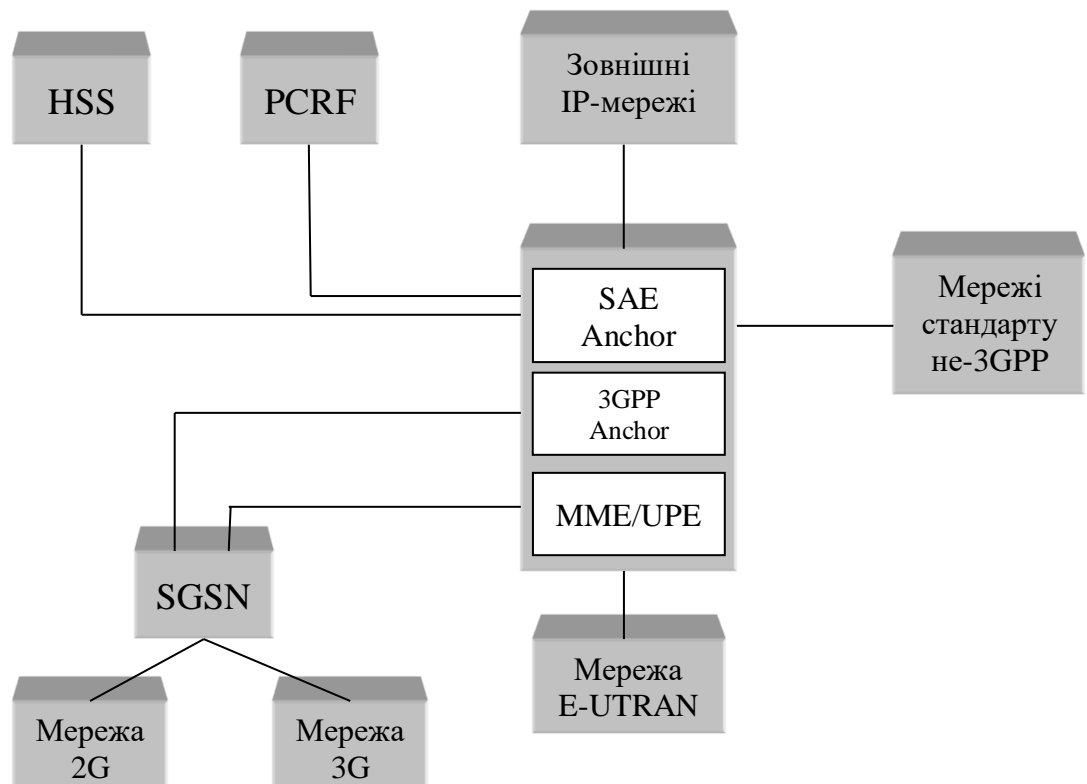


Рис.1.5. Архітектура базової мережі SAE

Логічний елемент UPE (User Plane Entity) відповідає за передачу даних користувачів згідно з протоколами площини користувача U-plane. Елемент UPE виконує наступні функції: стиснення заголовків IP-протоколів, шифрування потоків даних, термінацію пакетів даних.

Архітектура базової мережі SAE являє собою пакетний PS-домен системи LTE, який надає як голосові, так і всю сукупність IP-послуг на основі технологій пакетної комутації даних. В основу базової мережі SAE покладена концепція «все через IP» і та обставина, що доступ до неї може здійснюватися як через мережі



радіодоступу другого і третього покоління (UTRAN/GERAN), так і через мережі не-3GPP (Wi-MAX, LTE), а також через мережі, що використовують провідні IP-технології (ADSL +, FTTH).

#### 1.4 Принципи побудови радіоінтерфейсу за технологією LTE

Технологія LTE базується на трьох основних технологіях: мультиплексування за допомогою ортогональних несучих OFDM, багатоантенні системи MIMO і еволюційна системна архітектура мережі SAE.

Принципово те, що дуплексний поділ каналів може бути як частотним (FDD), так і часовим (TDD). Це дозволяє операторам дуже гнучко використовувати частотний ресурс. Таке рішення відкриває шлях на ринок тим компаніям, які не володіють спареними частотами. З іншого боку, підтримка FDD дуже зручна для традиційних стільникових операторів, оскільки у них спарені частоти є "за визначенням" – так організовані практично всі існуючі системи стільникового зв'язку. Сама ж по собі система FDD істотно більш ефективна в плані використання частотного ресурсу, ніж TDD, – в ній менше накладних витрат (службових полів, інтервалів тощо).

Обмін між базовою станцією (БС) і мобільною станцією (МС) будується за принципом циклічно повторюваних кадрів (у термінології LTE – радіокадр). Загальна тривалість радіокадра – 10 мс. Всі часові параметри в специфікації LTE прив'язані до мінімального часового кванту  $T_s = 1 / (2048 \cdot \Delta f)$ , де  $\Delta f$  – крок між піднесучими, стандартно – 15 кГц. Таким чином, тривалість радіокадра –  $307200 T_s$ . Сам же квант часу відповідає тактовій частоті 30,72 МГц, що кратно стандартній в 3G – системах (WCDMA з смугою каналу 5 МГц) частоті обробки 3,84 МГц ( $8 \times 3,84 = 30,72$ ). Стандарт LTE передбачає два типи радіокадрів. Радіокадр типу 1 призначений для частотного дуплексування – як для повного дуплексу, так і для напівдуплексу. Такий кадр складається з 20 слотів (тривалістю 0,5 мс), нумерованих від 0 до 19. Два суміжні слоти утворюють субкадр (рис. 1.4). При повнодуплексному режимі радіокадри у висхідному і

низхідному каналах передаються паралельно, але з оговореним у стандарті часовим зсувом.

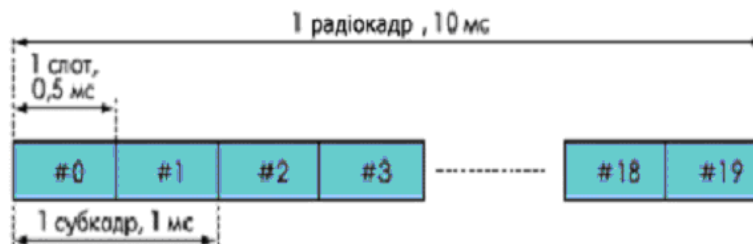


Рис. 1.6. Структура кадру LTE при частотному дуплексуванні

Радіокадр типу 2 (рис. 1.7) призначений тільки для часового дуплексування. Він складається з двох полів тривалістю по 5 мс. Кожен напівкадр включає 5 субкадрів тривалістю 1 мс. Стандарт передбачає два цикли часового дуплексування – 5 і 10 мс. У першому випадку 1-й і 6-й субкадри ідентичні і містять службові поля DwPTS, UpPTS і захисний інтервал GP. При 10-мс циклі TDD 6-й субкадр використовується для передачі даних у низхідному каналі.

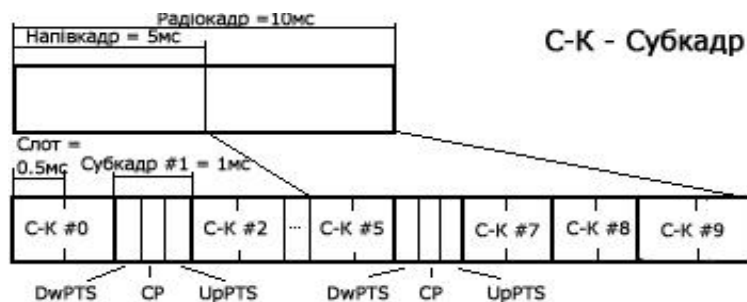


Рис. 1.7. Структура кадру LTE при часовому розділенні дуплексних каналів

Субкадри 0 і 5, а також поле DwPTS завжди відносяться до низхідного каналу, а субкадр 2 і поле UpPTS – до висхідного. Розподіл решти субкадрів визначається за табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Розподілення субкадрів у радіо кадрі типу 2, D – низхідний канал,  
U – висхідний канал, S – субкадр зі спеціальними полями.

Конфігурація	Цикл TDD, мс	Номер субкадру									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Можливо кілька варіантів тривалості полів DwPTS, UpPTS і GP, але їх сума завжди дорівнює 1 мс. Як уже зазначалося, в LTE використовується модуляція OFDM, добре досліджена в системах DVB, Wi-Fi і Wi-MAX. Нагадаємо, що технологія OFDM передбачає передачу широкосмугового сигналу за допомогою незалежної модуляції вузькосмугових піднесучих виду:  $S_k(t) = ak \cdot \sin[2\pi(f_0 k \Delta f)]$  розташованих з певним кроком по частоті  $\Delta f$ . Один OFDM-символ містить набір модульованих піднесучих. У часовій області OFDM-символ включає поле даних (корисна інформація) і так званий циклічний префікс CP (Cyclic Prefix) – повторно передається фрагмент кінця попереднього символу. Призначення префікса – боротьба з міжсимвольною інтерференцією у приймачу внаслідок багатопроменевого розповсюдження сигналу. Відбитий сигнал, що приходить з затримкою, потрапляє в зону префікса і не накладається на корисний сигнал. У LTE прийнятий стандартний крок між піднесучими  $\Delta f = 15$  кГц, що відповідає тривалості OFDM-символу 66,7 мкс. Кожному абонентському пристрою (АП) в кожному слоті призначається певний діапазон каналних ресурсів у частотно часовій області (рис. 1.8) – ресурсна сітка.

Комірка ресурсної сітки – так званий ресурсний елемент – відповідає одній піднесучій в частотній області і одному OFDM–символу в тимчасовій.

Ресурсні елементи утворюють ресурсний блок – мінімальну інформаційну одиницю в каналі. Ресурсний блок займає 12 піднесучих (тобто 180 кГц) і 7 або 6 OFDM–символів, в залежності від типу циклічного префікса (табл. 1.2) – так, щоб загальна тривалість слота становила 0,5 мс.

Таблиця 1.2

Фізичний префікс у низхідному каналі при  $\Delta f=15\text{кГц}$ 

Тип префіксу	Довжина префіксу		Довжина слоту OFDM-символів
	Ts	мкс	
Стандартний			7
Перший символ слоту	160	5,2	
Інші 6 символів слоту	144	4,7	
Розширений	512	16,7	6

Число ресурсних блоків NRБ у ресурсній сітці залежить від ширини смуги каналу і становить від 6 до 110 (ширина частотних смуг висхідного / низхідного каналів у LTE – від 1,4 до 20 МГц). Ресурсний блок – це мінімальний ресурсний елемент, що виділяється абонентському пристрою планувальником базової станції. Про розподіл ресурсів у кожному слоті базова станція повідомляє в спеціальному керуючому каналі.

Загальна тривалість префікса 4,7 мкс дозволяє боротися з затримкою відбитого сигналу, що пройшов шлях на 1,4 км більше, ніж прямо поширюваний сигнал. Для систем стільникового зв'язку в умовах міста цього звичайно цілком достатньо. Якщо ж ні – використовується розширений префікс, що забезпечує придушення міжсимвольної інтерференції в осередках радіусом до 120 км. Такі величезні осередки корисні для різного роду широкомовних сервісів (MBMS), таких як мобільне телевізійне мовлення. Для цих же режимів (тільки в низхідному каналі) передбачена особлива структура слота, з кроком між піднесучими 7,5 Гц і циклічним префіксом 33,4 мкс. У слоті при цьому всього три OFDM–символи.

Особливий випадок широкомовного сервісу представляє режим MBSFN (мультимедійний широкомовний сервіс для одночастотної мережі). У цьому режимі кілька БС в певній MBSFN-зоні одночасно і синхронно транслюють загальний широкомовний сигнал.

Кожна піднесуча модулюється за допомогою 4-, 16- і 64-позиційної квадратурної фазово-амплітудної модуляції (QPSK, 16-QAM або 64-QAM). Відповідно, один символ на одній піднесучій містить 2, 4 або 6 біт. При стандартному префіксі символна швидкість складе 14000 символів / с, що відповідає, при FDD-дуплексі, агрегатній швидкості від 28 до 84 кбіт/с на піднесучій. Сигнал із смугою 20 МГц містить 100 ресурсних блоків або 1200 піднесучих, що дає загальну агрегатну швидкість в каналі від 33,6 до 100,8 Мбіт/с.

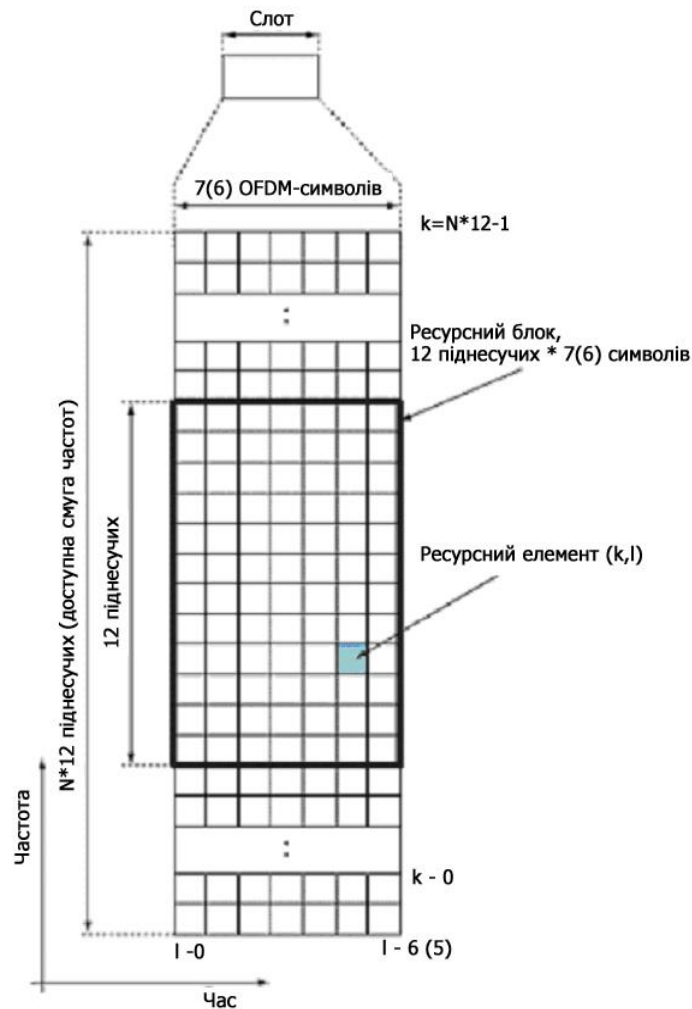


Рис. 1.8. Ресурсна сітка LTE при стандартному кроці піднесучих  $\Delta f = 15$  кГц

Специфікації LTE визначають декілька фіксованих значень для ширини висхідного і низхідного каналу між БС і АС (у мережах E-UTRA) (табл. 3). Оскільки в OFDM використовується швидке перетворення Фур'є (ШПФ), число формальних піднесучих для спрощення процедур цифрової обробки сигналу має бути кратним  $N = 2n$  (тобто 128, 256, ..., 2048).

Таблиця 1.3

Параметри каналу передачі між БС і АП

Ширина каналу, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число ресурсних блоків	6	15	25	50	75	100
Число піднесучих	72	180	300	600	900	1200
Число номінальних несучих для ШПФ	128	256	512	1024	1536	2048
Тактова частота, МГц	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

При цьому частота вибірок повинна становити  $F_s = \Delta f \cdot N$ . При заданих в стандарті значеннях вона виявляється кратною 3,84 МГц – стандартній частоті вибірок в технології WCDMA. Це дуже зручно для створення багатомодових пристроїв, що підтримують як WCDMA, так і LTE. Зрозуміло, що при формуванні сигналу амплітуди "зайвих" піднесучих (включаючи центральну піднесучу каналу) вважаються рівними нулю.

### 1.5 Спектр послуг, що надаються мережами LTE

Послуги мереж LTE мають ширший спектр в порівнянні з мережами попередніх поколінь. Перш за все це пов'язано з високою пропускнуою здатністю мереж і підвищеною швидкістю передачі інформації. Також важливу роль відіграє перехід на концепцію «все через IP».

Основні послуги мереж LTE є:

- передача мови (пакетна);

- робота з E-Mail;
- передача мультимедійних повідомлень;
- мультимедійне мовлення, яке включає в себе потокові послуги, послуги із завантаження файлів, телевізійні послуги та ін.;
- VoIP (відео конференції та відео мовлення);
- онлайн-ігри.

## 2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ LTE

### 2.1 Заходи для підвищення надійності систем LTE

Розглянуті в попередніх розділах питання дозволяють виділити основні напрямки робіт з підвищення надійності систем LTE. При цьому можна виділити чотири групи заходів щодо підвищення надійності систем LTE при їхньому проектуванні:

- системні;
- структурні (схемні);
- конструктивні;
- експлуатаційні.

До системних методів відносяться організаційно-економічні заходи щодо стимулювання підвищення надійності і ряд технічних заходів. Одним із шляхів стимулювання підвищення надійності є включення у вартість системи витрат на гарантійні ремонт і обслуговування. При цьому розроблювач враховує, що при підвищенні надійності зменшуються витрати на гарантійний ремонт і обслуговування, тобто прибуток стає найбільшим при певному значенні показника надійності, який перевищує максимально допустимий рівень. У цьому випадку розробники та виготовлювачі систем LTE прагнуть дізнатись цей рівень і досягти його. Отже, стимулюються точні оцінки надійності та її підвищення. Іншим шляхом стимулювання підвищення надійності є планування витрат на весь термін служби проекрованої системи.

Технічні заходи щодо оформлення показників надійності проєктованих систем необхідні при будь-якій системі взаємин замовника і розробника. До технічних заходів відносяться облік зовнішніх впливів на проєктовані технічні засоби:

- а) робочі (важкий ударно-вібраційний режим, температурний режим, агресивне хімічне середовище, ядерна реакція);
- б) кліматичні (температура, вологість, домішки в повітрі);



в) біологічні (грибок або цвіль, комахи, гризуни).

Структурні (схемні) методи поєднують заходи щодо підвищення надійності систем шляхом вдосконалювання принципів їхньої будови.

Ці методи відрізняються великою розмаїтністю й інтенсивно розвиваються. До них відносяться, наприклад, варіанти будови систем, нечутливих до появи відмов, за рахунок введення надлишкових апаратурних і програмних засобів. При цьому можуть використовуватися і апаратні (наприклад, резервування) і програмні (наприклад, порівняння результатів надлишкових обчислень) засоби. У ряді випадків також можуть застосовуватися й апаратно-програмні засоби виявлення відмов елементів і відновлення системи.

До конструктивних методів відносяться заходи щодо створення та вибору елементів, вузлів або блоків системи, створення сприятливих режимів роботи, вживання заходів щодо полегшення ремонтів і т. ін. При цьому звичайно виявляються більш надійними ті елементи, вузли або блоки яких не мають деталей, тонких обмоток, ниток розжарення тощо.

Час усунення відмови можна істотно зменшити шляхом побудови системи за блоко-вузловим способом. При цьому всі компоненти розбиваються на окремі функціонально закінчені блоки, що в електронних системах з'єднуються між собою кабелями, а в механічних – зв'язуються кінематично. Блоки у свою чергу розбиваються на функціонально закінчені вузли, виконувані у вигляді легкознімних конструкцій. При такій будові відновлення полягає в заміні несправних блоків або вузлів, що значно прискорює процес введення системи у роботу. Здійснення блочно-вузлових конструкцій тісно пов'язано з уніфікацією елементів і систем, що виконується на основі відбору найбільш надійних варіантів. При цьому не тільки підвищується надійність систем LTE, але і знижується їх вартість, і спрощується виготовлення. У ряді випадків вдається створити дуже складні системи з елементів двох-трьох типів.

Планування експлуатаційних заходів на стадії проектування систем LTE полягає в розробці системи експлуатаційного забезпечення. Проектування системи при цьому повинно здійснюватися відповідно до номенклатури робіт з

технічного обслуговування. Наприклад, для планування періодичного регулювання визначних параметрів систем LTE необхідно передбачити можливість контролю і прогнозування значень цих параметрів.

Як уже згадувалось, структурні (схемні) і конструктивні методи підвищення надійності безумовно є основними для забезпечення відповідного рівня надійності розроблюваних систем LTE.

Розглядаючи ці методи необхідно підкреслити наступне.

У першу чергу надійність систем LTE досягається за рахунок використання високонадійних елементів. Впровадження напівпровідникових приладів замість електровакуумних дозволило, як відомо, підвищити надійність технічних засобів більш ніж на порядок за рахунок того, що фізичні процеси в напівпровідникових приладах забезпечують їх функціонування при менших живильних напругах, розсіювальних потужностях і, відповідно, температурах.

Подальший розвиток елементної бази полягав в створенні інтегральних мікросхем (ІМС). За останні 20–30 років ІМС розвивалися бурхливими темпами і послідовно були створені інтегральні схеми малого, середнього і великого (ВІС) ступеня інтеграції. В даний час створюються дуже великі ІМС, що містять тисячі, десятки тисяч навіть сотні тисяч елементів. Технологія ІМС безупинно вдосконалювалася, і це привело до того, що, незважаючи на різке збільшення числа елементів на одному кристалі, надійність окремого кристала залишалася такою ж, причому інтенсивність відмов схеми, розміщеної на кристалі, складала приблизно  $10^{-6} - 10^{-8}$  год.

Подальший розвиток елементів автоматики і обчислювальної техніки буде спрямований шляхом підвищення ступеня інтеграції в ІМС, використання оптичних елементів, а також впровадження нових типів друкованих плат, у тому числі багат шарових плат, контактних з'єднань тощо.

При проектуванні систем LTE необхідно особливу увагу приділяти підбору стандартизованих і уніфікованих елементів, використання яких значно підвищує надійність, тому що ці елементи відпрацьовані найкращим чином в схемному, конструктивному і технологічному відношенні.

Другим шляхом підвищення надійності є забезпечення оптимальних режимів роботи елементів і, насамперед, електричних режимів. Досвід експлуатації елементів показує, що оптимальне значення коефіцієнта навантаження, при яких інтенсивність раптових відмов найменша, знаходиться в межах 0,2 – 0,4. Крім того, встановлено, що при цих же значеннях коефіцієнта навантаження параметри елементів повільніше відхиляються від номінальних значень. При цьому велике значення має вибір коефіцієнта навантаження за тепловим, механічним і радіаційним режимом. Зазначені режими значною мірою залежать від конструкції пристроїв, а також від прийнятих технічних рішень. Природно, що це повинно враховуватися в процесі проектування.

Одним з найбільш ефективних засобів підвищення надійності є резервування, тобто введення надлишку. Досвід використання різних методів резервування в системах зв'язку показує, що постійне резервування може використовуватися до окремих елементів або схем. Для складних систем звичайно застосовується резервування заміщенням, що також використовується і для окремих пристроїв. Часто, наприклад, у системах автоматичного управління використовуються мажоритарне резервування і самокоригувальні коди.

Тимчасове резервування широко використовується в засобах обчислювальної техніки. Його конкретна реалізація, наприклад, здійснюється способом подвійного – потрійного підрахунку. Наприклад, певна задача розв'язується двічі, і порівнюються отримані результати. Збіг результатів означає, що відмова і збої відсутні і можна переходити до розв'язання наступних задач. У випадку розбіжності результатів, що означає відмову або збій у роботі пристрою, потрібно повторити розв'язання.

Тимчасове резервування використовується також при тестовому контролі, тобто періодичному розв'язанні спеціальних задач з відомими відповідями. Очевидно, що в цьому випадку на підставі порівняння отриманого результату з відомим можна судити про роботоздатність пристрою. Причому, чим більше часу виділяється на тестовий контроль і чим частіше він проводиться, тим з більшою вірогідністю можна судити про роботоздатність контрольованого пристрою.

Одним із спеціальних методів підвищення надійності є використання самонастроюваних і самоорганізуючих систем.

Особливо важливим є принцип самоорганізації. Для його реалізації створюються, наприклад, такі системи автоматичного керування, що здатні змінювати свою структуру в процесі функціонування.

Як уже згадувалось, ефективним методом підвищення надійності є відновлення несправних систем. Тут основним питанням є виявлення факту відмови і пошук елементів, що відмовили. Така задача може бути вирішена за допомогою діагностування систем LTE, наприклад, при використанні автоматизованих систем контролю, де як основна центральна ланка застосовується ЕОМ, що забезпечує перевірку великого числа контрольних точок протягом невеликого проміжку часу.

Свої особливості при цьому має діагностування засобів обчислювальної техніки. Тут широке застосування знаходять методи діагностування, засновані на використанні різних логічних співвідношень, інформаційного та алгоритмічного резерву.

В даний час у засобах обчислювальної техніки все ширше використовується сигнатурний аналіз, що заснований на стиску інформації і поданні її масивів у вигляді їхніх спеціальних образів – сигнатур.

Аналіз сигнатур при обробці різних масивів інформації дозволяє зробити висновки про працездатність засобів. Крім того, час відновлення значно скорочується за рахунок забезпечення доступності всіх вузлів системи для огляду, тобто визначається ремонтпридатність розроблювальних конструкцій.

Зокрема, наприклад, у засобах обчислювальної техніки прийнято чотири конструктивних рівні:

- ІМС і радіоелементи;
- типові елементи заміни (ТЕЗ), що являють собою друковані плати з розміщеними на них ІМС;
- рами, у яких розміщуються ТЕЗ;
- шафи, у яких кріпляться рами.

При такій конструкції засобів заміна елементів, що відмовили, здійснюється шляхом заміни ТЕЗ, а несправні ТЕЗ надходять у ремонт.

Велике значення для забезпечення надійності має якість виготовлення компонентів, що визначається технологічною дисципліною, організацією контролю на всіх стадіях проектування, виробництва, проведення випробувань та якістю комплектуючих і матеріалів. Тут також має велике значення якість експлуатації, прийнята система технічного обслуговування, підготовленість обслуговуючого персоналу і ряд інших факторів.

Аналіз надійності ТЗ показує, що приблизно 40–45% усіх відмов виникає в апаратурі через помилки на етапі проектування, 20% – від помилок, допущених при виробництві, 30% – від неправильної експлуатації, 5–10% – від природного зносу і старіння.

Таким чином, існує досить велика кількість напрямків підвищення надійності систем LTE і їхніх складових частин.

Однак із усіх перерахованих вище напрямків і шляхів необхідно підкреслити важливість, а також певну специфіку методів резервування, які розглянемо більш детально.

## **2.2 Основні поняття, визначення і класифікація методів резервованих систем зв'язку**

Резервуванням (*redundancy*) називають метод підвищення надійності системи за рахунок введення надлишку. Під *надлишком* розуміють додаткові засоби і можливості окрім мінімально необхідних для виконання системи заданих функцій. Таким чином, задачею введення надлишку є забезпечення нормального функціонування системи після виникнення відмов у її елементах.

Відповідно до ГОСТ 13377-75 розрізняють *три основних види резервування*:

- структурне;
- інформаційне;
- тимчасове.

Структурне резервування (або апаратне) (structural redundancy) передбачає використання надлишкових елементів системи. Суть такого виду резервування полягає в тому, що в мінімально необхідний варіант технічного засобу, елементи якого називають основними, вводяться додаткові елементи, вузли, пристрої або навіть замість одного елемента передбачається використання декількох ідентичних. При цьому надлишкові резервні структурні елементи, вузли, пристрої тощо, призначені для виконання робочих функцій при відмові відповідних основних елементів, вузлів і пристроїв.

Інформаційне резервування (information redundancy) передбачає використання надлишкової інформації. Найпростішим прикладом реалізації такого виду резервування є багаторазова передача одного й того ж повідомлення по каналу зв'язку. Як інший приклад можна навести використання спеціальних кодів, що виявляли до виправлення помилки, (коди з повторенням і інверсією, циклічний код, код Хеммінга і т. ін.), які з'являються в результаті збоїв і відмов апаратури. Тут варто відмітити, що використання інформаційного резервування спричиняє також необхідність введення надлишкових елементів.

Тимчасове резервування (temporal redundancy) передбачає використання надлишкового (резервного) часу для відновлення технічних характеристик. У випадку застосування цього виду резервування передбачається можливість поновлення функціонування системи після того, як воно було перервано в результаті відмови, шляхом його відновлення. При цьому також передбачається, що на виконання необхідної роботи приділяється час, свідомо більший мінімально необхідного.

Перераховані види резервування можуть бути застосовані або до системи в цілому, або до окремих їхніх елементів чи до груп таких елементів. У першому випадку резервування називається *загальним*, у другому – *роздільним*.

Найбільш широкого поширення в даний час одержало *структурне резервування*. Системи зв'язку із використанням цього виду резервування можуть класифікуватися за різними ознаках, основними з яких є:

- реакція системи на появу відмови;

- режим роботи резервних елементів;
- вигляд схеми резервування;
- спосіб включення резервних елементів;
- ступінь надмірності.

У першу чергу різні резервовані системи відрізняються одна від одної реакцією на появу відмов, тобто своїми *«динамічними» властивостями*.

З цього погляду розрізняють *два методи резервування: активне і пасивне*.

В першому випадку структура системи така, що з появою відмови вона перебудовується і відбувається відновлення роботоздатності, тобто відбувається ніби її «саморемонт». При цьому система активно реагує на появу відмови. Звідси і назва методу резервування.

При пасивному резервуванні системи відмова одного або навіть декількох елементів не впливає на його роботу. Елементи з'єднані постійно і перебудова структури не відбувається. Система ніби пасивно чинить опір появі відмов елементів.

Як при активному, так і при пасивному методах резервування велике значення мають *режими роботи резерву*. Однак, якщо в першому випадку для розрахунку важливо знати навантаження на резервні елементи до появи відмови, то в другому випадку – після появи відмови.

За цією класифікаційною ознакою для активного резервування розрізняють *навантажений, полегшений і ненавантажений резерви*.

Навантажений резерв (loaded reserve) – резервний елемент знаходиться в тому ж режимі, що й основний. При цьому приймається, що характеристики надійності резервних елементів у період їхнього перебування як резервних і в період їхнього використання замість основних після відмови останніх залишаються незмінними. Полегшений резерв (reduced reserve) – резервний елемент знаходиться в менш навантаженому режимі, ніж основний. При цьому приймається, що характеристики надійності резервних елементів у період їхнього перебування як резервних вища, ніж у період їхнього використання замість основних після їх відмови.

Ненавантажений резерв (unloaded reserve) – резервний елемент практично не несе навантаження до початку виконання ним функцій основного елемента. При цьому приймається, що такий резервний елемент, знаходячись у резерві, відмовляти не повинен, тобто має в цей період «ідеальну» надійність. У період же використання резервного елемента замість основного після відмови останнього надійність резервного елемента стає рівною надійності основного.

При відмові хоча б одного із елементів системи з пасивним резервуванням може змінюватися навантаження, що сприймається елементами, які залишилися роботоздатними. Саме тому, у системі із пасивним резервуванням велике значення мають умови роботи елементів після появи відмови, тобто стабільність навантаження на елементи, що залишилися роботоздатними. За цією ознакою розрізняють *три види систем із пасивним резервуванням*:

*з незмінним навантаженням* (при відмові одного або декількох елементів не змінюється навантаження на елементи, що залишилися роботоздатними);

*з перерозподілом навантаження* (при відмові хоча б одного елемента змінюється, як правило в бік збільшення, навантаження на елементи, які залишилися роботоздатними);

*з навантажуванним резервуванням* (резервуванням за навантаженням), у яких при відмові хоча б одного елемента технічний засіб виходить з ладу, але інтенсивність відмов елементів зменшена за рахунок того, що навантаження, яке повинен сприймати один елемент, сприймається декількома елементами.

При пасивному резервуванні найбільший вигравш у надійності досягається в системах із незмінним навантаженням, найменший – з резервуванням за навантаженням. Тут варто підкреслити, що в системі з активним резервуванням відбувається порушення роботи об'єкта на час з моменту відмови основного елемента до моменту включення резервного. Таким чином, якщо така перерва в роботі системи принципово неприпустима, то метод пасивного резервування є єдиною можливістю. І це один із найбільш суттєвих моментів, на який розроблювач системи повинен звернути свою увагу при виборі між активним і пасивним методами резервування.



Обидва розглянутих вище методи реалізуються за *різними схемами резервування*. Принципового розходження між видами схем резерву немає, однак при цьому все-таки розрізняють резервування *загальне, автономне, окреме, одиничне, внутрішньоелементне, ковзаюче та з вибірковими схемами*.

Загальне резервування (whole system redundancy) полягає в резервуванні системи в цілому і, завдяки своїй простоті, цей спосіб є найбільш відомим (рис. 3.1, а).

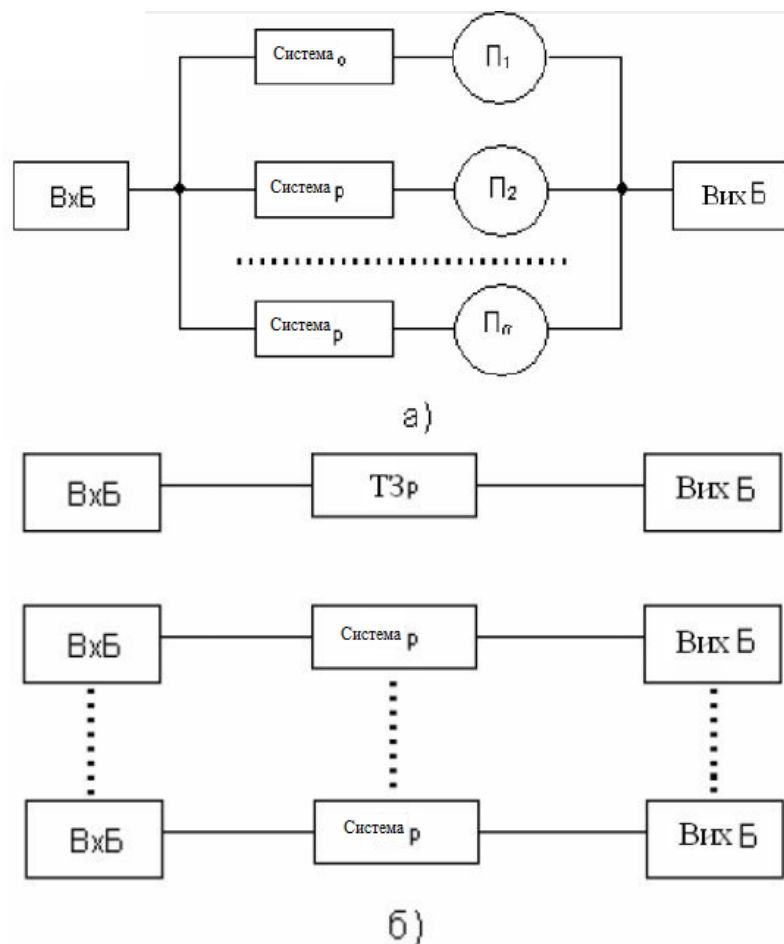


Рис. 3.1 – Структури загального резервування: а) – схема загального активного резервування; б) – схема автономного резервування;

ВхБ – вхідний блок; Система<sub>0</sub> – основні елементи системи; Система<sub>р</sub> – резервні елементи; П<sub>n</sub> – перемикачі; ВихБ – вихідний блок

Автономне резервування (standalone redundancy) – один з варіантів загального. Воно полягає в застосуванні декількох незалежних об'єктів, що виконують одну й ту ж саму задачу. Кожний з цих об'єктів має свій вхід і вихід і

незалежні джерела живлення. Прикладом об'єктів з автономним резервуванням може служити сукупність засобів вимірювання, що виконують ті самі вимірювання, при цьому кожен засіб має свої вхідні датчики, перетворювачі та джерела живлення. Автономне резервування, як правило, застосовується при проведенні відповідальних експериментів у системах відповідального призначення. При цьому автономне резервування (рис. 3.1, б) завжди є пасивним.

Роздільне резервування (*segregated redundancy*) полягає в резервуванні системи за окремими елементами або їхніми групами (ділянками). Системи з активним загальним резервуванням можна вважати частковим випадком систем із окремими резервуванням при одній ділянці резервування.

Одиничне резервування (*single redundancy*) полягає в заміні елементів системи елементарними резервованими схемами (зазвичай пасивними). У складних системах дуже важко знайти раціональну схему окремого резервування. Крім того, схеми резервування різних систем щоразу доводиться проектувати знову, що вимагає іноді досить значних матеріальних затрат і часу. Тому одиничне резервування, при якому найпростіші схеми резерву типових елементів можуть виконуватися у вигляді готових блоків (комірок), часто виявляється зручним через простоту побудови складних резервованих засобів. При одиничному резервуванні не потрібно складати спеціальних схем, а можна просто ставити на місце кожного елемента у функціональній схемі його аналог – типову резервовану комірку.

Внутрішньоелементне резервування (*inside the element redundancy*) полягає в резервуванні внутрішніх зв'язків елемента. Якщо при одиничному резервуванні використовуються схеми з існуючих елементів (комірок), то застосування внутрішньоелементного резервування пов'язано із зміною конструкції елемента.

Змінне резервування (*variables redundancy*) застосовується в системах із великою кількістю однакових елементів. Воно полягає в тому, що використовується невелике число резервних елементів, що можуть підключатися замість будь-якого з несправних елементів основного засобу.

При резервуванні з вибірковою схемою (*redundancy of sampling scheme*) порівнюються сигнали на виході непарного числа паралельно працюючих засобів і в зовнішнє коло видається сигнал, наявний на виході більшості засобів. Вибіркові схеми застосовуються в тих випадках, коли важко установити, відмовили чи ні окремі засоби.

За способом включення резервних елементів усі розглянуті вище схеми резервування поділяються на *схеми з постійно включеним резервом (постійне резервування)* і *схеми резервування заміщенням*.

Постійне резервування (*continuous redundancy*) – це таке резервування, при якому резервні елементи беруть участь у функціонуванні системи нарівні з основними. При цьому основні і резервні елементи можуть мати загальний вхід і загальний вихід, зокрема, гальванічний зв'язок за входом і виходом, а можуть бути і автономними, тобто не мати такого зв'язку. При постійному резервуванні у випадку відмови основного елемента не потрібно спеціальних перемикальних пристроїв, що вводять у дію резервний елемент, оскільки він вводиться в дію одночасно з основним.

Резервування заміщенням (*standby redundancy*) – це таке резервування, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного. При використанні цього виду резервування необхідні контролювальні і перемикальні пристрої для виявлення факту відмови основного елемента та переключення з основного на резервний.

Ще однією класифікаційною ознакою резервованих систем є *ступінь надмірності*, що характеризується *кратністю резервування*.

Кратність резервування (*redundancy ratio*) – це відношення кількості резервних елементів до кількості резервованих або основних елементів системи. Розрізняють *резервування з цілою і дробовою кратністю*. Резервування з цілою кратністю має місце, коли один основний елемент резервується одним і більше резервними елементами. Резервування з дробовою кратністю має місце, коли два і більше однотипних елементи резервуються одним і більше резервними елементами. Найбільш розповсюдженим варіантом резервування з дробовою

кратністю є такий, коли кількість основних елементів перевищує кількість резервних. Резервування, кратність якого дорівнює одиниці, називається дублюванням (duplication).

Слід зазначити, що надійність системи значною мірою визначається застосуванням резервування з відновленням або без нього. Резервування, при якому роботоздатність будь-якого основного і резервного елементів системи у випадку виникнення відмов підлягає відновленню в процесі експлуатації засобу, називається резервуванням з відновленням. У іншому випадку має місце резервування без відновлення.

### **2.3 Розрахунок надійності систем при структурному резервуванні**

При проектуванні систем LTE розроблювач реалізує в апаратурі можливість виконання проектного засобу набору функцій, передбачених технічним завданням. При цьому очевидно, що реалізація цих функцій обмежена значеннями основних критеріїв (точність, продуктивність, надійність, вартість і т.д., закладених у технічному завданні). Таким чином, на кожному етапі проектування системи необхідний розрахунок значень цих критеріїв на предмет їхньої відповідності заданим значенням у технічному завданні.

Зокрема, для розрахунку надійності проектовних систем при використанні структурного резервування як правило складається *розрахунково-логічна схема резервованого засобу*. У більшості випадків елементи ТЗ у цій схемі мають паралельно-послідовне з'єднання. В колі послідовно з'єднаних елементів відмова хоча б одного з них призводить до виходу з ладу всього кола. У резервованій групі паралельно з'єднаних елементів допускається вихід з ладу певного числа елементів (залежно від кратності резервування) без порушення функціонування групи в цілому. Прикладом розрахунково-логічної схеми можуть служити структури, що зображені на рис. 3.1.

Перед тим як переходити до розгляду методів розрахунку показників надійності (ПН) систем із структурним резервуванням необхідно зробити *ряд зауважень*.

Розрахунок надійності для схем загального резервування (рис. 3.1, а) можна здійснювати за розрахунково-логічною схемою одного резервованого елемента шляхом заміни послідовно з'єднаних елементів (блоків, засобів, вузлів) еквівалентними елементами, ПН яких знаходяться за формулами:

$$P(t) = \prod_{i=1}^K P_i(t),$$

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^K \lambda_i(t),$$

де  $P_i(t)$ ,  $\lambda_i(t)$  – відповідно, ймовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов  $i$ -го елемента;  $K$  – кількість послідовно з'єднаних елементів.

Для одержання ПН системи в цілому при роздільному резервуванні досить визначити показники надійності резервованого елемента (блока, засобу, вузла). У цьому випадку ПН усієї системи одержують шляхом застосування розрахункових формул для основного з'єднання, у якому як елементи виступають резервовані групи елементів.

У тих же випадках, коли фактичний розподіл часу до відмови відрізняється від експоненційного закону, його використання дає звичайно занижені оцінки, тобто нижні границі надійності апаратури.

Надійність резервованих систем, особливо відновлюваних, значною мірою залежить від надійності апаратури вбудованого контролю. Дійсно, апаратура контролю призначена для визначення факту відмови основної апаратури і видачі команди пристроєві переключення на перехід до резервної апаратури. Крім того, апаратура контролю служить також для локалізації місця несправності. При розрахунках надійності резервування системи надійність апаратури вбудованого контролю може бути приблизно вирахована шляхом включення в розрахунково-логічну схему послідовно з резервованою групою елемента, що відповідає апаратурі вбудованого контролю.

### 3 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНІСТЬ І ЖИВУЧІСТЬ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE

Методи розрахунку показників надійності і живучості мереж і систем зв'язку стандарту LTE, як і будь-якої іншої складної системи, діляться на дві самостійних підмножини: точних і наближених методів. Практичне застосування того чи іншого методу визначається постановкою завдання, які є парком обчислювальної техніки, ступенем точності вихідних ймовірностей  $p(e_i)$  справності елементів і розмірністю оцінюваної системи (мережі) зв'язку. Переваги і недоліки будь-якого методу розглядаються в кожному конкретному випадку. Загальна схема розподілу методів розрахунку показників надійності і живучості систем (мереж) зв'язку зображена на рис. 3.1. Деякі точні (аналітичні) методи розроблені тільки для заданих конкретних конфігурацій систем зв'язку. Як видно з рис. 3.1, безліч аналітичних методів містить вісім підмножин, що відрізняються одна від одної використанням математичним апаратом. Велике число аналітичних методів розрахунку характеризує спроби інженерів оцінити надійність і живучість системи зв'язку без будь-якої похибки при практично прийнятних витратах обчислювальних ресурсів або кошторису.

По суті основною метою при розробці нового аналітичного методу ставиться зниження обсягу обчислень для отримання результату. Однак дуже висока розмірність оцінюваних мереж зв'язку обмежує можливості точних методів, так як, починаючи з деякої межі, витрати обчислювальних ресурсів зростають приблизно експоненціально при будь-якому методі. Проте межа, з якої починається експоненціальне зростання витрат обчислювальних ресурсів, у кожного методу своя. У міру підвищення можливостей точних методів ускладнюються і методики розрахунку, а отже, і алгоритми. Це призводить до подовження коду програмного забезпечення, збільшення часу налагодження, настройки і зниження надійності їх роботи.

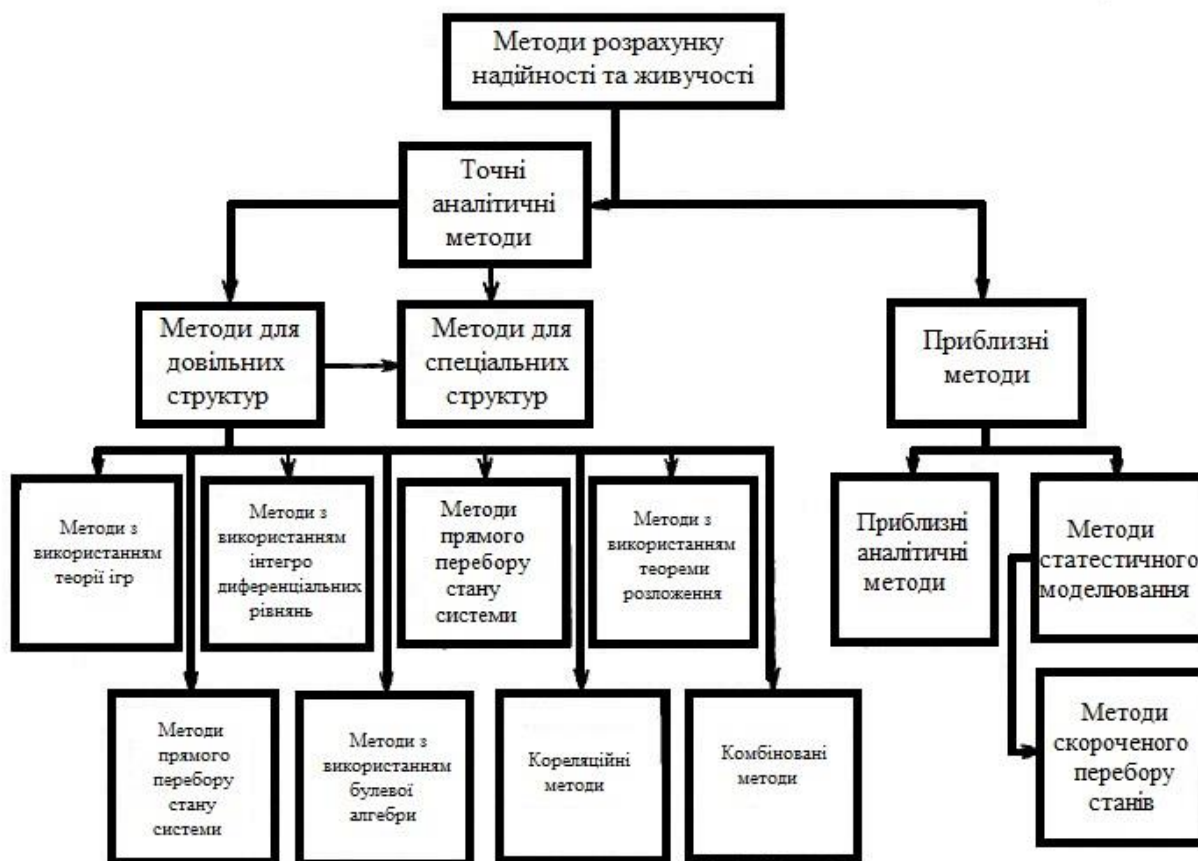


Рис. 3.1. Схема поділу методів розрахунку надійності і живучості систем зв'язку

Будь-який з точних методів неприйнятний при досить великій розмірності оцінюваної мережі (розмірність оцінюється числом елементів підсистем, систем тощо), тому часто оцінка надійності і живучості проводиться наближеними методами. Нариклад, методи оцінки надійності та живучості систем зв'язку, в яких використовуються інтегродиференціальні рівняння і теорія ігор, взагалі не знайшли практичного застосування перш за все через їх складність.

Наближені методи також діляться на дві підмножини: наближені аналітичні методи і методи статистичного моделювання. Застосування будь-якого з наближених методів неминуче призводить до деяких погрешностей оцінки.

Деякими з аналітичних методів оцінюються наближені верхні і нижні межі значень показників, за якими їх можна усереднити. Такі методи для невеликого числа мережевих елементів можуть використовуватися для ручного розрахунку.

Недоліком деяких з них є труднощі визначення не тільки значення, але і знаку похибки.

Похибка задається і при використанні методів статистичного моделювання, в основу яких покладено перебір станів системи. І в тому, і в іншому випадках похибка визначається сумарною ймовірністю виникнення подій, які при заданих вихідних даних вважаються практично нездійсненними. Наприклад, для системи зв'язку з  $N$  елементів, в якій випадкове число відмовивших елементів розподілено нормально з середнім  $\bar{m} = 0,01N$  і середньоквадратичним ухиленням  $\sigma = 0,01N$ , практично нездійсненим можна вважати подію, коли в системі одночасно в стані відмови знаходиться  $k \geq 0,03N$  елементів.

Похибка розрахунків при використанні методів статистичного моделювання визначається числом реалізацій випадкового процесу відмов елементів системи. Очевидно, що велика кількість елементів системи вимагає застосування такого датчика випадкових чисел (ДВЧ), який має досить великий період виродження. Цією властивістю володіють ДВЧ, що вимагають значних додаткових витрат обчислювальних ресурсів. Тому, як правило, при високій розмірності мережі і великому числі дестабілізуючих факторів на виконання однієї реалізації потрібно чимало часу роботи ЕОМ.

При використанні наближених методів необхідно, щоб виконувалося найважливіше правило: похибка вихідних даних не повинна перевищувати похибка методу розрахунку.

### 3.1 Види резервування об'єктів

Резервуванням називають метод підвищення надійності об'єкта введенням надмірності. До резервування іноді відносять завдання з пошуку раціональних способів організації технічного обслуговування з урахуванням запасу (резерву) елементів. Загальна схема такого завдання наведена на рис. 3.2. Елементи умовно зображені кружками. При відмові встановленого в працюючій системі елемента



він направляється в ремонт, а на його місце встановлюється відповідний елемент з резерву і т. д.

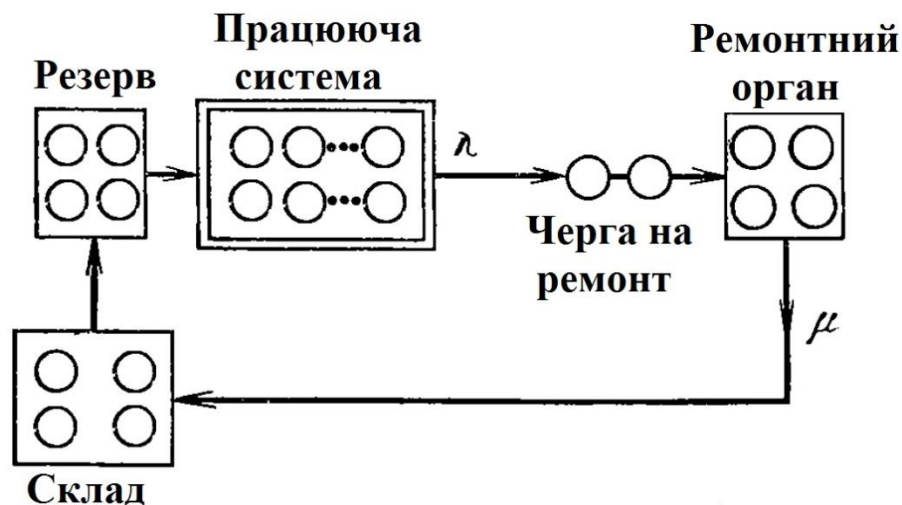


Рис. 3.2 Схема технічного обслуговування

Різні резервовані об'єкти відрізняються один від одного в першу чергу реакцією на появу відмови, тобто, динамічними властивостями. З цієї точки зору можна розрізнити два шляхи створення резервованих об'єктів - два методи резервування.

При одному з них структура об'єкта така, що при появі відмови вона перебудовується і об'єкт відновлює свою працездатність, тобто відбувається саморемонт об'єкта. При цьому об'єкт активно реагує на появу відмови, в силу чого даний метод буде надалі називатися активним резервуванням.

Окремим випадком активного резервування є резервування заміщенням, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного елемента.

В об'єктах з активним резервуванням велике значення мають умови роботи резерву (навантаження) до появи відмови, тобто перестроювання структури. Прийнято розрізнити:

- 1) навантажений резерв - резервні елементи знаходяться в тому ж режимі, що і основний елемент;
- 2) полегшений резерв - резервні елементи знаходяться в менш навантаженому режимі, ніж основний;

3) ненавантажений резерв - резервні елементи практично не несуть навантажень.

У системах управління мережі LTE зазвичай існують умови роботи першого виду, що пояснюється двома обставинами:

1) значну частину відмов становлять раптові відмови через важкі динамічні навантаження, однакових для резервних і основних елементів (вібрація, удари і т. д.);

2) час включення резервного елемента після відмови працюючого елемента при ненавантаженому резерві часто неприпустимо великий.

При пасивному резервуванні об'єкта відмова одного або навіть декількох елементів не впливає на його роботу. Елементи з'єднані постійно, перестроювання структури не відбувається. Об'єкт як би пасивно чинить опір появі відмов елементів. Якщо необхідно підкреслити, що резервні елементи беруть участь у функціонуванні об'єкта нарівні з основними, то таке резервування називають постійним.

Так як при пасивному резервуванні відмовивший елемент не відключається, то при створенні систем з пасивним резервуванням доводиться враховувати різні наслідки, до яких може привести відмова елемента.

При відмові хоча б одного з елементів системи з пасивним резервуванням може змінюватися навантаження, що сприймається елементами, що залишилися працездатними. Тому в об'єктах з пасивним резервуванням велике значення мають умови роботи елементів після появи відмови, тобто стабільність навантаження на елементи, що залишилися працездатними.

За цією ознакою можна розрізнити три види об'єктів з пасивним резервуванням:

1) системи з незмінним навантаженням, в яких при відмові одного або декількох елементів не змінюється навантаження на елементи, що залишилися працездатними;

2) системи з перерозподілом навантаження, в яких при відмові хоча б одного елемента змінюється (зазвичай збільшується) навантаження на елементи, що залишилися працездатними;

3) системи з резервуванням по навантаженню, в яких при відмові хоча б одного елемента система виходить з ладу, але інтенсивність відмов елементів зменшена за рахунок того, що навантаження, яке повинен був сприймати один елемент, сприймається кількома елементами.

При пасивному резервуванні найбільший вигреш в надійності досягається в системах з незмінним навантаженням, найменший - в системах з резервуванням по навантаженню.

У системах з активним резервуванням відбувається порушення роботи системи на час з моменту відмови робочого елемента (ділянки системи) до моменту включення резервного. Там, де така перерва в роботі неприпустима принципово, метод пасивного резервування є єдино можливим.

Обидва методи резервування можуть бути здійснені шляхом застосування різних видів резервних схем. Прийнято розрізняти резервування загальне, автономне, роздільне, одиничне, внутрішньоелементне, ковзне і з виборчими схемами. Принципової різниці між видами резервних схем немає.

Розглянемо коротко перераховані вище види резервованих схем.

Загальне резервування полягає в резервуванні об'єкта в цілому. Завдяки своїй простоті цей спосіб резервування найбільш відомий.

Автономне резервування є одним з варіантів загального. Воно полягає в застосуванні декількох незалежних об'єктів, які виконують одну й ту ж задачу. Кожен з цих об'єктів має свій вхід та вихід і зазвичай незалежні джерела живлення. Автономне резервування зазвичай застосовується при проведенні експериментів в системах відповідального (спеціального) призначення.

Якщо всі інші способи резервування можуть застосовуватися як при активному, так і при пасивному методах, то автономне резервування завжди є пасивним.

Різниця між загальним і автономним резервуванням пояснює рис. 3.3.

Роздільне резервування полягає в резервуванні об'єкта по окремих ділянках. Систему з активним загальним резервуванням можна вважати окремим випадком системи з роздільним резервуванням при одній ділянці резервування.

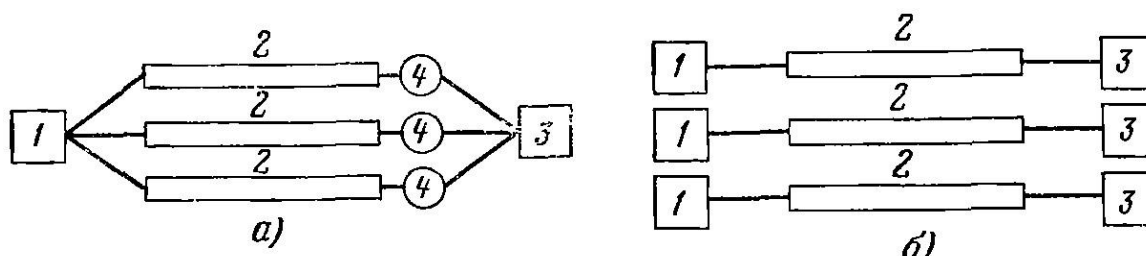


Рис. 3.3 Різні варіанти загального резервування: а – схема загального активного резервування; б – схема автономного резервування; 1 - вхідний елемент (блок); 2 – робочий ланцюг; 3 – вихідний елемент (блок); 4 – ланцюг перемикача

Одиничне резервування полягає в заміні елементів об'єкта елементарними резервованими схемами (зазвичай пасивними). У складних системах дуже важко знайти раціональну схему роздільного резервування. Крім того, схеми резервування різних об'єктів кожного разу доводиться проектувати заново, що вимагає іноді досить значних матеріальних витрат і часу. Тому можна очікувати, що одиничне резервування, при якому найпростіші резервовані схеми типових елементів можуть виконуватися у вигляді готових блоків (комірок), знайде широке застосування через простоту побудови складних резервованих систем. При одиничному резервування не потрібно складати спеціальних схем, а можна просто ставити на місце кожного елемента в функціональній схемі об'єкта його аналог - типову резервовану комірку.

Найбільш просто здійснюється одиничне пасивне резервування, при якому окремі елементи замінюються пасивними резервованими схемами.

Внутрішньоелементне резервування полягає в резервуванні внутрішніх зв'язків елемента (аж до молекулярних). Якщо при одиничному резервуванні використовуються схеми з існуючих елементів (комірок), то застосування

резервування даного типу пов'язано зі зміною конструкції елементів. Прикладом застосування внутрішньоелементного резервування може служити резервування реле [16].

Ковзне резервування застосовується в системах з однакових елементів. Воно полягає в тому, що використовується невелике число резервних елементів, які можуть підключатися взамін будь-якого з відмовивших елементів основної системи.

При резервуванні з виборчою схемою порівнюються сигнали на виході непарного числа паралельнопрацюючих пристроїв і в зовнішній ланцюг видається сигнал, наявний на виході більшості пристроїв. Виборчі схеми застосовуються в тих випадках, коли важко встановити, відмовили чи ні окремі пристрої.

Резервовані об'єкти доцільно розрізняти також по принципам обслуговування:

- без профілактики - працездатність основних і резервних елементів не контролюється, система використовується до моменту відмови через вихід з ладу всіх резервних елементів;
- з періодичною профілактикою - контроль і відновлення працездатності проводиться періодично; протягом часу (циклу) роботи системи не можна проводити профілактичні заходи;
- відновлювальні об'єкти - в процесі роботи об'єкта можна відновлювати елементи які відмовили.

Загальна схема класифікації резервованих систем наведена на рис. 3.4.

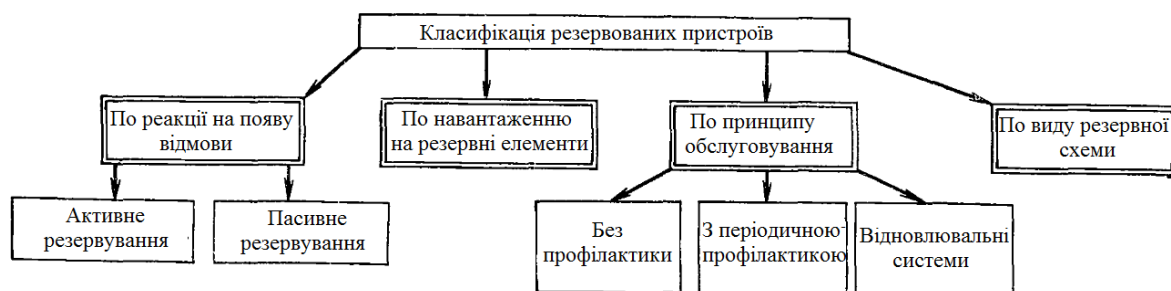


Рис. 3.4 Загальна схема класифікації резервованих технічних систем

### 3.2 Пасивне резервування з незмінним навантаженням і навантажене активне резервування з дуже надійними перемикаючими пристроями

При будь-якій спробі дослідження або практичного здійснення активного резервування доводиться стикатися з питанням про перемикаючий пристрій, який для стислості будемо надалі називати перемикачем. Перемикання може здійснюватися вручну або автоматично. В сучасних автоматизованих системах доводиться застосовувати в основному автоматичні перемикачі, так як на виявлення факту відмови системи ручне включення резервних елементів затребує значного часу, тож резервування при ручному включенні часто втрачає сенс.

Пасивне резервування з незмінним навантаженням іноді вдається здійснити шляхом паралельного (функціонального, а не логічного) підключення до основної системи однієї або декількох резервних систем, які можна вважати в даному випадку елементами резервованої системи. Ці системи з'єднуються паралельно так, щоб системи які відмовили не впливали на інші - працездатні.

При розрахунку надійності резервованих систем часто намагаються знайти функцію резервування  $R(Q_0)$ , яка виражається ймовірністю відмови  $R$  резервованої системи від первісної ймовірності відмови  $Q_0$  нерезервованої системи і характеристик схеми. Розглянемо спочатку системи з періодичною профілактикою, що проводиться через задане напрацювання. Для обчислення функції резервування необхідно попередньо скласти логічну (математичну) модель резервованої системи.

Система ділиться на елементи, які можуть з'єднуватися послідовно або паралельно. Послідовним з'єднанням вважається таке, коли відмова хоча б одного елемента веде до відмови всього з'єднання. При паралельному з'єднанні тільки відмова всіх елементів призводить до відмови цього з'єднання в цілому. При обчисленні функцій надійності і ненадійності цих з'єднань елементів використовуються формули (3.1) - (3.7).

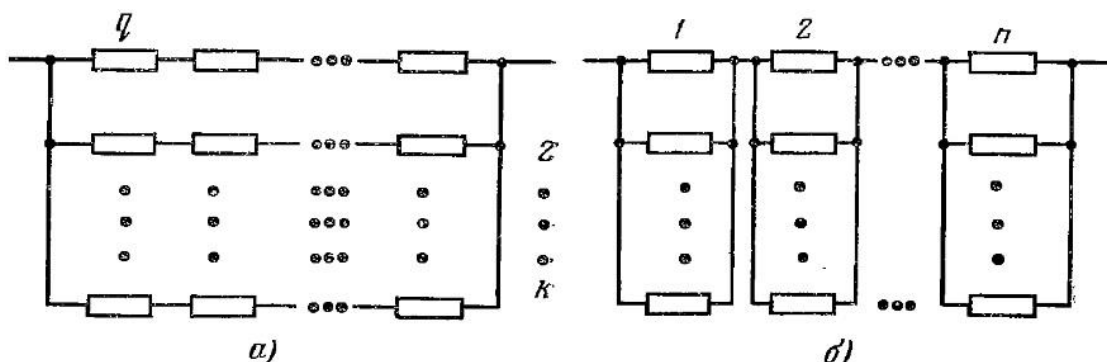


Рис. 3.5 Структурні схеми систем: *a* – окремий випадок загального резервування;  
*б* - окремий випадок роздільного резервування

Відповідно до формули (3.4) функція резервування системи із загальним резервуванням (рис. 3.5, а)

$$R_{\text{заг}} = \prod_{j=1}^k Q_0, \quad (3.1)$$

де  $k$  – число з'єднаних паралельно елементів.

Для простоти міркувань вважатимемо, що основні і резервні ланцюги мають однакову надійність. Тоді

$$R_{\text{заг}} = Q_0^k. \quad (3.2)$$

Функція резервування системи з роздільним резервуванням (рис. 3.4,б) в даному випадку:

$$R_{\text{розд}} = 1 - \left\{ 1 - [1 - (1 - Q_0)^{\frac{1}{n}}]^k \right\}^n, \quad (3.3)$$

де  $n$  - число ділянок резервування.

Виразимо формули (3.2) і (3.3) через імовірність відмови  $q$  ділянки резервування основної системи. Якщо врахувати, що  $Q_0 = 1 - (1 - q)^n$ , то можна написати:

$$R_{\text{заг}} = [1 - (1 - q)^n]^k, \quad (3.4)$$

$$R_{\text{розд}} = 1 - (1 - q^k)^n. \quad (3.5)$$

Для систем короткочасної дії, у яких  $Q_0 \approx nq \ll 1$ , праві частини формул (3.4) і (3.5) можна розкласти в ряди за ступенями  $n$  і, нехтуючи членами з  $q$  в ступені вище першої, написати:

$$R_{заг} = n^k q^k, \quad (3.6)$$

$$R_{розд} = nq^k. \quad (3.7)$$

На підставі формул (3.6) і (3.7) можна зробити висновок, що в даному випадку застосування роздільного резервування замість загального в системах короткочасної дії дає вигоду в надійності

$$\frac{R_{заг}}{R_{розд}} = n^{k-1}. \quad (3.8)$$

Цей висновок справедливий лише при умові, що періоди профілактики в обох випадках однакові.

Щільність розподілу напрацювання на відмову системи із загальним (резервуванням можна знайти диференційованим виразом для  $R_{заг}$ . Для дубльованої системи

$$f(t) = \frac{dR_{заг}(t)}{dt} = Q_1(t)f_2(t) + Q_2(t)f_1(t),$$

де  $f_1(t), f_2(t)$  - щільності розподілу напрацювання до відмови основного і резервного елементів;  $Q_1(t), Q_2(t)$  - ймовірності відмови цих елементів. При показниковому розподілі напрацювання до відмови обох елементів

$$f(t) = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} (1 - e^{-\lambda_2 t}) + \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{-\lambda_2 t}).$$

Коли система із загальним резервуванням складається з  $k$  рівнонадійних елементів з показовими розподілення напрацювання до відмови, то

$$P_{заг}(t) = 1 - R_{заг}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^k, \quad (3.9)$$

$$f_{заг}(t) = k \lambda_0 e^{-\lambda_0 t} (1 - e^{-\lambda_0 t})^{k-1}, \quad (3.10)$$



$$\lambda_{\text{заг}}(t) = \frac{k\lambda_0 e^{-\lambda_0 t} (1 - e^{-\lambda_0 t})^{k-1}}{1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^k}, \quad (3.11)$$

де  $\lambda_0$  - інтенсивність відмов нерезервованого елемента.

Коли максимальне значення  $\lambda_0 t \ll 1$ , то в (3.11) можна покласти:

$$e^{-\lambda_0 t} \approx 1 - \lambda_0 t.$$

При цьому після перетворень отримаємо:

$$\lambda_{\text{заг}}(t) \approx k\lambda_0^k t^{k-1}. \quad (3.12)$$

Таким чином, навіть при постійних інтенсивностях відмов окремих елементів інтенсивність відмов резервованої системи є функцією напрацювання.

При  $t = 0$  значення  $\lambda_{\text{заг}}(t)$  і  $f_{\text{заг}}(t)$  завжди дорівнюють нулю. При  $t \rightarrow \infty$  інтенсивність відмов резервованої системи зростає і прямує до межі - інтенсивності відмов  $\lambda_0$  нерезервованого пристрою. Інтенсивність потоку відмов  $\omega(t)$  також прямує до межі - величині, зворотної середньому часу безвідмовної роботи резервованої системи. Залежності відносної інтенсивності відмов  $\lambda_{\text{заг}} / \lambda_0$  і відносної інтенсивності потоку відмов  $\omega_{\text{заг}} / \lambda_0$  від часу приведені на рис. 3.6.

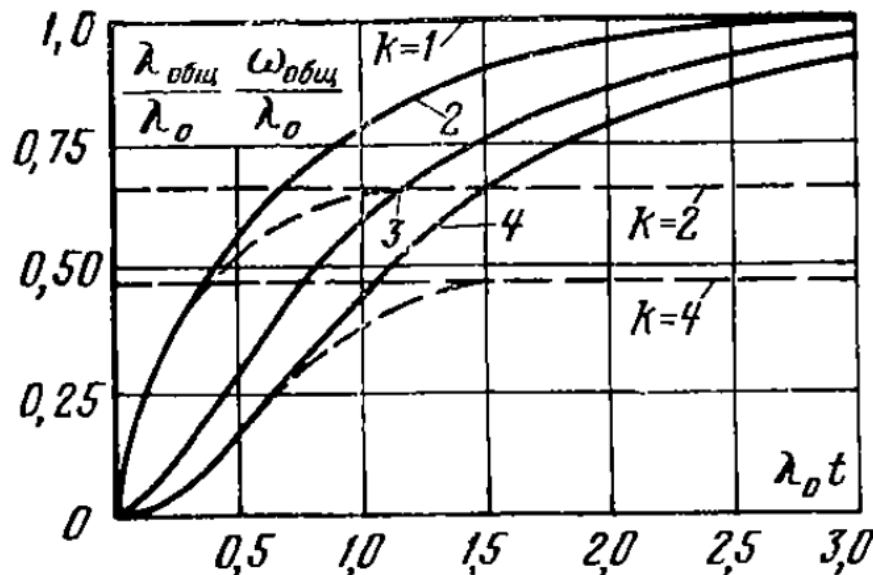


Рис. 3.6 Залежність від часу відносної інтенсивності відмов системи з загальним резервуванням при різному числі  $k$  пристроїв, з'єднаних паралельно на логічній схемі. Пунктиром показано відповідні залежності для параметра потоку відмов

Середнє напрацювання до відмови системи з загальним резервуванням обчислюється за формулою:

$$m_t = \int_0^{\infty} [1 - R_{заг}(t)] dt.$$

При однаковій надійності всіх  $k$  з'єднаних паралельно на логічній схемі елементів (пристроїв), що мають показовий розподіл напрацювання до відмови,

$$m_t = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^k] dt = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=1}^k \frac{1}{j}. \quad (3.13)$$

Наведені формули справедливі для випадку, коли резервована система відмовляє лише при виході з ладу всіх  $k$  паралельних елементів логічної схеми. Можливі випадки, коли за умовами роботи відмова настає при виході з ладу  $t > 1$  елементів логічної схеми. Цей випадок іноді називається резервуванням з дробовою кратністю.

Для обчислення ймовірності безвідмовної роботи або функції резервування системи в даному випадку доцільно скористатися відомою в теорії ймовірностей теоремою повторі дослідів (теоремою про послідовність незалежних випробувань). Відповідно до цієї теореми ймовірності всіх результатів роботи системи із загальним резервуванням отримуються за допомогою розкладання

$$\prod_{j=1}^k (P_{0j} + Q_{0j}) = 1, \quad (3.14)$$

де  $k$  - число паралельно з'єднаних елементів на логічній схемі;  $P_{0j}$  і  $Q_{0j}$  - значення функції надійності і функції ненадійності окремого елемента (пристрою) відповідно.

При рівнонадійних пристроях розглядається розкладання бінома  $(P_o + Q_o)^k = 1$ .

Для обчислення ймовірності безвідмовної роботи потрібно викреслити доданки, що відповідають відмові системи.

При обчисленні ймовірності відмови резервованої системи потрібно залишити лише члени, що відповідають відмові системи. З рівняння  $P_{заг} = P_0$  можна знайти критичне значення  $P_{0*}$  ймовірності безвідмовної роботи окремого пристрою, при якому надійності резервованої системи і окремого пристрою однакові. При  $P_0 < P_{0*}$  резервування з дробовою кратністю приносить шкоду знижуючи надійність.

### 3.3 Резервування зношуваних елементів

Припустимо, що визначає параметр системи не змінюється від приєднання або відключення резервних елементів.

Розглянемо резервовану систему, логічна схема якої складається з до паралельно з'єднаних рівнонадійних елементів (загальне резервування). Відповідно до (3.2) при незалежних відмовах елементів щільність розподілу напрацювання до відмови резервованої системи дорівнює:

$$f_{заг}(t) = k[1 - p(t)]^{k-1} f(t),$$

де  $f(t), p(t)$  - щільність розподілу напрацювання до відмови і функція надійності одного елемента відповідно.

У поширеному випадку альфа-розподілу наробітку на відмову зношуваних елементів крива розподілу  $f_{заг}(t)$  за своєю формою близька до альфа-розподілу і її доцільно замінювати еквівалентним альфа-розподілом з параметрами  $\alpha_e$  і  $\beta_e$ .

Для кривих розподілу  $f_{заг}(t)$  можна знайти ті ж характерні точки, що і для альфа-розподілу  $f(t)$ . При цьому виявляється, що для резервованої системи з однакових відносні величини

$$g_n = \frac{t_n}{\beta_e}; \quad g_{\frac{1}{2}} = \frac{Me}{\beta_e}$$

залежать лише від  $\alpha_e$  (тут  $\beta_e$  - запас параметра окремого елемента).

На рис. 3.7 приведені відповідні залежності для дубльованої системи. Користуючись залежностями виду рис. 3.6, легко знайти напрацювання до початку масових відмов і медіану  $Me$  резервованої системи з однакових елементів із заданими характеристиками  $\alpha_e, \beta_e$ :

$$t_n \beta_e g_n(\alpha_e);$$

$$Me = \beta_e g_{\frac{1}{2}}(\alpha_e).$$

Графіки рис. 3.6 можуть бути використані при визначенні параметрів  $\alpha_e, \beta_e$  еквівалентного альфа-розподілу.

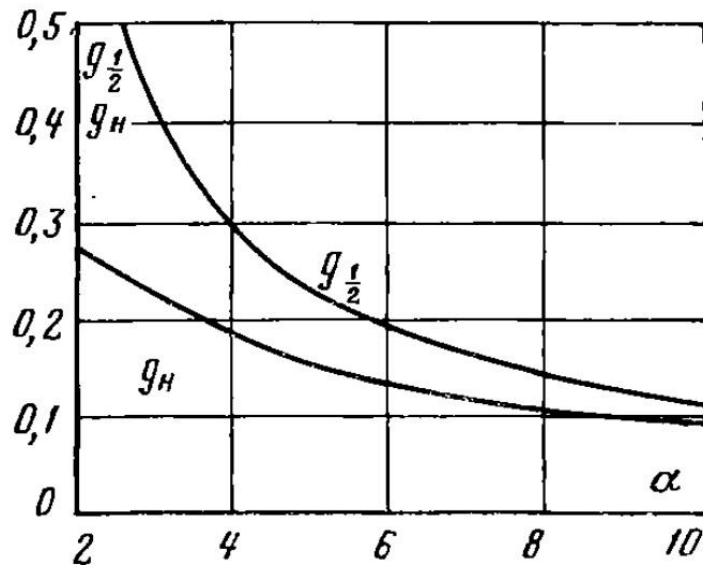


Рис. 3.7. Залежності  $g_n(\alpha)$  і  $g_{\frac{1}{2}}(\alpha_e)$  для дубльованої системи з однакових елементів,

напрацювання до відмови яких підпорядкована альфа-розподілу

В наведеному прикладі резервування зношуваних пристроїв розглядаються лише логічні зв'язки між елементами.

## ВИСНОВКИ

В роботі проведено аналіз методів підвищення показників надійності мереж стільникового зв'язку стандарту LTE. Визначено, що для забезпечення надійної роботи компонентів комплексу зв'язку, а отже і мережі в загалом, доцільно резервувати основні компоненти.

За забезпечення цієї мети при проектуванні і розгортанні мережі необхідно використовувати відновлювальні об'єкти – компоненти мережі, в процесі яких можливо відновити елементи, які вишли з ладу без погіршення надаваних послуг. Якщо працездатність основних і резервних елементів не контролюється, система використовується до моменту відмови через вихід з ладу всіх елементів.

Встановлені умови та властивості мережі при резервуванні не лише окремих компонентів, а і підсистем комплексу.

Різні резервовані об'єкти відрізняються один від одного в першу чергу реакцією на появу відмови, тобто, динамічними властивостями. З цієї точки зору можна розрізнити два шляхи створення резервованих об'єктів - два методи резервування:

Активне резервування: структура об'єкта така, що при появі відмови вона перебудовується і об'єкт відновлює свою працездатність, тобто відбувається саморемонт об'єкта. При цьому об'єкт активно реагує на появу відмови.

Пасивне резервування: відмова одного об'єкта або навіть декількох елементів не впливає на роботу системи. Елементи з'єднані постійно, перестроювання структури не відбувається.

При виборі способу резервування необхідно відтаскуватися не тільки матеріальних затрат, які виділені на побудову мережі, а і від перспективності мережі, тобто, термін, який вона буд експлуатуватися.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ****Книги**

1. Бабаков В. Ю., Вознюк М. А., Михайлов П. А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. Учебное пособие для ВУЗов. – М: Горячая линия – Телеком, 2007.
2. Вишневецкий В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия Wi-MAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009.
3. Гельгор А. Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.
4. Гольдштейн Б. С., Соколов Н. А., Яновский Г. Г. Сети связи: Учебник для ВУЗов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2010.
5. Печаткин А. В. Системы мобильной связи. Часть 1. – РГАТА, Рыбинск, 2008.
6. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Юрчук А. Б. Сети мобильной связи LTE: технология и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010.
7. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика, теория и практика. – М.: Кудиц – Пресс, 2008.
8. Абдул Базит. Расчет сетей LTE. – Хельсинский технологический университет, 2009.
9. Farooq Khan. LTE for 4G Mobile Broadband. Air Interface Technologies and Perfomance. – Cambridge University Press, 2009.
10. Harri Holma, Antti Toskala. LTE for UMTS. OFDMA and CS-FDMA Based Radio Access. – John Wiley Ltd, 2009.
11. Stefania Sesia. LTE. The UMTS Long Term Evilution. From Theory to Practice. – John Wiley Ltd, 2009.
12. Tanenbaum A. S. Computer Networks / A. S. Tanenbaum, D. J. Wetherall. – 5-th Ed. – Prentice Hall, Cloth, 2011. – 960 p.

### **Статті, конференції, семінари**

1. Кравченко Ю. В. Оцінка стану складних об'єктів / Ю. В. Кравченко, Р. А. Миколайчук // Міжнародна наукова конференція «ISDMCI». – Ялта : 3-5 липня 2012 р. – С. 100-101.
2. Zhang Chang-fu. Telecommunication and standardization / ZhangChang-fu, Qiu Kun, Qiu Qi // Semiconduct. Optoelectron. – 2005. – Т. 26, № 1. – Р. 47-49.
3. Takahashi A. Overview of ITU-T and its standardization of QoE assessment methodologies / A. Takahashi // IEICE Tech. Rep. – July 2010. – V.110, №118. – Р. 65-69.

### **Стандарти, нормативні документи**

1. Framework for IMT-2000 networks // ITU-T Recommendation Q.1701. – 1999.
2. Требования к качеству восприятия для IPTV : Рекомендация ITU-T G.1080. – 2008.
3. Information technology – Security techniques – Information security management systems – Overview and vocabulary // ISO/IEC 27000:2014 .
4. 3GPP TS 36 104: «E-UTRA Base Station (BS) radio transmission and reception» (Release 9). April 2011.

### **Електронні ресурси**

1. Равшанов Я. О. Сколько стоит корпоративный ЦОД: методики расчета ТСО [Електронний ресурс] / Я. О. Равшанов// Технологии и средства связи. – 2010. – №4. – Режим доступа : <http://tsonline.ru/articles2/fix-corp/skolko-stoit-korporativnii-cod-metodiki-rascheta-tso> (10.12.2019 р.).
2. Kaganski S. Selecting the right KPIs for SMEs Production with the Support of PMS and PLM [Електронний ресурс] / S. Kaganski, A. Snatkin, M. Paavel, K. Karjust, S. Peterson // International Journal of Research In Social Sciences. –2013. – Vol. 3, Issue – Р. 69-76. – Режим доступа: <http://archive.org/details/InternationalJournalOfResearchInSocialSciencesijrss> (07.10.2019 р.)

## ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ