

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

## **Пояснювальна записка**

до магістерської роботи

на тему: **“ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ З  
ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ДУБЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ”**

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

(шифр і назва спеціальності)

Титаренко В.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Рецензент

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Київ - 2019

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Мобільних та відеоінформаційних технологій  
\_\_\_\_\_ В.І. Кравченко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Титаренку Владиславу Олександровичу

1. Тема роботи: “Підвищення надійності систем мобільного зв'язку з використанням методу дублювання основних компонентів”, керівник роботи Кравченко Владислав Ігорович, к.т.н., завідувач кафедри МВТ затверджені наказом вищого навчального закладу від 14.11.2019 року року № 518.

2. Строк подання студентом роботи 20.12.2019 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Принципи побудови перспективних телекомунікаційних мереж;
2. Основні види та властивості систем
3. Оптимізаційні методи проектування розміщення елементів рухомих систем радіозв'язку.
4. Науково-технічна література.

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

1. Аналіз принципів побудови перспективних телекомунікаційних мереж;
2. Основні види та властивості систем
3. Оптимізаційні методи проектування розміщення елементів рухомих систем радіозв'язку.

5.Перелік графічного матеріалу (назва слайдів презентації):

1. Мета роботи;
2. Типова архітектура системи стільникового зв'язку;
3. Процедура призначення каналу;
4. Основні напрями розвитку технології широкосмугового бездротового зв'язку;
5. Широкосмугові послуги і нові застосування, стимулюючі еволюцію систем 3G;
6. Дослідження видів складних систем;
7. синтезу систем радіозв'язку в рамках рішення проблеми електро-магнітної сумісності;
8. Апроксимація характеристик багатосигнальної вибірковості приймача;
9. Адаптивна процедура Уїдроу-Хоффа;
10. Висновки.

6. Дата видачі завдання 11.09.2019 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістрерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	09.09.19	
2.	Аналіз принципів побудови перспективних телекомунікаційних мереж	11.09.19	
3.	Основні види та властивості систем	16.09.19	
4.	Оптимізаційні методи проектування розміщення елементів рухомих систем радіозв'язку	23.09.19	
5.	Висновки, вступ, реферат	07.10.19	
6.	Розробка презентації	10.10.19	

**Студент**

(підпис)

**Титаренко В.О.**

(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

(підпис)

**Кравченко В.І.**

(прізвище та ініціали)





## РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 80 сторінок, 25 рисунків, 1 таблиця, 20 джерел.

*Об'єкт дослідження* – системи мобільного радіозв'язку.

*Предмет дослідження* – показники надійності системи.

*Мета роботи* – розв'язати комплексно науково-технічні питання, пов'язаних з підвищенням показників надійності систем мобільного радіозв'язку.

*Методи дослідження* – методи теорії інформації, методи теорії інваріантності, методи системного аналізу, елементи методів теорії ієрархічних багаторівневих систем, методи оптимального управління.

В роботі приведені принципи побудови перспективних телекомунікаційних мереж. Сформульовано нові задачі підвищення їх ефективності як на етапі аналізу основних видів та властивостей систем. Проаналізовано різні методи проектування розміщення елементів рухомих систем радіозв'язку. Та проаналізовані методи оптимізації рухомих систем радіозв'язку.

МОДУЛЮВАННЯ, КОДУВАННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, БЕЗПРОВОДОВА  
МЕРЕЖА, СИСТЕМА, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНОСТЬ, ЧАСТОТНА  
ЕФЕКТИВНІСТЬ, ШИРИНА СМУГИ ПРОПУСКАННЯ, МОДУЛЯЦІЯ,  
МОБІЛЬНА МЕРЕЖА, БЕЗДРОТОВИЙ ЗВ'ЯЗОК

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
1.АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ.....	10
1.1. Аналіз тенденцій розвитку мобільного зв'язку .....	10
1.2. Мобільний зв'язок .....	14
1.2.1. Методи доступу .....	14
1.2.2. Види мобільного зв'язку.....	21
1.3. Стільникові системи другого покоління .....	23
1.4. Комутація пакетів - системи третього покоління.....	24
1.5. Технологія LTE (Long-Term Evolution - довгостроковий розвиток) .....	28
2. ОСНОВНІ ВИДИ ТА ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМ .....	33
2.1. Дослідження видів складних систем .....	33
2.1.1. Статичні системи .....	34
2.1.2. Динамічні системи.....	35
2. 2. Властивості систем .....	38
2. 2.1. Цілісність .....	38
2.2.2. Причинність.....	39
2.2.3. Керованість.....	40
3. ОПТИМІЗАЦІЙНІ МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ РОЗМІЩЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РУХОМИХ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ .....	51
3.1. Дослідження синтезу систем радіозв'язку в рамках рішення проблеми електро- магнітної сумісності .....	51
3.2. Розрахунок мінімально припустимих розладів між робочими частотами радіоліній .....	57
3.3. Оптимальне регулювання потужності передавачів у системі радіозв'язку .....	60
3.4. Задачі по розподілу ресурсу в системі радіозв'язку.....	63
3.5 Шляхи підвищення надійності систем мобільного зв'язку з використанням методу дублювання основних компонентів.....	66
ВИСНОВКИ.....	77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	79
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ .....	81

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Рівень економічного розвитку будь-якої країни на даний час визначається ступенем впровадження новітніх технологій. Особливе значення мають інноваційні технології, які окреслюють напрями науково-технічного прогресу. Характерною ознакою глобального ринку, що формується при цьому – це проникність процесів створення, обробки та передачі інформації. Системи мобільного радіозв'язку переживають етап динамічного зросту, зумовлений не тільки вимогами інформаційного обміну, але й можливостями новітніх технологій по забезпеченню тривалої якісної роботи засобів і мереж телекомунікацій у процесі їх постійного вдосконалення та розвитку. Відповідно набуває особливої ваги визначення та вирішення різноманітних наукових проблем і задач підвищення показників якості систем і пристроїв управління – від загальномережних та загальнооператорських задач оптимізації управління, пов'язаних з побудовою надійних, ефективних, гнучких структур до підвищення надійності, точності, швидкодії окремих компонент - систем управління (СУ) та контролю їх ефективності.

Разом з тим слід зазначити, що в умовах розмаїття інфокомунікаційних та інформаційних технологій, їх швидкого прогресу і конвергенції, спектру типів та розгалуженості мереж мобільного радіозв'язку, зростаючого попиту споживачів на нові послуги та підвищення вимог до надійності та якості їх надання, конкуренції на ринку телекомунікацій тощо, виникають усе нові й нові завдання.

Одним з таких завдань є проектування систем радіозв'язку в різних умовах експлуатації. Особливої ваги набуває визначення та вирішення різноманітних наукових проблем і задач підвищення показників якості систем і пристроїв управління, пов'язаних з побудовою надійних, ефективних СУ для мобільних та стаціонарних мереж телекомунікацій. Рівень існуючих СУ недостатньо відповідає сучасним вимогам до них. Серед невирішених проблем на сьогодні залишається задача чіткого визначення стратегії створення і розвитку сучасних СУ мережами



мобільного радіозв'язку, особливості реалізації цифрових систем радіозв'язку наступного покоління.

Тому тема дипломної роботи, яка присвячена поліпшенню надійності функціонування систем мобільного радіозв'язку, є актуальною.

**Мета і завдання дослідження.** Метою магістерської роботи є розв'язання комплексу науково-технічних питань, пов'язаних з підвищенням показників надійності систем мобільного радіозв'язку.

**Об'єкт дослідження** - системи мобільного радіозв'язку.

**Предмет дослідження** – показники надійності системи.

**Для досягнення мети вирішуються такі задачі:**

- формулювання вимог до перспективних телекомунікаційних мереж зв'язку, можливість та необхідність реалізації високоефективних телекомунікаційних мереж зв'язку наступного покоління;

- здійснення порівняльного аналізу сучасних систем мобільному зв'язку: статичних (безінерційних) і динамічних (інерційних). Визначення особливостей, що характеризують різні сторони їх функціонування;

- удосконалення методів оптимального проектування систем радіозв'язку в різних умовах експлуатації.

Вищенаведені дослідження дають можливість вирішити одну із задач поліпшення ефективності сучасних систем управління мобільного радіозв'язку.

**Методи досліджень.** Для досягнення поставлених в роботі задач використано: методи теорії інформації, методи системного аналізу, елементи методів теорії ієрархічних багаторівневих систем, методи оптимального управління, методи імітаційного моделювання.

# 1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

## 1.1 Аналіз тенденцій розвитку мобільного зв'язку

Технології телекомунікацій - одна з областей людської діяльності, що найбільш динамічно розвиваються, англосакси називають "ubiquitous computing" - повна мобільність доступу до будь-яких інформаційних ресурсів. Потужний соціальний фактор має суттєвий вплив на формування усіх граней суспільства. Існують різні точки зору на проблему побудови глобальних телекомунікаційних мереж майбутнього, дуже гостро постають питання конвергенції мереж та послуг.

Стільниковий зв'язок існує з 60-х років. Уже тоді з'явилися системи мобільного зв'язку з розподілом простору на зони (стільники), зі станцією зв'язку в кожній зоні. Абонентські пристрої важили тоді десятки кілограмів, але цілком могли бути розміщені у багажнику автомобіля. Спочатку це були чисто військові системи, але з часом мобільний зв'язок знайшов своє місце в діловій сфері й почався досить бурхливий розвиток стільникової телефонії.

Аналогові системи (Advanced Mobile Phone Service - AMPS, Nordic Mobile Telephony - NMT, Total Access Communications Systems - TACS) розвивалися до середини 80-х років, коли все зростаюча потреба в "дешевому" і доступному мобільному зв'язку вимагала швидкого збільшення числа користувачів. Аналоговий зв'язок був нездатний забезпечити попит в силу властивих йому технологічних обмежень: складність поділу аналогових сигналів при мультиплексуванні та мала кількість можливих неінтерферуючих каналів призводила до того, що послуги зв'язку залишались дорогими та привілейованими).

Побудова інформаційного суспільства характеризується стрімким підвищенням ролі інформаційно-комунікаційних послуг у сфері діяльності людини, суспільства й держави. Розширення спектру нових послуг вкрай утруднене без впровадження

сучасних технологічних рішень і нового обладнання, що приводить до росту й ускладнення мережної інфраструктури. Одним з ефективних шляхів, що дозволяють значно зменшити експлуатаційні витрати, а також забезпечити безвідмовність обладнання, є застосування автоматизованих мережних систем управління (СУ)[15-17].

Загалом кажучи, будь-яка система мобільного зв'язку - супутникова, стільникова або просто безпроводова - є системою стільникового зв'язку, принаймні в тому розумінні, у якому є "звичайний" стільниковий зв'язок. У кожній з них використовується мережа "базових станцій", кожна з яких має певну зону покриття. Для супутників це "плями", для стільникових станцій, відповідно, "стільники". Всі зони різняться по площі, що зворотно пропорційні довжині хвилі використовуваного випромінювання. У всіх систем мобільного зв'язку є загальні проблеми, що впливають із деяких факторів, властивих кожної з них. Всі вони є системами масового обслуговування з обмеженим числом каналів, отже, обмеженим можливим числом користувачів. Вони використовують радіохвилі в якості несучої, звідки виникає проблема взаємних перешкод при роботі, завдання частотно-територіального планування. Спектр радіочастот є обмеженим природним ресурсом і існують проблеми з його розподілом. Фізика й технологія накладають обмеження на діапазон частот, придатний для використання в мобільному зв'язку, тому існує потреба в ефективних алгоритмах мультиплексування даних на одній смузі пропускання.

У ряді випадків задача надання високошвидкісного і якісного зв'язку, особливо у важкодоступних районах, може бути вирішена тільки за рахунок використання систем фіксованого широкосмугового радіодоступу. Передача даних по радіоканалу у багатьох випадках надійніша і дешевша, ніж передача по комутованих або орендованих каналах, і особливо по каналах стільникових мереж зв'язку. У ситуаціях, пов'язаних з відсутністю розвиненої інфраструктури зв'язку, використання радіозасобів для передачі даних часто є єдиним розумним варіантом організації зв'язку [3].

Можна виділити три принципові переваги цих технологій над кабельними мережами:

- неможливість приєднання рухомих (інакше, мобільних) абонентів є принциповим обмеженням чисто кабельних мереж (тобто мереж, які використовують кабель і на мережевих магістралях, і для підключення абонентів). Це обмеження відноситься до будь-якого виду комунікацій - як до звичного телефонного і факсимільного зв'язку, так і до передачі даних. Чинник мобільності радіомереж набуває першочергового значення, коли користувач не має нагоди підключення до звичної мережі і повинен переміщатися у межах певного району;

- інша перевага безпроводових мереж має не технологічний, а економічний характер - чинник віддаленості. Вона торкається підключення окремих абонентів до мережі. Це можуть бути абоненти, розкидані по великій, малонаселеній або важкодоступній території, або згруповані в окремому пункті. У таких випадках прокладати кабель не завжди економічно доцільно;

- третій чинник специфічний для країн, що розвиваються, з відстаючими в розвитку телефонними мережами загального користування. Чинник терміновості виражається у тому, що надійні комунікації потрібні зараз, негайно, а для прокладки кабельної мережі потрібні колосальні інвестиції і тривалий час.

Зрозуміло, у безпроводових технологій є і істотні недоліки:

- перш за все, обмеженість частотного ресурсу. Це змушує операторів купувати дорогі ліцензії, а виробників обладнання розробляти різні методи захисту сигналів від завад близьких до несучої частоти;

- збільшення електромагнітного випромінювання, особливо у великих містах. Хоч прямих доказів негативного впливу GSM на здоров'я людей не знайдено, ВЧ діапазон Wi-Fi, WiMax і інших технологій може бути небезпечний для жителів будинків, на даху яких будуть встановлені антени;

- значне енергоспоживання. Хоча цей недолік може бути мінімізований за рахунок застосування малопотужних шумоподібних сигналів.

Таким чином, можна зробити висновок, що безпроводова мережа доступу має істотніші переваги, ніж недоліки і доцільна побудова корпоративних мереж (особливо невеликих) на основі безпроводових технологій.

Існує три основних підходи й всі вони використовуються в мобільному зв'язку й будуть розглянуті в першому розділі. Системи мобільного зв'язку досить істотно використовують той факт, що радіохвилі при поширенні потерпають сильного затухання. Коефіцієнт затухання  $k$  для типового радіоканалу лежить десь між 2 і 6, у середньому 4. Потужність сигналу падає як  $\exp(-kt)$ . Тому для вирішення проблеми завад потрібно збільшувати відстань між станціями, що працюють на одній частоті на рис.1.1.

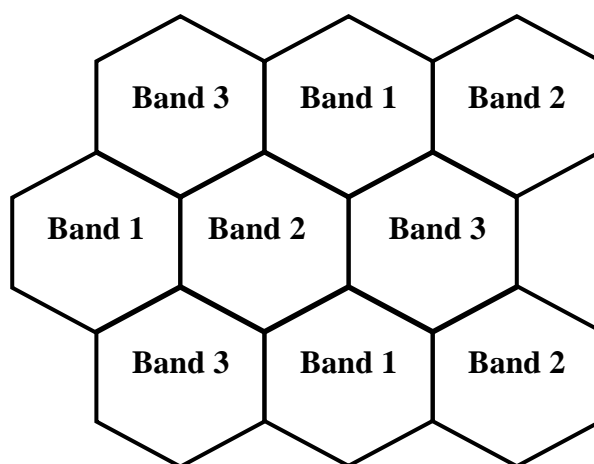


Рис. 1.1. Приклад рішення завдання частотно-територіального планування

Метою даного розділу є визначення стратегії створення і розвитку NGN, LTE та систем управління мобільного радіозв'язку, яка буде органічною частиною єдиної СУ діяльністю оператора і дозволить забезпечити управління складною різномірною мережею з максимальним рівнем автоматизації для забезпечення різних категорій споживачів сучасним набором послуг телекомунікацій від базових до високошвидкісних послуг мультимедіа.

Проаналізовано розвиток і подальші шляхи розвитку технології LTE. Розглянуто коли на зміну мережам NGN прийдуть мережі майбутніх поколінь FN (Future Networks).

## **1.2 Мобільний зв'язок**

### **1.2.1 Методи доступу**

Радіоканал - це середовище широкого мовлення [11]. Тому потенційно кожний користувач у межах досяжності передавача може здійснювати прийом сигналу від нього. Але ця властивість, у випадку мобільного зв'язку, вимагає складної організації й контролю доступу.

Основними критеріями розробки системи мобільного зв'язку є пропускна спроможність, вартість реалізації, якість надаваних послуг.

Поняття множинного доступу в безпроводовому зв'язку засновано на ізолюванні сигналів, що відносяться до різних каналів у межах використовуваного домену (несучої). Розрізняються просторовий, частотний, часовий, кодовий домени. Відповідно доменам розрізняють методи доступу: множинний доступ поділу частоти - FDMA (Frequency-Division Multiple Access), поділу часу - TDMA (Time-Division Multiple Access), поділу коду - CDMA (Code-Division Multiple Access). Основна ідея всіх трьох методів полягає у використанні ортогональних або практично ортогональних сигналів. При цьому використовуються корелятори, які проектують одержуваний сигнал у підпростір бажаного сигналу без будь-якого впливу сторонніх сигналів.

FDMA - сигнали, що відносяться до різних каналів, використовують непересічні частотні діапазони, і тому можуть бути легко розділені використанням відповідних частотних фільтрів. У кожний момент часу будь-який користувач використовує унікальний частотний діапазон і в результаті сигнали від різних користувачів чисто ортогональні, принаймні, в ідеальному випадку. На практиці представляється неможливим цілком виключити вплив сусідніх сигналів один на одного, що веде до необхідності вводити деякі захисні діапазони, на яких прийом і передача виключені, але при цьому звужується простір, придатний для використання. Корисно поєднати FDMA з дуплексним поділом часу (TDD - Time-

Division Duplexing) при якому абонентський пристрій і базова станція спілкуються на одному частотному діапазоні по черзі.

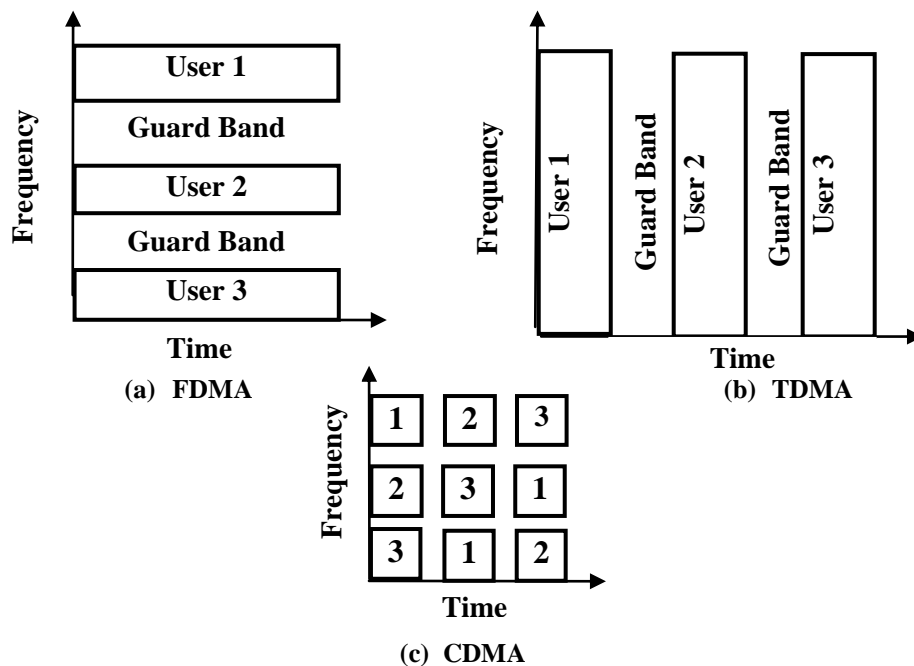


Рис. 1.2. Приклад різних методів доступу

Специфіка каналу: при використанні FDMA передача здійснюється безперервно порівняно з TDMA. Тому перешкоди між переданими символами практично відсутні й час затримки сигналу (1-10 мксек) малий у порівнянні з тривалістю символу (~ 40 мксек). Ефект Доплера при русі джерела (наприклад, автомобіля по швидкісній магістралі) також малий (1-100 Гц) у порівнянні із шириною каналу (~ 100 кГц). Таким чином, апаратура базової станції порівняно проста. Якщо сполучити FDMA з TDD, то база й абонентський пристрій використовують один частотний діапазон. У цьому випадку практично всю роботу з обробки сигналів можна покласти на базову станцію, використовуючи принаймні дві антени: вони повинні модулювати випромінювання таким чином, використовуючи характеристики останньої абонентської передачі, що дві хвилі когерентно інтерферують на абонентській антені. Абонентський пристрій буде використовувати для прийому й передачі ті самі параметри, не маючи потреби у випрямлячі та іншій складній апаратурі. Це

можливо, тому що два пристрої використовують той самий канал, хоча б навіть і віртуальний (сегментований). Вплив висоти антени: у стільниковому зв'язку вимога безперервного зв'язку для абонента, що рухається, приводить до вимоги великої площі, що покривається однією базовою станцією (до 30 км). У результаті, антени базової станції мають порівняно більшу висоту при досить високій потужності випромінювача. При використанні FDMA та TDD абонентський термінал і база випромінюють в одному частотному діапазоні, тому може виникнути проблема перешкод, що привносяться сусідніми базами в сигнали від абонента. Тому варто збільшувати відстань між базами, що працюють в одному діапазоні [10-12].

TDMA - різні канали використовують різні часові проміжки й розрізняються базовою станцією за часом їхнього прийому. Сигнали групуються за принципом кільцевої черги (round-robin). На базі застосовуються досить прості фільтри для поділу сигналів різних абонентів. Розділові проміжки часу (guard time) можуть бути зроблені настільки малими, наскільки дозволить вимога синхронізації всієї мережі. Зазвичай це проміжки в 30-50 мсек. при цьому всі абонентські пристрої повинні бути синхронізовані одноманітно з базовою станцією, для цього на одному із широкомовних каналів бази транслюється єдиний час. TDMA може комбінуватися з TDD або FDD (Frequency-Division Duplexing). Перше сполучення застосовується при невеликому розходженні між антенами абонентського пристрою й бази (наприклад, використовується в DECT-стандарті безпроводової телефонії). При великій висоті базової антени більш ефективно застосування FDD, що характерно для стільникового зв'язку. Для прийому й передачі в цьому випадку використовуються різні канали, тому не вдається "полегшити" абонентський пристрій - доводиться реалізовувати складну антену (багаточастотного) і випрямляч (equalizer) і на абонентському пристрої, і на базовій станції, що збільшує ціну й споживання енергії. Особливості каналу: у порівнянні зі швидкістю передачі (data rate) в FDMA, що однакова на всіх частотних діапазонах, в TDMA вона збільшується в стільки разів, скільки користувачів розділяють даний діапазон - тобто 8 для GSM і 3 для D-AMPS.



Звідси випливає зменшення тривалості символу в стільки ж разів і посилення накладення символів (міжсимвольні колізії). (Наприклад, при швидкості передачі 25 cps і восьми користувачах тривалість символу буде дорівнювати 5 мксек. При затримці поширення хвилі навіть в 1 мксек. у безпроводових телефонах використання випрямляча буде виправдано, що говорити про стільниковий зв'язок, де затримки поширення досягають 20 мксек. Можна сказати, що канал є частотно-вибірним, тому що на різних частотах цей ефект буде розрізнятися. Приймач для такої системи вийде досить складним, але канал забезпечує деяку природну гнучкість, що робить передачу більш стійкою до затухання сигналу). Початкове призначення каналу: і в FDMA і в TDMA канал не повинен закріплюватися постійно за яким-небудь абонентським пристроєм. Це було б занадто марнотратно. Тому використовується початкове призначення каналу. Для реалізації даної функції необхідна наявність спеціального зарезервованого каналу передачі (uplink) для мобільних пристроїв, по якому вони можуть сповіщати базову станцію про те, що потрібен канал обміну. Цей канал по суті є каналом випадкового доступу. Успішна процедура призначення каналу показана на рис. 1.3.

Процедура починається посилкою запиту від абонентського пристрою на виділення каналу. Тому що канал у нас випадкового доступу, то він вимагає застосування деякого протоколу запобігання колізій. Після одержання запиту, база направляє мобільний пристрій на спеціальний контрольний канал для настроювання й призначення каналу. По завершенню обміну конфігураційною інформацією мобільному пристрою призначається канал (частота або тайм-слот), на якому далі проходить весь обмін.

CDMA - різні абонентські інтерфейси використовують слабко корельовані сигнали, тому відповідна апаратура може розділити сигнали, що розрізняються, навіть якщо вони передаються одночасно й на одній частоті.

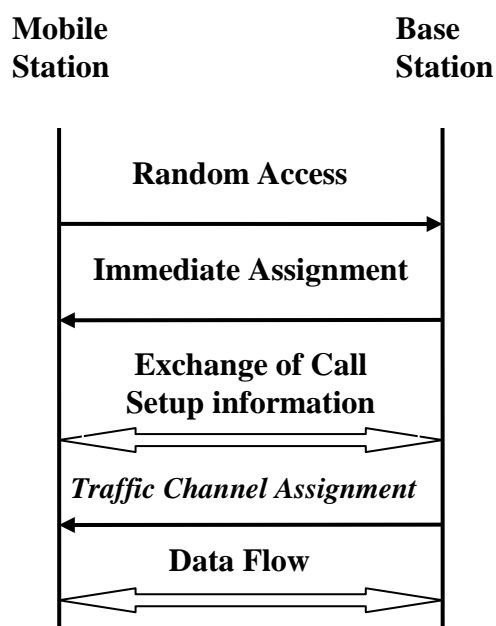


Рис.1.3. Процедура призначення каналу

Широко використовуються два методи - метод частотних стрибків (FH - Frequency Hopping) і метод прямої послідовності (DS - Direct Sequence). При проході сигналу через фільтр, налаштований на конкретного абонента, вихід сигналів, що ставляться до інших абонентів багато менше сигналу названого абонента.

Основним чином це досягається використанням послідовностей поширення (Spreading Sequences) з малою кореляцією. Через подібність на шум, такі послідовності часто називають псевдошумовими послідовностями.

Системи CDMA називають широкопasmовими (Spread-Spectrum) за використання широким діапазонів. У методі прямої послідовності високочастотна псевдовипадкова послідовність модулює переданий сигнал таким чином, щоб діапазон результуючого сигналу дорівнював частоті послідовності. Таким чином, корельованість сигналів буде визначатися корельованістю послідовностей. Сигнали абонентів CDMA розділяють загальні частотний і часовий домени, але при цьому відділені один від одного по виду несучої радіохвилі.

При цьому відпадає потреба у твердій синхронізації між абонентськими пристроями та у розподілі й керуванні частотами. Особливості середовища

поширення: широкосмугові сигнали дуже добре підходять для мобільних систем зв'язку завдяки своїй природній частотній гнучкості: як уже було відмічено, затримки поширення для стільникових систем становлять декілька мксек і, отже, погоджена ширина діапазону буде менша 1 МГц.

Послідовності поширення можуть бути обрані таким чином, щоб заповнити погоджений діапазон і зробити канал частотно-вибірним, тобто різні частотні компоненти сигналу по-різному відгукуються на затухання. Різні компоненти можуть бути згодом когерентно комбіновані й розшифровані з дозволом порядку тривалості символу. Для цього потрібно знання часу відповіді каналу, що обчислюється за допомогою навчальної послідовності завдяки так званому пілотному сигналу. У випадку, якщо комбінування компонентів виявляється занадто складним, можна обійтися найбільшим за потужністю компонентом - використовуючи фільтр для придушення інших частот, але при цьому методика трохи втрачає в гнучкості. Конфлікти множинного доступу: якщо можливо контроль відносного часу переданих сигналів, наприклад при роботі бази (downlink), сигнали можуть бути зроблені однозначно ортогональними й підходящий фільтр на приймачі може використовуватися для поділу сигналів.

Але при дисперсному (через різночастотний компонент) каналі сигнали, що приходять на приймач, уже не будуть зовсім ортогональні й компоненти чужих сигналів не будуть подавлені фільтром. При передачі абонентськими пристроями необхідна синхронізація на рівні тривалості символу, загалом кажучи, неможлива і, тому потрібні додаткові заходи для забезпечення контролю конфліктів. Крім того, існує проблема близького-далекого користувача, коли потужні сигнали близьких до станції користувачів придушують більш слабкі сигнали далеких користувачів, що може дуже знизити ефективність системи.

Для рішення цієї проблеми існують два підходи: контроль потужності з м'якими хендоверами й (Multiuser Detection). Контроль потужності покликаний забезпечити приблизно той самий рівень потужності випромінюваного сигналу для всіх користувачів у межах одного стільника. Щоб бути ефективним, спосіб контролю повинен бути досить точним і мати достатню частоту, щоб

компенсувати загасання частоти. Для мобільного пристрою, що рухається зі швидкістю 100 км на годину й передавального на частоті 1 Гц, доплеровський зсув буде становити 100 Гц. Отже, канал для такого абонента буде міняти свої характеристики 100 разів за секунду й контрольні сигнали від бази повинні будуть передаватися зі швидкістю 1000 символів за секунду.

Якщо врахувати, що параметри руху різних абонентів можуть дуже розрізнятися, то базовій станції необхідно мати великий динамічний діапазон для контролю потужності. Для Downlink-а контроль потужності потрібний тільки в тому випадку, коли абонент перебуває на рівній відстані від двох різних станцій. Проблема, пов'язана з конфліктом на границі розподілу двох або більше зон, може перетворитися в перевагу, якщо використовувати ідею "м'якого" хендовера. При Downlink-е всі базові станції в межах досяжності можуть передавати на стільник, що, у свою чергу, може комбінувати сигнали від різних базових станцій, щоб використовувати складність своєї антени. При Uplink-е можна досягти подібного ефекту, вибираючи самий потужний сигнал з одержуваних сусідніми базовими станціями. Та станція, що одержує найпотужніший сигнал і буде здійснювати керування потужністю стільника, щоб мінімізувати його енерговитрати. Для реалізації "м'якого" хендовера потрібно жорстка синхронізація між сусідніми базовими станціями, що знищує одну з основних переваг CDMA над TDMA. Але і ця проблема вирішується завдяки багатокористувальницькому визначенню (Multiuser Detection).

Основний зміст цього підходу полягає в повному моделюванні багатокористувальницьких конфліктів і розробці пристроїв, які б відкидали небажаний сигнал. (Спектр технологій різний - від обчислення оптимальних (maximum-likely hood) послідовностей, багаторівневих схем з використанням алгоритмів зі зворотним зв'язком, до лінійних декорелюючих приймачів). CDMA має декілька корисних властивостей: у сполученні з FDD пропонує рішення для проблеми контролю потужності при Uplink-е й Downlink-і, метод дозволяє вирішити проблему мовних пауз - при мовчанні абонента нічого не передається й

рівень конфліктів знижується, таким чином, загальну кількість абонентів може бути майже подвоєно.

Порівняння який з цих трьох методів кращий, як завжди, немає однозначної відповіді. FDMA дуже добре підходить для безпроводових телефонів з дуже маленькими зонами й затримками поширення. Для стільникового зв'язку й більшості типів систем персонального зв'язку (PCS) вибір зміщується до TDMA і CDMA. У плані складності, TDMA - вимагає нелінійних адаптивних випрямлячів (equalizers) у середовищі з більшими затримками поширення, CDMA потрібні RAKE-приймачі й складне керування потужністю. Синхронізація за часом потрібна в обох випадках, хоча й з різними цілями. Складність кодування в обох системах порівняна. Одним з найбільших переваг CDMA є поступове погіршення якості зв'язку при збільшенні числа абонентів, у той час як в TDMA користувач буде одержувати постійну відмову, якщо всі канали зайняті. Але для TDMA існують пропозиції по подальшому розвитку - перерозподіл каналів під час мовних пауз, збільшення пропускну здатності за рахунок прийняттого рівня втрат і т.д. Всі ці поліпшення зможуть наблизити TDMA до CDMA з його гнучкістю, зберігаючи при цьому всі свої переваги.

### **1.2.2 Види мобільного зв'язку**

Безпроводовий вид (cordless) - використовує FDMA. Приклади систем: CT-2, DECT, PHPS.

Стільниковий вид (cellular) - TDMA, CDMA і комбінації всіх трьох. Приклади систем: GSM/DCS1800, D-AMPS, IS-54, IS-95, PDC. Система стільникового зв'язку є телефонно-телефонно-орієнтованою системою, що надає сервіси типу ISDN. Система повинна забезпечувати: аутентифікацію користувачів і шифрування даних, середню й високу пропускну здатність (до 1000 Ерланг на км<sup>2</sup>), безперервний зв'язок у межах зони в 0.3 – 30 км, ефективний спосіб перерозподілу радіоканалу; керування мобільними абонентами (location updating, roaming, handover), порівняно невисоку якість мови - середній і низький рівень

частоти дискретизації ( 4-16 кб/с). Мобільний пристрій повинен бути портативним.

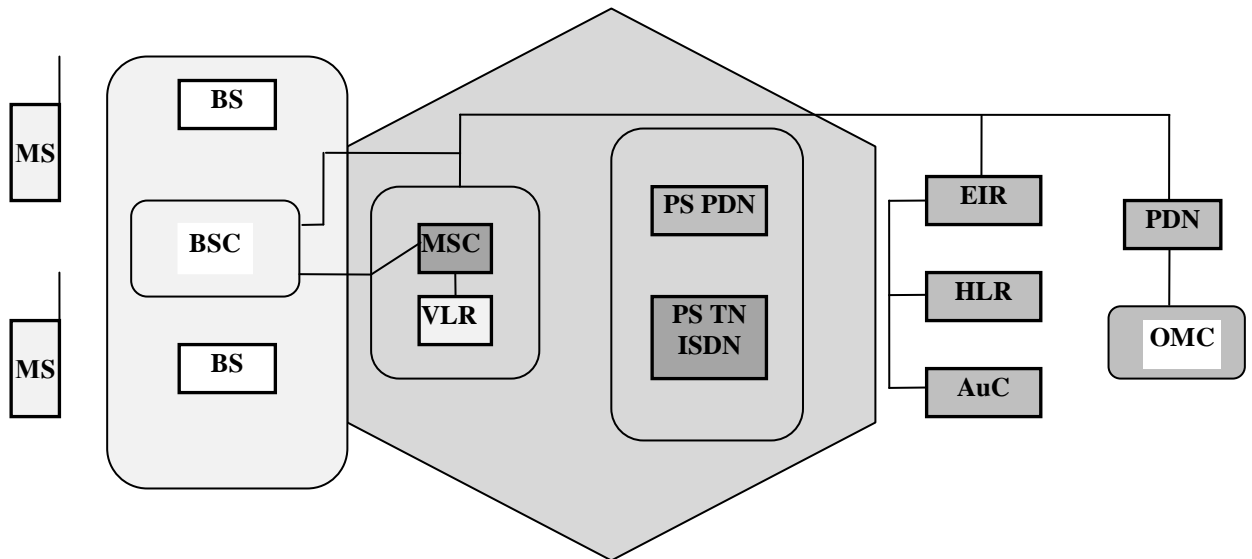


Рис. 1.4. Типова архітектура системи стільникового зв'язку

Система складається з мобільних пристроїв (MS), підсистеми базових станцій (BSS), представленої контролером (BSC) і трансіверами (BS, BTS), які забезпечують зв'язок з стільниками в межах покриття. Мережна підсистема (NSS) містить спеціальне устаткування комутації мобільних пристроїв (mobile switching equipment - MSC), що з'єднує всі системні елементи з телефонною комутованою системою (Public Switched Telephone Network - PSTN), ISDN і інформаційною комутованою мережею (Packet Switched Public Data Network - PSPDN). Реєстраційні записи Home & Visitor Locations (HLR/VLR) - бази даних, утримуючі дані абонента системи використовуються для керування (моніторингу) його пересуванням. Копії всіх секретних ключів абонента зберігаються в центрі аутентифікації (Au), а серійні номери мобільних пристроїв зберігаються в реєстраційних записах ідентифікації устаткування (equipment identity register - EIR). Всі системні компоненти управляються й контролюються із центра керування й підтримки (Operation and Maintenance Center - OMC).

### 1.3 Стільникові системи другого покоління

GSM - Глобальна система мобільного зв'язку.

Стандарт GSM був специфікований Європейським Інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI) у якості європейської цифрової стільникової системи мобільного зв'язку. Він виник, як відповідь на потребу в загальноєвропейському стандарті на заміну численних старих аналогових систем, таких як Nordic Mobile Telephone (NMT), Total Access Communication Systems (TACS). Дослідження в області створення цієї системи велися з початку 1980-х до їхньої середини, коли почався процес стандартизації. Попередньо було створено кілька різних реалізацій систем GSM. У Європі був виділений діапазон близько 900 Мгц і країни підписали договір взаєморозуміння, по якому вони зобов'язувалися розгорнути національні системи з можливістю роумінгу. Перша фаза стандартизації завершилася до 1990 р. - це основа сучасних мереж GSM, у ньому специфіковані всі основні послуги, що включають телефонію, термінові дзвінки, конференції, факсимільні повідомлення, короткі повідомлення, пересилання даних зі швидкістю до 9600 біт/с [2-4].

Архітектура мережі GSM у точності відповідає описаній вище.

Ключем до мобільності абонента є SIM-Карта (Subscriber Identity Module), за допомогою якої абонент може використовувати будь-який термінал (стільник), вставивши в нього свою карту. Вона містить всю інформацію про абонента й використовується для виконання основних функцій захисту - аутентифікації й генерації ключа для шифрування потоку даних.

GSM використовує восьмиканальний TDMA з FDD. У Європі для нього виділено два діапазони по 25 Мгц, при цьому виділяються канали по 200 Кгц. Дані модулюються GMSK із частотою 270 Кб/с. Кожний кадр TDMA складається з 8 часових слотів, що відповідають восьми незалежним фізичним каналам. Кожен фізичний канал може по черзі використовуватися декількома логічними каналами. Для боротьби з гіршими умовами передачі використовуються мінливі частотні стрибки. Крім того, реалізовані додаткові функції - контроль потужності та бази, і

стільника, МАНО - Mobile Assisted Handover, непостійна передача, що базується на визначенні мовних пауз.

Процес стандартизації усе ще триває, додаються нові функції у відповідності зі специфічними потребами користувачів. У містах використовується розширення GSM - DCS1800, що працює в діапазоні близько 1800 МГц, що використовує менш потужний сигнал і, відповідно, менший розмір зони. GSM постійно розвивається й зона його використання розширюється. Європейська система, GSM використовується більш ніж в 100 країнах. Але в деяких країнах, наприклад у США, Японії, триває розробка власних стільникових систем. GSM має конструктивні обмеження, які не можна повністю усунути без корінної переробки системи, і які вже починають позначатися в щільно заселених районах. Насамперед, це обмежене число можливих логічних одночасно працюючих каналів - тобто обмежене число користувачів. У результаті чого дуже гостро постає питання частотно-територіального планування. Для вирішення цієї проблеми розробляються міні і мікро зони з невеликими радіусами покриття. Але є й інші недоліки - відносно обриву зв'язку при хендоверах, мала швидкість передачі даних - тільки 9600 Кб/с. Пропоновані рішення занадто дорогі й не вирішують проблему в цілому. Тому, загалом кажучи, GSM не підходить на роль глобальної системи зв'язку. Це завдання вимагає незалежної розробки й зовсім іншої організації. Тому еволюція GSM операторів полягає у модернізації та приходу до зв'язку нового покоління на основі стандарту UMTS який використовує WCDMA.

#### **1.4 Комутація пакетів - системи третього покоління**

На початку XXI-го століття системи другого покоління перестали справлятися з масовим ростом попиту на послуги рухомого зв'язку. Вимоги користувачів потребують значно більшої пропускної спроможності, що може бути досягнута за рахунок переходу до стільників меншого радіуса й використання



більше високих несучих частот із широкою смугою пропускання. Системи рухомого зв'язку (СРЗ) наступного покоління повинні бути інтегровані з перспективними фіксованими (наземними) мережами, особливо із широкосмуговими цифровими мережами з інтеграцією служб (В-ISDN,IP). Це дозволить використання в СРЗ розроблених для фіксованих мереж транспортних технологій, мережної інфраструктури й протоколів, поряд з інтеграцією різноманітних додатків і послуг.

Метою створення системи UMTS проголошена інтеграція послуг рухомого зв'язку, але UMTS не підтримує всього спектру широкосмугових з'єднань. Ціль створення безпроводової моделі асинхронного режиму передачі (WATM, Wireless ATM) по проекту WAND (Wireless ATM Network Demonstrator) базується на інтеграції широкосмугових мереж фіксованого й рухомого зв'язку.

Впровадження UMTS повинно задовольнити потреби різних абонентів, від тих, хто має потребу в простих і дешевих терміналах для мовного зв'язку, до користувачів послуг мультимедіа в реальному масштабі часу. Система UMTS пропонує широкий набір послуг, у значній мірі, однак, оптимізований для передачі мови. Її розробка здійснювалася, головним чином, відповідно до дослідницької програми RACE (Research and Technology Development in Advanced Communications in Europe), що фінансувалася Комісією ЄС. Концепція UMTS була вперше проголошена в проекті рухомого зв'язку (R1043) програми RACE I і одержала подальший розвиток у проектах програми RACE II. Найбільш важливим з них для розробки системи UMTS був проект MONET (Mobile NETWORKS, R2066). Продовжується робота над проектами дослідницької програми ACTS (Advanced Communication Technologies and Services), що розвиває ідеї RACE. Стандартизація UMTS здійснюється ETSI. Сектор стандартизації зв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU-T) у цей час здійснює заходи щодо стандартизації аналогічної IMT-2000.

СРЗ UMTS призначена для реалізації додатків, що вимагають швидкостей до 2 Мбіт/с. Послуги UMTS повинні бути доступні абонентові незалежно від його розташування; у випадку відсутності стільникової радіомережі зв'язок

повинен бути забезпечений за допомогою низько орбітальних супутникових систем (LEO). Проте, не всі термінали системи UMTS будуть здатні використовувати послуги супутникового зв'язку. Надання послуг великій кількості різних користувачів вимагає від UMTS широкого діапазону підтримуваних середовищ і термінального абонентського устаткування. UMTS повинна однаково успішно використовуватися в офісах, в будинках й у транспортному засобі, у закритому приміщенні і на відкритому повітрі, у центрі великого міста та на вилученій малонаселеній території. Для UMTS виділено дві смуги частот: 1885-2025 МГц і 2110-2200 МГц. Застосовувані сьогодні діапазони порядку 900 і 1800 МГц цілком зможуть задовольнити більшість потреб у чисто телефонному сервісі, тоді як зарезервовані для UMTS ділянки спектра виявляться затребуваними новими послугами широкосмугового зв'язку. Відносно широка смуга частот і широке використання стільників малого радіуса (пікосот), що іноді не перевищують десятка метрів, забезпечує UMTS високу пропускну здатність. Безперервність зони обслуговування системи UMTS досягається за рахунок використання макростільника радіусом до декількох десятків кілометрів і LEO. Ширина смуг радіоінтерфейсів розподіляється в UMTS динамічно, відповідно до потреб термінального устаткування. Відповідно до програми RACE розроблено інтерфейси, засновані на множинному доступі з кодовим ( W-CDMA) і часовим (TDMA) поділом. Питання про використання того або іншого методу доступу (або обох) поки залишається відкритим. Рухливий термінал UMTS надає абонентові можливість з'єднання з мережею доступу й використання послуг системи UMTS. Основними функціями мережі доступу UMTS є функції, що ставляться до радіоканалу, наприклад хендовер і керування з'єднанням. До функцій базової мережі відноситься комутація й транспортування даних. Функції, пов'язані з рухливістю терміналу, реалізуються інтелектуальною мережею зв'язку. Типовими послугами ІСЗ для UMTS служать визначення місцезнаходження, аутентифікація й ін.

Грунтуючись на припущенні про еволюційний характер розвитку мережних і комунікаційних технологій, концепція UMTS припускає, що сучасні телефонні

мережі загального користування й мережі ISDN еволюціонують у бік широкопasmового варіанта ISDN ( B-ISDN), де як базовий механізм передачі трафіку між кінцевими пристроями передбачається використовувати транспортування осередків АТМ. До теперішнього часу вже почате дослідження питання про те, чи належні мережі асинхронної передачі мати тільки "фіксовану" реалізацію або, навпроти, для надання власникам мобільних терміналів того ж спектра послуг, що доступний користувачам мереж В-ISDN, необхідно застосовувати безпроводові мережі АТМ. Передбачається, що В-ISDN буде базовою мережею UMTS. Більшість варіантів інтеграції UMTS і В-ISDN по проектах UMTS орієнтовано на взаємодію двох мереж, а не на дійсну інтеграцію. Взагалі, фіксований термінал В-ISDN, що підтримує зв'язок з рухливим терміналом UMTS, не повинен знати що-небудь про рухливість цього терміналу. Ціль розробки UMTS, зокрема, полягала в тому, щоб мінімізувати вплив специфічних функцій мобільності на базову мережу. Для цього зазначені функції повинні бути розміщені в мережі доступу (абонентської мережі) і, по можливості, в інтелектуальній мережі зв'язку. Для з'єднання мережі UMTS з В-ISDN використовується інтерфейс користувач-мережа (UNI) АТМ. Рухливий абонент при звертанні до ресурсів базової мережі може використовувати специфічну для UMTS сигналізацію, "трансльовану" потім у сигнальні повідомлення відповідним чином модифікованого протоколу Q.2931+. По іншому варіанту сигналізація Q.2931+ могла б використовуватися повністю аж до рухливого терміналу [2, 6].

Терміни впровадження систем мобільного зв'язку третього покоління помітно відрізняються в різних регіонах земної кулі. Графік, якого має намір дотримуватися Японія, виглядає найбільше амбіційно: послуги мережі ІМТ-2000 повинні бути доступні вже в 2000 р., що фактично було втілено у жовтні 2001 року оператором DoCoMo у мережі і-mode. Підхід європейців відрізняється більшою помірністю: остаточні рекомендації були вироблені до кінця 1999р., а повномасштабне розгортання системи триває і сьогодні. Нарешті, американці демонструють у даній області найбільшу флегматичність, надаючи ринку

диктувати темпи прийняття нових стандартів. Так чи інакше, але системи ІМТ-2000 та UMTS у Європі вступили у експлуатацію.

За останні роки ситуація у фіксованих мережах значно змінилася - величезну популярність знайшла глобальна комп'ютерна мережа Internet. Internet по своїй суті є мережею, не орієнтованою на встановлення з'єднань, і тому в застосовуваних у ній протоколів і схем адресації мало загального з тими, що одержали прописку в широкосмугових мережах ISDN. Однак повсюдне поширення протоколу IP привело до того, що переважна більшість сучасних прикладних програм, орієнтованих на роботу з даними, залежить від доступності IP-сервісів, а поява протоколу Resource Reservation Protocol (RSVP), систем Internet-телефонії й поширення технологій мультимедіа помітно розширили доступність глобальної мережі для додатків реального часу. Сьогоднішні реалії такі, що організації, залучені в процес стандартизації технології UMTS, не можуть не розглядати Internet як ще один вид прикладного сервісу передачі даних між кінцевим устаткуванням, що повинен підтримуватися в мережі UMTS. Проте в цьому комунікаційному середовищі частина переваг UMTS або виявиться недоступна кінцевим користувачам, або відповідні послуги потрібно відтворювати на рівні протоколу IP.

### **1.5. Технологія LTE (Long-Term Evolution - довгостроковий розвиток)**

**LTE** - важливий етап в процесі переходу до мереж четвертого покоління 4G.

Безпроводові цифрові комунікації, бурхливо стартувавши, продовжують розвиватися надзвичайно швидко. Цьому сприяє неухильний прогрес в мікроелектроніці, що дозволяє випускати усе більш складні і при цьому, - усе більш дешеві - засоби безпроводового зв'язку. Бум 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 і локальні мережі, широко упроваджуються безпроводові мережі регіонального масштабу. Низька вартість, прудкість розгортання, широкі функціональні можливості по передачі даних, телефонії, відео потоків роблять безпроводові мережі одним з основних напрямлений розвитку телекомунікаційної індустрії.

Розвиток безпроводового зв'язку супроводиться неперервною зміною технологій, в основі яких лежать стандарти стільникового зв'язку GSM і CDMA, а також стандарти систем передачі даних IEEE 802 (рис.1.5).

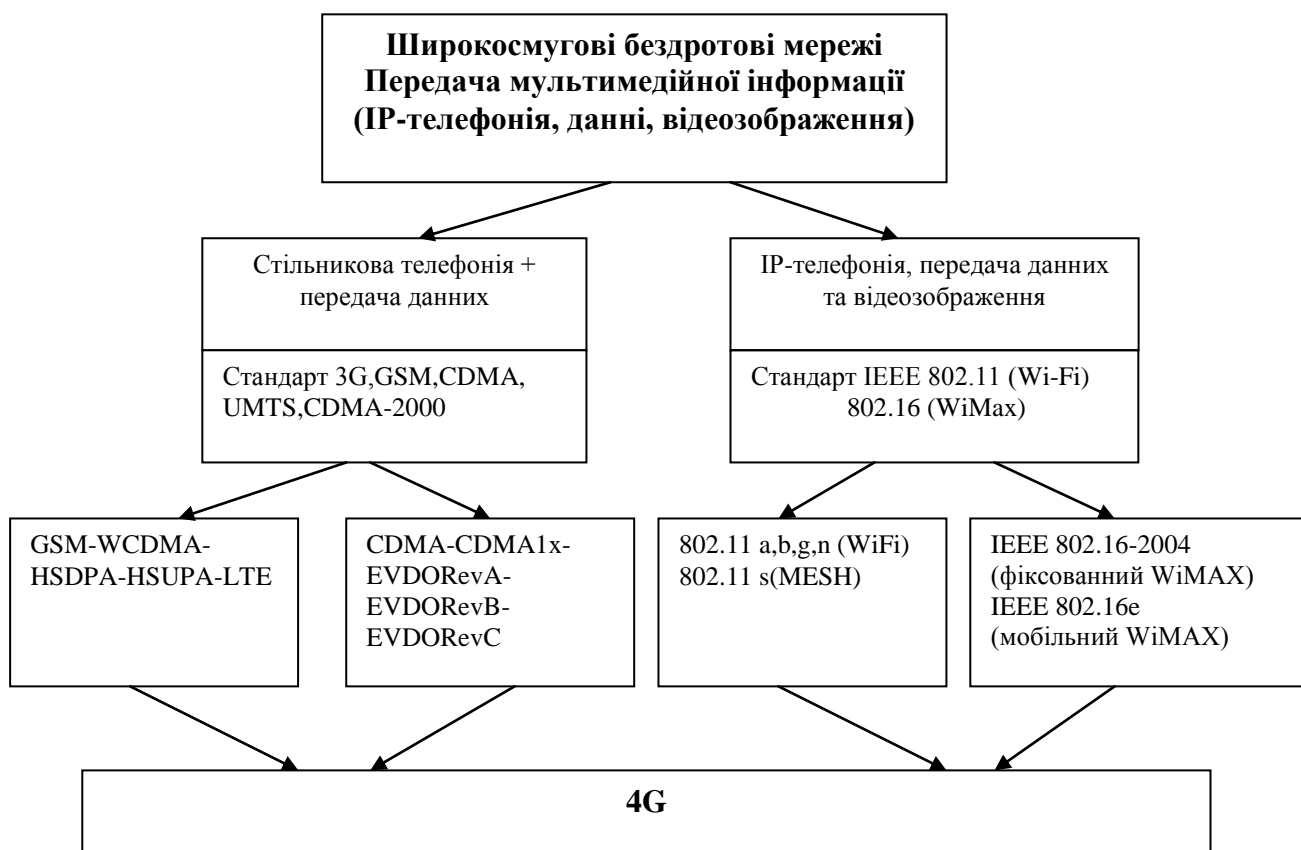


Рис. 1.5. Основні напрями розвитку технології широкопasmового бездротового зв'язку

Історично технології безпроводового зв'язку розвивалися по двох незалежних напрямках - системи телефонного зв'язку (стільниковий зв'язок) і

системи передачі даних (Wi-Fi, WIMAX). Але останнім часом спостерігається явна тенденція до злиття цих функцій. Більш того, об'єм пакетних даних в мережах стільникової зв'язку третього покоління (3G) вже перевищує об'єм голосового трафіку, що пов'язане з впровадженням технологій HSPA [4]. У свою чергу, сучасні мережі передачі інформації обов'язково забезпечують заданий рівень якості послуг (QoS) для різних видів 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 голосовому зв'язку, передачі мультимедійної інформації і тому подібне

Технологія фіксованого WIMAX (IEEE 802.16-2004) не виправдала надій, що поклалися на неї, по швидкодії, обсягу зони покриття і ціновим характеристикам. Але оператори справедливо чекають якісного прориву від мобільного WIMAX (IEEE 802.16e). Проте вимоги кінцевих користувачів до послуг, що надаються постійно підвищуються на рис. 1.6.

Мобільні мережі повинні використовуватися не лише для стільникового зв'язку, але і для передачі відео, мобільного ТБ, музики і роботи з Інтернетом з високими швидкостями і якістю передачі. Саме з цією метою в рамках проекту співпраці в створенні мереж третього покоління 3GPP (3G Partnership Project) була почата розробка технології LTE (Long-Term Evolution - довгостроковий розвиток).

Розробка технології LTE як стандарту офіційно почалося в кінці 2004 року. Основною метою досліджень на початковому етапі був вибір технології фізичного рівня, яка змогла б забезпечити високу швидкість передачі даних. Як основні були запропоновані два варіанта: розвиток існуючого радіо інтерфейсу W-CDMA (використовуємого в HSPA) і створення нового на основі технології OFDM. В результаті проведених досліджень єдиною відповідною технологією виявилася OFDM, і в травні 2006 року в 3GPP була створена перша специфікація на радіо інтерфейс Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Перші, попередні специфікації LTE створювалися в рамках так званого 3GPP Release 7. А в грудні 2008 року затверджена версія стандартів 3GPP (Release 8), фіксуючі архітектурні і

функціональні вимоги до систем LTE. У середині 2009 вийшли в світ перші дослідні системи на основі LTE, а в 2010 - перші комерційні мережі.

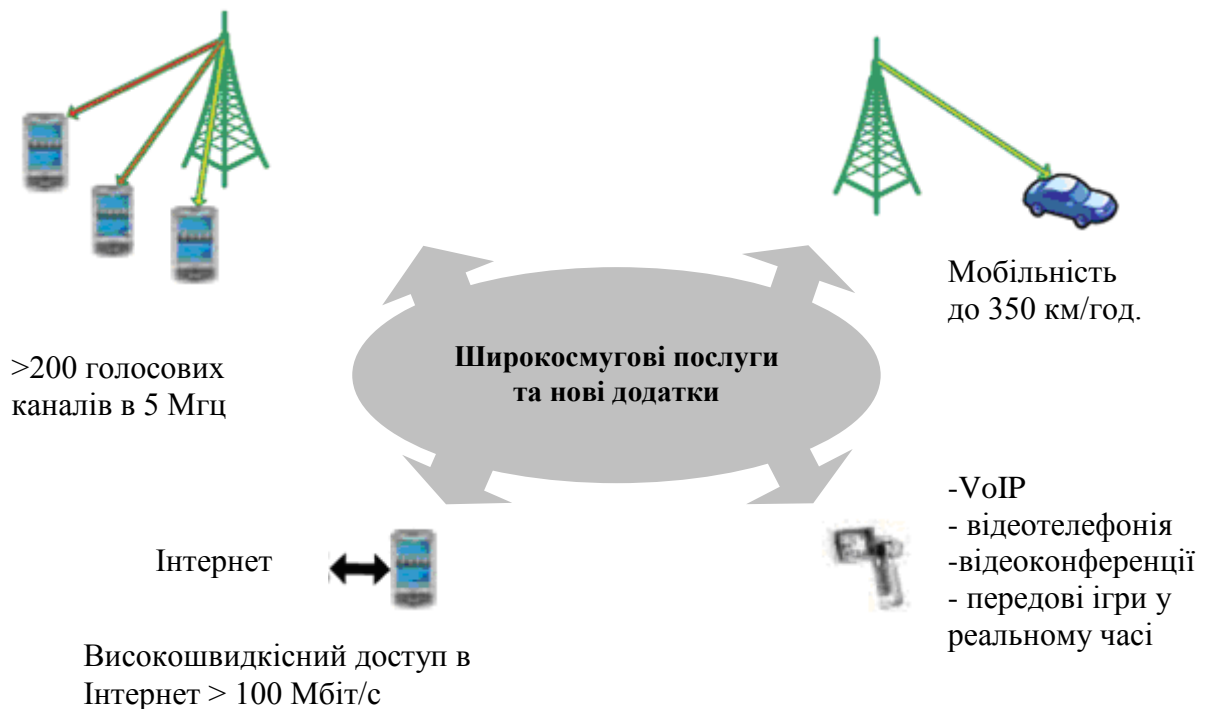


Рис.1.6. Широкосмугові послуги і нові застосування, стимулюючі еволюцію систем 3G

В порівнянні з раніше розробленими системами 3G, радіо інтерфейс LTE забезпечить покращені технічні характеристики. Зокрема, в LTE ширина смуги пропускання варіюється від 1,4 до 20 МГц, що дозволить задовольнити потреби різних операторів зв'язку, що володіють різними смугами пропускання. При цьому устаткування LTE повинне одночасно підтримувати не менше 200 активних з'єднань (тобто 200 телефонних дзвінків) на кожну 5-мгц соту. Також очікується, що LTE поліпшить ефективність використання радіочастотного спектру, тобто зросте об'єм даних, передаваних в заданому діапазоні частот. LTE дозволить досягти значних агрегатних швидкостей передачі даних - до 50 Мбіт/с для висхідного з'єднання (від абонента до базової станції) і до 100 Мбіт/с для низхідного з'єднання (від базової станції до абонента) (у смузі 20 МГц). При цьому повинна забезпечуватися підтримка з'єднань для абонентів, рухомих з швидкістю

до 350 км/год. Зона покриття однієї БС – до 30 км. в штатному режимі, але можлива робота з сотою радіусом більше 100 км. Підтримуються багатоантенні системи МІМО.

Радіоінтерфейс LTE позиціонується як рішення, на яке оператори поступово переходитимуть з нинішніх систем стандартів 3GPP і 3GPP2 [15, 16], а його розробка є важливим етапом в процесі переходу до мереж четвертого покоління 4G. Фактично специфікація LTE вже містить більшу частину функцій, що спочатку призначалися для систем 4G, тому її інколи іменують "технологією 3,9G".

Але розвиток технології LTE продовжується. Вже розробляються специфікації наступного покоління, так звані LTE-Advanced.



## 2 ОСНОВНІ ВИДИ ТА ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМ

### 2.1 Дослідження видів складних систем

Рівень економічного розвитку будь-якої країни на даний час визначається ступенем впровадження новітніх технологій. Особливе значення мають новітні технології, які окреслюють напрями науково-технічного прогресу. Характерною ознакою глобального ринку, що формується при цьому – це проникність процесів створення, обробки та передачі інформації. Системи мобільного радіозв'язку переживають етап динамічного зросту, зумовлений не тільки вимогами інформаційного обміну, але й можливостями новітніх технологій по забезпеченню тривалої якісної роботи засобів і мереж телекомунікацій у процесі їх постійного вдосконалення та розвитку. Відповідно набуває особливої ваги визначення та вирішення різноманітних наукових проблем і задач підвищення показників якості систем і пристроїв управління – від загальномережних та загальнооператорських задач оптимізації управління, пов'язаних з побудовою надійних, ефективних, гнучких структур до підвищення надійності, точності, швидкодії окремих компонент - систем управління та контролю їх ефективності [17, 18, 20].

В розділі розглянуто стан, перспективи використання сучасних систем зв'язку. Проведено системний аналіз видів систем: статичних (безінерційних) і динамічних (інерційних). Кожній з них як об'єкту дослідження властиві певні особливості, які характеризують різні сторони їхнього функціонування. При вивченні інтегральних якостей систем важливу роль відіграє цілісність, що відображає залежність між елементами. Коли вивчається здатність системи реагувати на вхідні впливи, то визначається така властивість як причинність. Розподіл впливів на керуючі (корисні) і збуджуючі діяння (негативні) дає можливість визначити керованість, стійкість і здатність адаптуватися. До основних структурних характеристик належать зв'язність і складність систем. Проведення досліджень основних властивостей систем зв'язку і визначення їх

характеристик дають змогу ефективно підвищити показники якості систем управління телекомунікаційних мереж України.

### 2.1.1 Статичні системи

Система  $S$  називається статичною (безінерційною) тоді й тільки тоді, коли значення її вихідної величини  $y(t)$  в будь-який момент часу залежать виключно від поточного значення вхідного впливу  $x(t)$  і стану  $z_0(t)$ , з якого почалася еволюція системи [6, 7, 19]. При цьому, якщо знімаються вхідні впливи  $x(t)$ , коли  $z_0(t) \equiv 0$ , така система негайно переходить у стан рівноваги. З використанням логічних операцій статична система визначається виразом

$$(x, y) \in S \Leftrightarrow \exists z_0, \quad \forall t y(t) = K_t(z_0, x(t)), \quad (2.1)$$

що інтерпретується в такий спосіб: система, у якої визначені значення входів і виходів ( $x$  і  $y$ ) буде тоді й тільки тоді статичною системою  $S$ , коли існує початковий стан  $z_0$ , який належить до множини можливих початкових станів  $z_0$  і для всіх моментів часу  $t$  вихідна реакція  $y(t)$  визначається початковим станом  $z_0$  і вхідними впливами  $x(t)$ , які забезпечують відображення  $K_t$  в цю вихідну реакцію  $y(t)$ .

Інакше кажучи, статична система  $S$  є безінерційною. У ній відсутні перехідні режими при впливі на систему збуджуючих діянь на вході. Не слід плутати зі статичним врівноваженим станом інерційної або динамічної системи, що перебуває в стані спокою після перехідних процесів. Статичні системи є певною абстракцією реальних систем, яким властиві інерційність і динамічні перехідні режими. Часто статичні системи є одночасно й системами без пам'яті, тобто системами, у яких початковий стан  $z_0$  однаковий й відповідно  $K_t(z_0, x(t)) = K_t(x(t))$ .

### 2.1.2 Динамічні системи

Динамічною називається інерційна (не статична) система, у якої визначені функції переходу станів  $f(t)$  і вихідної реакції  $g(t)$ . Це можуть бути в загальному випадку функціонали [5, 7,13].

Стаціонарними динамічними називають клас динамічних систем, стан і структура яких не залежить від того, у який момент часу буде розглядатися вплив. Про них говорять, що ці системи інваріантні відносно часового здвигу

$$\forall t' F^t(x(t, t')) = F^t(x(t' - t)), \quad (2.2)$$

тобто для кожного моменту часу  $t'$  можна визначити оператор зрушення часу  $F^t$  такий, що реакція системи на вхідний вплив у момент часу  $t'$  залежить тільки від розходження між часом його початку й поточним часом, а не від поточного часу, при цьому  $t \leq t' \Leftrightarrow t' - t \geq 0$ .

Для стаціонарної системи  $S \subset X \times Y$ , де  $x \in X$ ,  $y \in Y$  - впливи й реакції є стаціонарними, якщо

$$\begin{cases} (\forall t)(X_t = F^t(X)) \\ (\forall t)(Y_t = F^t(Y)) \end{cases} \quad (2.3)$$

Важливою властивістю стаціонарних (інваріантних у часі) систем є те, що функцію перехідного стану для будь-якого моменту часу можна одержати як результат застосування оператора здвигу до початкової реакції системи.

Адекватним описом математичної моделі динамічної системи є диференціальне рівняння

$$\frac{dx(t)}{dt} = F(x(t), t, u(t)), x(0) = x_0, \quad (2.4)$$

де  $x(t) \in X$  - множина станів системи;  $u(t) \in U$  - множина збуджуючих впливів. Перша похідна  $dx(t)/dt$ , яка характеризує швидкість зміни станів системи, може дорівнювати нулю, що відповідає стану спокою системи, вона може дорівнювати негативній або позитивній величині, тому що це рівняння може мати праву частину, яка змінюється

$$\frac{dx(t)}{dt} = Fx(t), x(0) = x_0. \quad (2.5)$$

При  $F > 0$  система поводитья збуджено, нестабільно, при  $F < 0$  вона повертається в стан спокою, її поведінка стабільна

$$x(t) = x_0 e^{-Ft}. \quad (2.6)$$

Очевидно, при  $F \equiv \infty$  динамічна система стає статичною, при відліку від  $\infty$  до 0 інерційність зростає, при  $F \equiv 0$  система стає нерухливою, у стані спокою.

Тому, теорія диференціальних рівнянь може бути застосована в теорії динамічних систем і цей математичний апарат є досить продуктивним, добре відпрацьованим. Проаналізуємо лише деякі положення цієї теорії. Так диференціальне рівняння першого порядку типу (2.5) з вільним членом у вигляді збудженого зваженого білого Гауссівського шуму  $\xi(t)$  носить назву стохастичного рівняння стану і записується

$$\frac{dx(t)}{dt} = F(x(t)) + G(x(t), t)\xi(t), x(0) = x_0, \quad (2.7)$$

де  $G(\bullet)$  - коефіцієнт збурювання, що впливає на величину дисперсії стану  $x(t)$  даної динамічної системи.

На рис. 2.1 наведена структурна схема формуючого фільтра, процес на виході якого відповідає стану динамічної системи, аналогічної (2.7), але замість  $F(x(t), t)$  і  $G(x(t), t)$  враховані відповідно  $F(t)$  і  $G(t)$ .

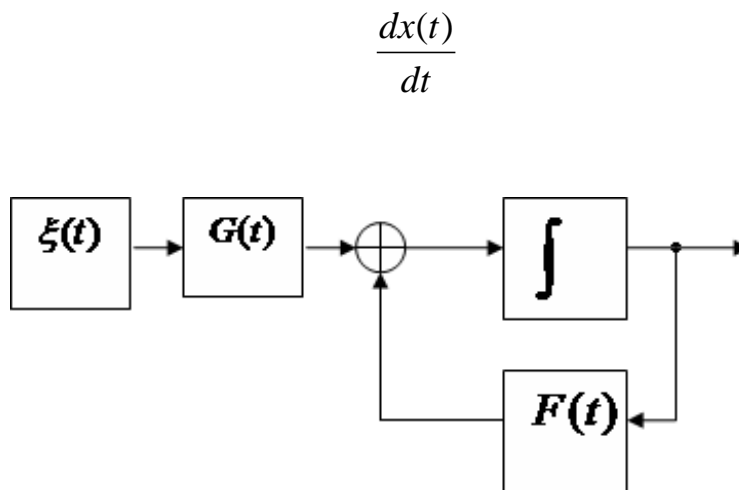


Рис. 2.1. Структурна схема формуючого фільтра

Стан динамічної системи легко моделюється за допомогою ЕОМ, де рівняння стану (2.10) відтвориться в рекурсивному виді

$$X(k+1) = \Phi(k, k+1)x(k) + \Gamma(k, k+1)\xi(k), \quad (2.8)$$

де  $\Phi(k, k+1)$  і  $\Gamma(k, k+1)$  так, як і для стану з безперервним параметром (2.7), називають коефіцієнтами відповідно стану та збурювання. Їх аналітичний вид

$$\Phi(k, k+1) = \exp(-\alpha|\tau|), \quad (2.9)$$

$$\Gamma(k, k+1) = \sqrt{\sigma^2 \Phi(k, k+1)(1 - \Phi(k, k+1))^2}, \quad (2.10)$$

де  $\alpha = \frac{1}{\tau_{xop}}$ ,  $\tau_{xop}$  - інтервал кореляції випадкового стану системи.

## 2.2 Властивості систем

### 2.2.1 Цілісність

Цілісність є однією із найхарактерніших властивостей систем, що проявляється у виникненні нових інтегральних якостей, не властивих для утворюючих систему компонентів. Так, властивості системи зв'язку щодо забезпечення стійкості й інших показників є не тільки простою сумою властивостей елементів, з яких вона складається [10-12]. І в системах живої природи (мурашників, бджолиних родин, а також груп людей, націй і т.п.) системні властивості також не є простою сумою властивостей індивідуумів. Властивості цілісності проявляються в системі із двох основних сторін:

- властивості системи як цілого не зводяться до суми властивостей елементів або частин;
- властивості системи як цілого залежать від властивостей елементів і частин, модифікація однієї частини викличе модифікації у всіх інших частинах та у всій системі.

Істотним проявом властивостей цілісності є нові взаємини системи як цілого з навколишнім, відмінні від взаємодії окремих елементів із цим оточенням. Властивість цілісності пов'язане з метою, для виконання якої призначена система.

Системи можуть мати альтернативну цілісності властивість - фізичну адитивність, незалежність. Властивість фізичної адитивності (незалежності елементів) проявляється в системі, яка ніби розпалася на незалежні елементи. Тому у випадку, коли всі елементи стають незалежними, то говорити про систему немає змісту. Таким чином, будь-яка система перебуває між двома крайніми станами: абсолютною цілісністю, що досягається при максимальному зв'язку між елементами, і абсолютною адитивністю, коли ці зв'язки відсутні.

Термін "склеєнність" елементів систем підкреслює їхню взаємозалежність. Іноді, розглядаючи еволюцію систем, вводять такі поняття, як факторизація (прагнення системи до стану з усе більш незалежними елементами) і прогресуюча систематизація, цілісність (прагнення системи до більшої цілісності, до зростання залежності між елементами).

### 2.2.2 Причинність

Причинністю (каузальністю) називають властивість систем, що визначає залежність вихідної реакції в будь-який момент часу винятково від вхідних впливів. Тобто властивість системи реагувати тільки на існуючі, а не на майбутні впливи. Із причинністю пов'язані властивості непередбачуваності й попередньої обумовленості. У непередбачуваній системі модифікації вихідної реакції не можуть випереджати зміни вхідного впливу. Відсутність попередньої обумовленості означає існування такого часу  $t' \in T$ , що для будь-яких  $t \geq t'$  майбутня еволюція системи визначається винятково попередніми спостереженнями й немає жодної потреби звертатися до будь-яких допоміжних множин типу початкових умов. Вихід  $y(t)$  непередбаченої системи можна визначити, знаючи тільки поточний стан системи  $z(t)$  і поточне значення вхідного впливу  $x(t)$ .

У техніці причинність виступає як властивість фізичної реалізації пристроїв або систем.

### 2.2.3 Керованість

Важливими характеристиками динамічних систем, тобто систем, які змінюються в часі, а також систем, у яких цей стан допускається, є керованість, спостереження, здатність систем ідентифікуватися й адаптуватися.

Існують досить строгі визначення даних понять щодо кібернетичних систем, які формалізуються. Перераховано властивості багатьох організаційно-технічних систем, у тому числі й систем зв'язку, властивості яких складні щодо формалізації, але мають аналогічну суть.

*Керованість* є головною серед перерахованих властивостей систем. Вона визначається як умова можливості переведення системи з одного стану в інший за заданий час або при виконанні інших заданих обмежень (за один крок, або за кілька кроків, з мінімальною витратою енергії на керування, переведення в новий стан, за заданою траєкторією та ін.). Керуючим впливом  $u(t)$  звичайно виступає сигнал, що впливає на керований пристрій або регулятор, чим і досягається бажаний кінцевий стан системи. Якщо керуючий вплив  $u(t)$  формується у відповідному пристрої, то говорять про автоматичне керування. Разом з тим, керуючі впливи можуть бути сформовані й самою системою. У цьому випадку говорять про ситуаційне керування. Якщо ж дане керування здійснюється з використанням засобів автоматизації, ЕОМ, то це - автоматизоване керування. Очевидно, реалізація кінцевої задачі керування можлива за певних умов або властивостей системи. Цими необхідними умовами або властивостями саме і є спостереження і здатність ідентифікуватися.

Існує більше 30 варіантів визначення керованості в теорії автоматичного керування. Багато при цьому залежить від того, з якого початкового стану  $x(0)$  і в який кінцевий  $x(t) = x_0 + \Delta x(t)$  переводиться система, і яким чином (за один такт  $u = u_0 + \Delta u$ ) або по складній траєкторії  $u(t) = u_0 + \Delta u(t)$  завдяки оптимальному керуванню  $\Delta u(t)$  досягається кінцева мета. Наприклад, визначення керованості по Калману: необхідною й достатньою умовою керованості для лінійної системи, що описується диференціальним рівнянням

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t), \quad (2.11)$$

де  $A$  і  $B$  матриці розміром відповідно  $n \times n$  і  $n \times r$  є залежність



$$\text{rank} \left[ B \mid AB \mid A^2 B \mid \dots \mid A^{n-1} B \right] = n. \quad (2.12)$$

Це значить, що в системі не повинно бути координат, щодо яких не було б виділено відповідних керуючих впливів. Іншими словами вся кількість координат  $x_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , всі  $n$  рівнянь повинні бути керовані, інакше може залишитися один або кілька некерованих параметрів (елементів) системи, внаслідок чого не буде можливості перевести цю систему в необхідний кінцевий стан.

Спостереження є необхідною умовою синтезу керування системою. Ця властивість характеризує пряму й непряму можливість виміру параметрів, які беруть участь у формуванні керуючих впливів. Інакше кажучи, спостереження досягається, коли до керуючого центру надходить необхідна інформація про стан системи. Щодо систем зв'язку, де допускається реалізація будь-якого керування режимами з метою забезпечення необхідних вимог, спостереження досягається, якщо по каналах телеконтролю або службового зв'язку до керуючого центру надходить інформація про стан каналів зв'язку, технічного стану апаратури та ін. З використанням даної інформації формується керуючий вплив.

*Спостереження* або вимірність є необхідною складовою частиною керування. Для спостерігача, що вимірює відповідні сигнали або стан системи, інформація, що його цікавить, може надходити у вигляді безперервної  $y(t)$  або дискретної в  $y(k), k = 1, 2, 3, \dots, n$ , функцій. Зокрема ця інформація може мати разове значення  $y_0$ . Із самою величиною, що вимірюється, або функцією  $x(t)$  спостережувана інформація може бути зв'язана лінійно

$$y(t) = H(t)x(t) + \xi(t), \quad (2.13)$$

або нелінійно

$$y(t) = h(x(t), t) + \xi(t), \quad (2.14)$$

де  $H(t), h(x(t), t)$  - функції спостереження, що враховують масштаб (посилення або ослаблення), а також інші особливості засобу виміру;

$\xi(t)$  - похибка (шум) спостереження, що часто апроксимують білим Гауссівським шумом з нульовим середнім.

Рівняння спостереження (2.13), (2.14) для дискретного лінійного випадку має вид

$$y(k) = H(k)x(k) + \xi(k), k = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2.15)$$

для нелінійного

$$y(k) = h(x(k), k) + \xi(k). \quad (2.16)$$

Рівняння (2.15 та 2.16) можуть мати й більш простий вид, наприклад, коли  $H(t) \cong 1$ , то  $y(t) = x(t) + \xi(t)$ . Якщо похибки (шум) виміру відсутні, то  $y(t) = H(t)x(t)$ . Їх вид може бути й складнішим, наприклад тоді, коли ставиться задача керування результатами спостереження. Така задача характерна для рішення власних проблем ЕМС (електромагнітна сумісність), коли є можливість управляти іншими, крім як своїми власними, параметрами. У цьому випадку, якщо  $X(t)$  параметри сигналів на вході радіоприймача, (наприклад, просторово-поляризаційні параметри), то рівняння спостереження може мати вид

$$y(t) = H(t)x(t) + B(t)u(t) + \xi(t), \quad (2.17)$$

де  $B(t)u(t)$  - керуюче доповнення, що переводить систему  $x(t)$  в інший стан, заданий відповідним критерієм.

Функції  $y(t)$  або  $y(k)$  можуть набувати як скалярний, так і векторний вид, при цьому умови спостереження, як і умови керованості, пов'язані з відповідністю розміру координат системи й спостерігача [1,5, 16].

Умови спостереження і самі рівняння спостереження знаходять втілення не тільки в керованих системах, але й у контрольованих, до яких також належать частина систем передачі, лінії зв'язку, зразки апаратури і їхні елементи. При цьому результати спостереження (виміри) використовуються в ергатичних системах. У цьому випадку результати виміру варто оцінити, дати їм статистичну оцінку.

У ролі статистичних оцінок може бути використано вибіркове середнє значення або вибіркова дисперсія

$$\hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1,2,\dots,n} x_i, \quad (2.18)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2, \quad (2.19)$$

де -  $n$  об'єм вибірки;  $x_i$  - виміри.

Оцінка може бути отримана з використанням рекурсивних процедур Робінса-Монро або, якщо спостерігається процес, то процес Калмана-Бьюсі.

Розглянемо вироджений випадок, коли умови спостереження не виконуються, хоча система й керована, і спостерігається. Це адаптивні антенні ґрати,  $n$  - канална система на вході переводиться в одноканальну систему на виході. Але завдяки цієї виродженості вдається виключити зі спостереження завади, які діють на  $n$ - входах.

Система може бути спостережувана, але форма спостереження або інформація, що надається, може виявитися такою, що прийняття відповідного рішення для керування все-таки не вдається. Так, інформація про те, що сигналізує індикатор "Зв'язок" ще не говорить про дійсну наявність зв'язку. Або інформація

про те, що вийшла з ладу деяка ділянка радіорелейної лінії не є повною, тому що ця несправність може бути обумовлена великою кількістю різноманітних причин - завадами, умовами поширення радіохвиль, технічним станом апаратури та ін. Виникає проблема ідентифікації спостережень.

Здатністю ідентифікуватися називається властивість системи, що характеризує можливість визначення параметрів системи за результатами спостережень. Іноді говорять про здатність ідентифікуватися математичної моделі системи, коли намагаються досягти адекватності її з реальною системою. Для задач ідентифікації використовують різноманітні статистичні методи: точкові або кускові (інтервальні) методи оцінки параметрів, стохастичної апроксимації, регресії, прогнозу та інші.

Успішність ідентифікації багато в чому залежить від того, яким чином змінюються параметри  $\{a\}$ , які ідентифікуються в системі  $S(x)$ . Для системи, що описується рівнянням стану

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, a, t) \quad (2.20)$$

і рівнянням спостереження

$$y = h(x, u, a, t) \quad (2.21)$$

найбільш придатними необхідними умовами для ідентифікації є

$$\frac{da(t)}{dt} = 0, \quad (2.22)$$

що відповідає випадку системи з постійними параметрами, які підлягають ідентифікації.

Найпростішим і розповсюдженим випадком є такий, коли задача ідентифікації вирішується разом з оцінкою стану системи. Ця оцінка  $\hat{x}(t)$  може

бути отримана знову за допомогою рекурсивних процедур типу Робінса-Монро, Калмана-Бьюси або інших. Разом з оцінкою  $\hat{x}(t)$  за допомогою аналогічних процедур можна оцінювати й  $\hat{a}(t)$ . Об'єднавши обидві оцінки  $\hat{x}(t)$  і  $\hat{a}(t)$ , одержимо вектор

$$\hat{\vec{x}}(t) = \left\{ \begin{array}{c} \hat{x}_i(t) \\ \hat{a}_i(t) \end{array} \right\}, i = \overline{1, n}, \quad (2.23)$$

який і необхідно оцінювати.

Для одержання оцінки (2.23) необхідно, щоб відповідно до вектора  $\hat{\vec{x}}(t)$  виконувалися умови спостереження з рівняння (2.21), тобто звертаємося в цьому випадку до умов спостереження.

Розглянемо приклад процедури Робінса-Монро для спостережуваної системи відповідно до рівняння

$$y(k) = Hx(k) + \xi(k),$$

де всі складові відповідають фізичному змісту (2.13), (2.15) або (2.21). Ця процедура оцінки описується залежністю

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + z(k)(y(k) - H\hat{x}(k)), \quad (2.24)$$

де  $z(k)$  - коефіцієнт, що обумовлює прагнення процедури до постійного стану. Найпростіший вид він має, коли  $z(k) = \frac{1}{k}$ . Взагалі цей коефіцієнт повинен відповідати умовам Дворецького, коли

$$\sum_{k=1}^{\infty} z(k) \rightarrow \infty; \sum_{k=1}^{\infty} z^2(k) < \infty.$$

Але практика показує, що процедура (2.24) також непогано збігається і при  $z(k) = \text{const} < 1$ . У задачах адаптації часто використовують рівняння Уїдроу-Хоффа, що майже збігається з (2.24),

$$\hat{w}(k) = \hat{w}(k-1) + z(k)(y_{on}(k) - H(k)\hat{w}(k-1))H(k), \quad (2.25)$$

де  $y_{on}(k)$  - опорний, еталонний сигнал;  $\hat{w}(k)$  - ваговий коефіцієнт.

У цих задачах можна брати  $z(k) = (1 \dots 0, 1)$ , що обумовлює швидкість прагнення процедури.

Часто не відокремлюють здатність ідентифікуватися від спостережності, вважаючи першу складовою останньої. Однак складність і важливість задачі ідентифікації обумовлює дослідження її як постійної науково-технічної проблеми.

Здатність системи адаптуватися - властивість, що визначає здатність забезпечувати необхідний режим функціонування в умовах невизначеності стосовно зовнішніх впливів. Адаптованість системи дає можливість підвищити її стійкість. Здатність адаптуватися часто інтерпретується як властивість самоорганізації системи. Адаптивна система повинна бути керованою, спостережуваною та здатна до ідентифікації стосовно самої себе, а також спостережуваною і здатною ідентифікуватися стосовно зовнішніх впливів.

Існує два види адаптивних систем. Адаптивність систем першого виду досягається за рахунок такого вибору внутрішніх станів і режимів окремих елементів, які при різних непередбачених, небажаних впливах або випадкових, невизначених модифікаціях якихось характеристик забезпечують необхідне цілеспрямоване функціонування даної системи. При цьому структурні модифікації не допускаються. Така система вважається гомеостатично-

адаптивною системою. Якщо ж стосовно різних впливів або модифікацій у системі припустима наявність її структурних модифікацій, то така система називається морфо-генетичною адаптивною системою.

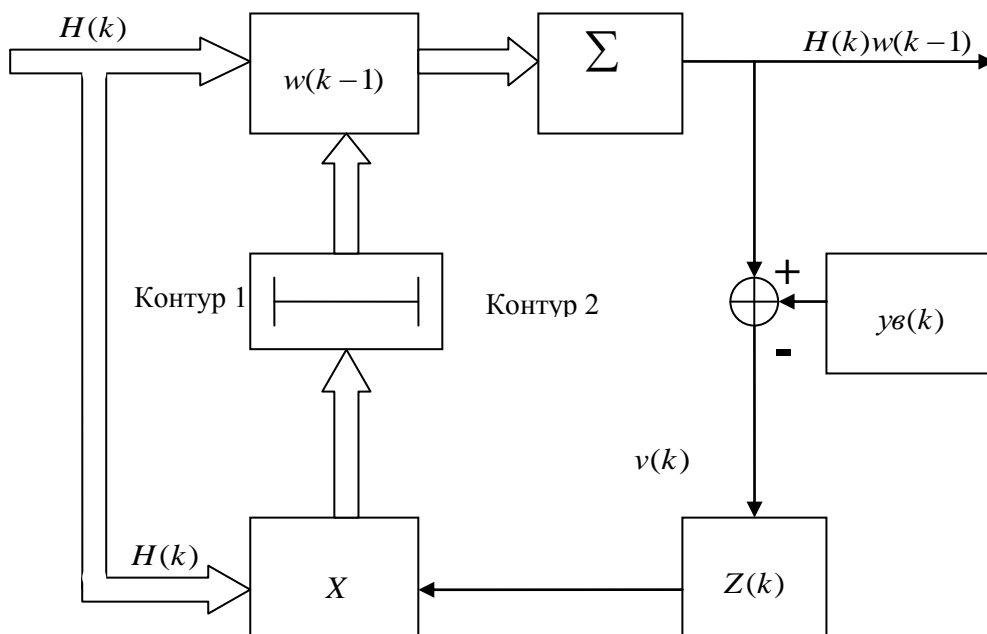


Рис. 2.2. Адаптивна процедура Уідроу-Хоффа

Можливі адаптивні режими в системі передбачаються на етапі її створення, тобто система повинна створюватися як адаптивна. У цьому випадку можуть бути використані не тільки одноконтурні засоби адаптації, але й багатоконтурні, коли адаптивною виконується сама підсистема адаптації.

На рис. 2.2 представлена адаптивна процедура оцінки вагових коефіцієнтів  $\hat{w}(k-1), i = 1, 2, 3, \dots, n$ , число яких може бути різним залежно від розмірності сигналів на вході  $H(k)$ . Але вихідний сигнал  $y = H(k)\hat{w}(k-1)$  - скалярний. У цій процедурі є два контури керування. Контур I - керування "вперед" (за принципом Понселе), контур II - керування по відхиленнях від опорного сигналу  $y_{on}(k)$  по незв'язуванню  $v(k)$  (керування за принципом Уайта). Процедура виконується постійно при  $z(k)$ , що відповідає зазначеним вище обмеженням і набуває відповідно із критерієм МСКВ (мінімального середньоквадратичного

відхилення) значення, які задаються еталонним сигналом  $y_{on}(k)$ , МСКВ  $(y - y_{on}(k))^2 \rightarrow 0$ . Такі алгоритми використовуються в адаптивних антенах, наприклад, у системах GSM-900, антени цих систем носять назву інтелектуальних.

Здатність адаптуватися в систему закладають залежно від очікуваних впливів або модифікацій. Якщо ці впливи або модифікації виходять за рамки застосованих програм, то така система не може вважатися адаптивною. Тобто, коли говорять про здатність адаптуватися, то необхідно уточнювати, до якого класу впливів або модифікацій ця здатність належить. Так, (2.25), представлена на рис. 2.2, адаптивна щодо сигналів (завад), які не збігаються з еталонним сигналом  $y_{on}(k)$ , а також щодо деяких відхилень у поширенні радіохвиль. Система не може вважатися адаптивною щодо швидкості передачі інформаційних сигналів або перепадів в енергоспоживанні.

У більшості випадків на практиці систему необхідно не тільки спостерігати або досліджувати, але й домагатися одержати в результаті її функціонування корисних властивостей. Здатність системи функціонувати певним чином звичайно оцінюється по характеру або видам реакції на її виході.

Коли адаптація стосується простих систем, таких як приймачі, їхні блоки, окремі комплекси, то критерії досить просто формалізуються. Наприклад, у процедури (2.25) критерій МСКВ  $\gamma^2(k) = (y_{on}(r) - y)^2$  очевидний і досить простий. Щодо системи зв'язку - це такі "вихідні" характеристики як своєчасність доставки повідомлення, вірогідність прийому та ін. При цьому умови, які визначають її стан, тобто чи має система деякі властивості або ні, виражаються в існуванні відповідних певних впливів. Для оцінки якості функціонування  $S \subset X \times Y$  необхідно розглядати деяку оцінювану функцію (критерій якості)  $\Phi$ , яку визначимо як відображення вихідної реакції  $Y$  на деяку оцінювану множину  $U$ :

$$\Phi: X \times Y \rightarrow U^{(k)} \quad (2.26)$$



де  $U^{(k)} = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_k = x(U_1 : t \in I_k), I_k 1, 2, \dots, k$ .

Якщо  $k = 1$ , то задача оцінки – однокритеріальна, якщо  $k = 2, \dots, k$ , тоді багатокритеріальна, сама система при цьому також багатокритеріальна. Оцінки якості, які одержують,  $v \in V^{(k)}$  характеризують систему при заданих вхідних впливах  $X$ . Однак для того, щоб система була керованою, необхідно в множині  $x$  виділити підмножину  $U$  керуючих впливів. У цьому випадку (2.25) має вид  $\Phi : M \times U \times Y \rightarrow V^{(k)}$ , де  $M$  - підмножина множини  $X$  залишкових вхідних впливів.

Система  $S \subset M \times U \times Y$  вважається керованою щодо множини  $V' \subset V$ , коли для заданого класу вхідних впливів  $m \in M$  може бути знайдено керування  $u \in U'$ , що дасть можливість одержати потрібну оцінку якості  $u \in V'$ . Або те ж саме з використанням логічних операцій:

$$(\forall v)(\forall u) \left[ u \in V' \mid U u \in U \Rightarrow (\exists m)(f(m, n)) = u \right] \quad (2.27)$$

Іншими словами, керованість - це властивість, що гарантує можливість досягнення заданої якості при будь-яких зовнішніх впливах.

Для багатокритеріальних систем визначається властивість «склеєності», коли задана оцінка  $u_i \in V^{(t)}, i = 1, 2, \dots, k$  може бути досягнута лише в об'єднанні з іншими оцінками. Така властивість проявляється в тому випадку, коли між будь-якими компонентами оцінюваного об'єкта  $V^{(k)} V_1 \times V_2 \times \dots \times V_k$  існує який-небудь внутрішній взаємозв'язок, чим і пояснюється термін «склеєність». Такі властивості «склеєності» мають і відповідні оцінки, оскільки тут не тільки самі елементи (вузли зв'язку) є залежними один від одного, але й оцінки, які характеризують їх якість, один з одним мають як функціональні, так і ймовірнісні зв'язки [8,19].

Поняття "склеєності" відіграє важливу роль у теорії керованості систем: для декартових множин наслідком "склеєності" є керованість. Оскільки декартовий добуток двох множин - це третя множина всіх упорядкованих пар, то

система зв'язку завдяки своїй структурі може бути віднесена до такої ж множини. Разом з тим для забезпечення керованості крім позначених структурних властивостей потрібний ще й відповідний ресурс, що дасть можливість одержати гарантовану якість при будь-яких зовнішніх впливах.

### **3 ОПТИМІЗАЦІЙНІ МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ РОЗМІЩЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РУХОМИХ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ**

#### **3.1 Дослідження синтезу систем радіозв'язку в рамках рішення проблеми електро-магнітної сумісності**

Як уже відзначалася, проблема EMC (далі електромагнітна сумісність) у ЗРЗ (далі засоби радіозв'язку) виникає в більшості випадків внаслідок того, що проектувальники при створенні або оператори при обслуговуванні ЗРЗ розміщують елементи ЗРЗ і вибирають їхні режими не оптимально. При інших умовах ця проблема б не виникала. Тому природно поставити задачу оптимізації для рішення проблеми EMC ЗРЗ, що для ЗРЗ особливо складна. Можна стверджувати, що проблема EMC - проблема неоптимального використання ЗРЗ.

При вирішенні задачі оптимізації виникає ряд принципових питань, основними серед яких є:

- коли й на яких етапах варто вирішити цю задачу із врахуванням того, що головними етапами можуть бути: проектування системи, пуско - наладка, експлуатація ЗРЗ;
- які математичні моделі ЗРЗ і на яких етапах раціонально використати, для того щоб найбільш адекватно відобразити специфіку кожного окремого конкретного етапу й одержати корисні властивості системи на завершальному етапі експлуатації;
- які методи оптимізації виявляться більше ефективними для обраних математичних моделей ЗРЗ, тому що залежно від вибору критерію, області припустимих значень й обмежень кінцеві результати можуть виявитися досить різноманітними;
- як практично виконати процедуру оптимізації, щоб її реалізація виявилася недостатньо витратної, щоб вона давала помітний приріст ефективності ЗРЗ.

В третьому розділі представлено дослідження цих питань.

Проблема забезпечення оптимізації системи при розгляді її із системних позицій може виникати внаслідок того, що або сама система ЗРЗ була створена без глибокого пророблення внутрісистемних задач (проблема внутрісистемної ЕМС), або різноманітні взаємодіючі системи створювалися без врахування інтересів радіоелектронної мегасистеми (проблема міжсистемної ЕМС). Така ситуація виникає не тільки через те, що проектувальники, які створюють системи, не виходять із системних позицій, але також і тому, що окремі елементи системи часто створюють різні відомства, виробники із різних країн. Все-таки проблему ЕМС необхідно вирішувати, і це в більшості випадків доводиться робити вже на етапі експлуатації ЗРЗ. Останнє особливо характерно для сучасного стану розвитку народного господарства й використання ЗРЗ, тому що найчастіше на Україні доводиться застосовувати готові, як правило, закордонні ЗРЗ. У телекомунікаціях ці питання зводяться до проблеми проектування й використання елементів систем, підсистем або ж готових систем. При цьому природно необхідно оптимальне проектування, коли із множини варіантів можливих реалізацій проектованої системи або метасистеми  $S$  варто вибрати такий варіант  $S^* \in S$ , щоб дотримувалася нерівність

$$\Phi(S^*) \geq \Phi(S) \quad \forall S \in D \quad (3.1)$$

при обмеженнях

$$F_i(S^*) \geq F_i \quad \text{де } i \in I \quad (3.2)$$

де  $I$ - індексна множина.

У даній задачі область припустимих рішень  $D$  може бути як кінцевої, так і нескінченної, а критерій оптимізації  $\Phi$  може бути як скалярним, так і векторним функціоналом.

Очевидно, розглянуті рішення задачі (3.1) і (3.2) оптимального проектування ЗРЗ є досить загальними, разом з тим, вони не досить конкретизовані. Спробуємо небагато конкретизувати цю задачу. Проблему ЕМС варто розглядати як проблему більших систем  $BP$ , у якій кожна радіолінія розглядається як елемент великої системи БС, в якій кожна радіолінія розглядається як елемент більшої системи ЕВС [7-10]. У такому випадку до великої системи  $S$  належить  $N$  взаємодіючих радіоліній - ЕВС. У такому випадку властивості великої системи, як відомо з літератури [9-20], можна поділити на дві групи: властивості, які характеризують окремі лінії як ЕВС, і властивості, властиві тільки групам ЕВС - системні властивості. Перша група властивостей характеризує ЕВС безвідносно до великої системи. Інша група має сенс тільки при розгляді групи ЕВС й описує можливі взаємозв'язки ЕВС у складі великої системи. Перша група властивостей - це індивідуальні характеристики радіоліній, які визначаються випромінюванням передавача (рівнем потужності, класом основного випромінювання й швидкістю зменшення по частоті потужності поза смугових і шумовими випромінюваннями), багато сигнальною вибірковістю радіоприймача при заданій припустимій величині відносини сигнал/перешкода на вході, коефіцієнтом розгорнення по потужності між виходом передавача й входом приймача на робочій частоті радіолінії.

До іншої групи властивостей варто віднести системні параметри великої системи: сукупність частотних розладів  $\Delta f_{ij}$   $i$ -го приймача відносно  $j$ -го передавача, всі коефіцієнти розгорнення  $\alpha_{ij}$  між входом  $i$ -го приймача відносно  $j$ -го передавача, сукупність характеристик випромінювання  $j$ -го передавача по каналах взаємної модуляції. Передбачається, що в системі, що розглядається, призначення робочих частот для кожного РЕЗ здійснюється централізовано, тому будемо вважати характер розладів  $\Delta f_{ij}$  не випадковим. Величина  $\alpha_{ij}$  у загальному випадку залежить від багатьох факторів: від відстані між  $j$ -м передавачем й  $i$ -м приймачем, від форми діаграми напрямку й взаємної орієнтації їхніх антен, від умов поширення радіохвиль на трасі  $i$ -й приймач -  $j$ -й передавач й ін. Охарактеризувати випромінювання  $j$ -го передавача по каналах взаємної модуляції

можна, задавши суперпозицію функцій  $\psi_{j(k,l,m)}$ , які описують залежність потужності випромінювання  $j$ -го передавача по каналу взаємної модуляції на частоті  $f_{Tj(k,l,m)}$ , де  $k, l, m$  - індекси інших передавачів.

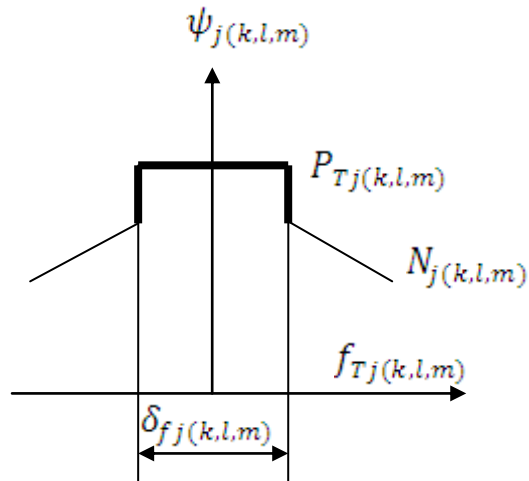


Рис. 3.1. Кусково-лінійна функція, що апроксимує енергетичний спектр випромінювання передавача

Кусково-лінійна функція  $\psi_j$  яка апроксимує характеристику випромінювання (енергетичний спектр)  $j$ -го передавача, показана на рис. 3.1, де прийняті такі позначення:  $P_{Tj(k,l,m)}$  - максимальна потужність, що випромінюється по каналу із частотою  $f_{Tj(k,l,m)}$ , дБВт;  $\delta_{fj(k,l,m)}$  - смуга частот максимальної потужності;  $N_{j(k,l,m)}$  - швидкість спадання випромінювання за межами смуги  $\delta_{fj(k,l,m)}$ .

При проектуванні системи радіозв'язку, як правило, індивідуальні характеристики відомі. Розміщення в обмеженому просторі декількох радіоліній зводиться до визначення невідомих системних параметрів і може бути визначене так: знайти структуру системи, що складається з  $K$  заданих елементів з відомими індивідуальними характеристиками, що забезпечувала б припустимий рівень взаємних перешкод між елементами при мінімальній ширині зайнятого частотного

діапазону, і при максимальних вимогах до коефіцієнтів розгорнення  $\alpha_j$  ( $\alpha_{ij} = 1/D_{ji}$ , де  $D_{ji}$  - загасання на трасі  $j$ -й передавач -  $i$ -й приймач). У такій постановці задачі структура системи буде знайдена за умови мінімально припустимих частотних розладів  $\Delta f_j$  між робочими частотами  $i$ -й й  $j$ -й радіоліній і максимально припустимих коефіцієнтах розгортки  $\alpha_{ij}$ . Щоб математично коректно сформулювати ці задачі необхідно визначити умову, що забезпечувало б припустимий рівень взаємних перешкод між елементами системи. Ці умови полягають у тому, щоб на жодній частоті сумарна потужність, що створюється всіма передавачами, які заважають, не перевищувала б рівень, що задається характеристикою багато сигнальної вибірковості  $\varphi_i(f)$   $i$ -го приймача [4,14]:

$$\varphi_i \geq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \psi_{ji}(f) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \psi_j(f) Q_{ji} / \alpha_{ji} \quad (3.3)$$

де  $\psi_j$  - характеристика випромінювання  $j$ -го передавача;  $\psi_{ji}$  - потужність, що створюється  $j$ -м передавачем на вході  $i$ -го приймача;  $Q_{ji} = \check{I}_i / \check{I}_j$  ( $\check{I}_i$  - смуга пропуску основного тракту прийому  $i$ -го приймача,  $\check{I}_j$  - смуга основного випромінювання  $j$ -го передавача);  $N$  - число передавачів.

При роботі РЕЗ у не перехрещених за частотою каналах найбільшу небезпеку поразки приймача по основному каналі прийому створюють засмугові випромінювання передавачів. Тому, з огляду на симетрію характеристик  $\varphi(f)$  та  $\psi(f)$  щодо частот прийому й передачі відповідно, умова сумісності (3.3) можна замінити обмежуючими нерівностями:

$$\varphi_i(f) \geq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \psi_{ji}(\Delta f_{ij}), \varphi_i(\Delta f_{ij}) \geq \psi_{ji}(0) \quad (3.4)$$

де  $i = \overline{1, M}$ ;  $j = \overline{1, N}$ ;  $\Delta f_{ij}$  - частотний розлад  $i$ -го приймача відносно  $j$ -го передавача.

У правій частині другої нерівності в частотах основного випромінювання передавачів, які є джерелом перешкод, не враховуються поза смугові випромінювання інших передавачів, якщо вони незрівнянно малі по відношенню до основного випромінювання.

З урахуванням (3.4) можуть бути сформульовані деякі задачі синтезу системи з  $K$  радіолініями [15].

Задача 1. При заданих параметрах елементів системи й частотних розладів  $\Delta f_{ij}$  на основі обмеження нерівностей (3.4) знайти максимально припустимі коефіцієнти рішення  $\alpha_{ji}$ , тобто максимізувати лінійну форму

$$F_1 = \sum_{ji} \alpha_{ji}.$$

Задача 2. Для даних параметрів елементів системи й коефіцієнтів рішення  $\alpha_{ji}$  на основі обмежень нерівностей (3.4) знайти,

$$F_2 = \sum_{ji} \alpha_{ji}$$

Задача 3. При заданих параметрах елементів системи й частотних розладів  $\Delta f_{ij}$  і коефіцієнтах рішення  $\alpha_{ji}$ , на основі обмежень нерівностей (3.4) знайти значення компонентів вектора  $\vec{A} = \{A_{m+1}, \dots, A_{m+N}\}$ , при яких би досягалася найкраща якість зв'язку в  $j$ -х радіолініях, тобто максимізувати цільову функцію

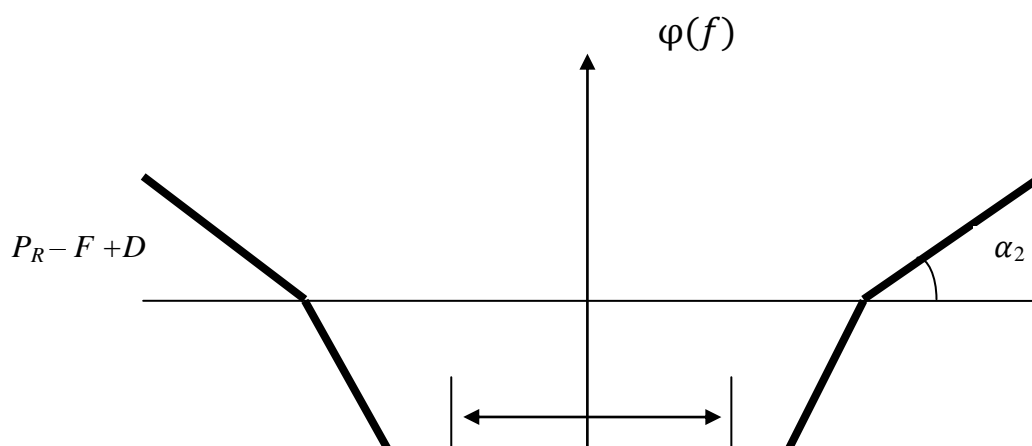
$$F_3 = \sum_{j=M+1}^{M+N} A_j$$

де  $A_j \leq 1$  - коефіцієнт, що характеризує ступінь зниження потужності  $j$ -го передавача стосовно його номінального значення.



### 3.2 Розрахунок мінімально припустимих розладів між робочими частотами радіоліній

Для забезпечення ЕМС у системі радіозв'язку використовується метод оперативного визначення групи робочих частот РЕЗ (радіоелектрозв'язку). Допускається, що роботою групи діапазонних РЕЗ ( $M$  приймачів й  $N$  передавачів) керує частотний диспетчерський центр (ЧДЦ). Для виконання своїх функцій ЧДЦ повинен мати попередньо розраховану матрицю мінімально припустимих частотних розладів  $\|\Delta f_{ij}\|$  у парі приймач-передавач. Матрицею враховується вплив, що заважає, всіх передавачів. При забезпеченні ЕМС використовується апроксимація характеристики багато сигнальної вибірконості приймача  $\varphi(f)$  і характеристики випромінювання передавача  $\psi(f)$  кусково-лінійними функціями, зображеними на рис. 3.2. й 3.3. відповідно, де  $P_R$  - чутливість приймача, дБВт;  $D$  - динамічний діапазон приймача, дБ;  $N_1$  - швидкість зростання характеристики вибірконості приймача по сусідньому каналу, дБ/октава;  $N_2$  - швидкість зростання характеристики вибірконості приймача при більших частотних розладах, дБ/октава;  $F$  - припустиме відношення сигнал/перешкода на вході приймача, дБ;  $V_3$  - відліковий рівень, по ньому задається смуга частот основного випромінювання передавача, дБ;  $V_{ш}$  - рівень шумових випромінювань щодо основного випромінювання передавача, дБ;  $N_3$  - швидкість спадання позасмугових випромінювань передавача, дБ/октава;  $N_4$  - швидкість спадання шумових випромінювань передавача, дБ/октава. Характеристики  $\psi(f)$  не враховують гармонійних та інтермодуляційних випромінювань передавачів.



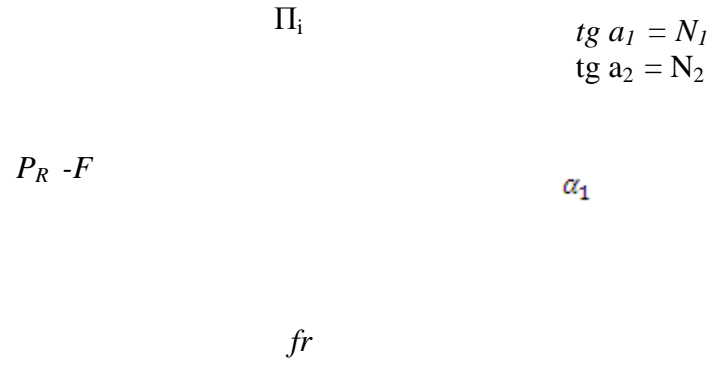


Рис. 3.2. Апроксимація характеристик багатосигнальної вибірковості приймача

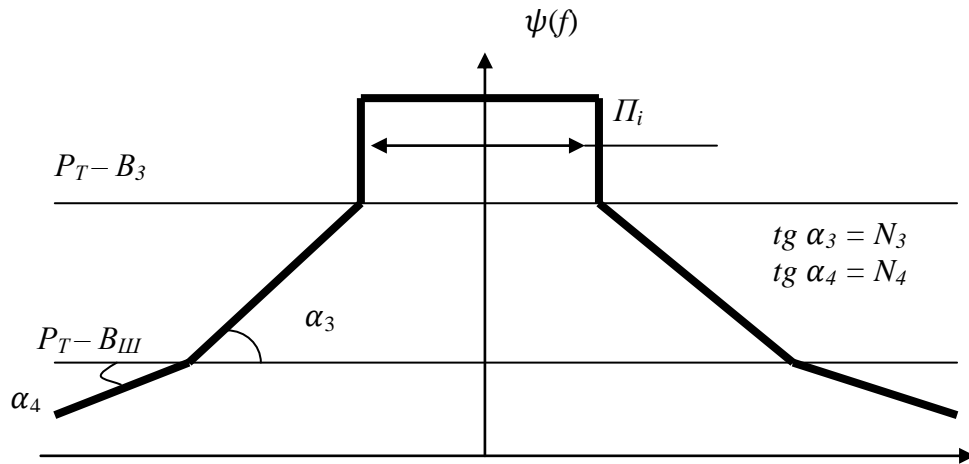


Рис. 3.3. Апроксимація характеристик випромінювання передавача

Для подальших розрахунків характеристик  $\varphi_i$  та  $\psi_j$  використана аналітичний запис у лінійному масштабі:

$$\varphi_i(\Delta f) = \frac{P_{Ri}}{F_i} D_i \left( \frac{\Delta f}{2\Pi_i} + 0,5 \right) \frac{N_2}{\lg 2} \text{ для } \Delta f > 2\Pi_i, \quad (3.5)$$

$$\psi_j(\Delta f) = \frac{P_{Ti}}{B_{Шj}} \left( \frac{\Delta f}{2\Pi_i} + 0,5 \right) \frac{N_4}{\lg 2} \text{ для } \Delta f > 2. \quad (3.6)$$

Обмежуючи нерівності (3.4) після підстановки  $\varphi_i(\Delta f)$  та  $\psi_j(\Delta f)$  із (3.5) і (3.6) мають вигляд

$$\frac{P_{Ri}}{F_i} \geq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{P_{Tj}}{R_{ji}B_{\omega j}} \frac{\Pi_i}{\Pi_j} \left( \frac{\Delta f_{ij}}{2\Pi_j} + 0,5 \right) \frac{N_{4j}}{lg2}, \quad (3.7)$$

$$\frac{P_{Ri}D_i}{F_i} \left( \frac{\Delta f_{ij}}{2\Pi_i} + 0,5 \right) \frac{N_{2i}}{lg2} \geq \frac{P_{Ti}}{R_{ji}} \frac{\Pi_i}{\Pi_j} \quad (3.8)$$

З нерівності (3.8) шляхом заміни на рівність визначається матриця розладів  $\Delta f'_{ij}$  кожен елемент якої визначає мінімальний крок призначення робочих частот між кожним приймачем і кожним передавачем за умови невтручання неосновних каналів прийому приймачів основними випромінюваннями передавачів:

$$\Delta f'_{ij} = 2\Pi_i \left[ \left( \frac{P_{Ti}n_iF_i}{R_{ji}n_jP_{Ri}D_i} \right)^{\frac{lg2}{N_{2i}}} - 0,5 \right]$$

За умови не пошкодження основних каналів прийому приймачів неосновними випромінюваннями передавачів визначається матриця мінімально припустимих частотних розладів  $\Delta f''_{ij}$ , шляхом рішення такої задачі нелінійного програмування: на основі обмеження (3.7) знайти розлади  $\Delta f''_{ij}$ , що мінімізує лінійну форму  $F = \sum_{ij} \Delta f''_{ij}$ . Після введення вектора  $\vec{X} = \{X_1, \dots, X_N\}$ , де  $X_i = \Delta f_{i2} \dots; X_N = \Delta f_{iN}$ ,  $i = \overline{1, n}$  задача нелінійного програмування формулюється в трохи іншому виді: мінімізувати  $F(\vec{X}) = \sum_{j=1}^N X_j$ , рухаючись по екіпотенціальній поверхні гіперсфери  $G_i(\vec{X}) = 0$ , де

$$G_i(\vec{X}) = \sum_{j=1}^N \frac{P_{Ti}}{R_{ji}B_{\omega j}} \left( \frac{X_j}{2} + 0,5 \right)^{\frac{N_{4i}}{lg2}} - \frac{P_{Ri}}{F_i} \quad (3.9)$$

У гіперкубі  $X^- \leq X_j \leq X^+$ , нижня границя  $X^-$  визначається при умові, що канали всіх приймачів і передавачів не перехрещуються, а верхня границя  $X^+$  обмежується діапазоном частот, виділеним для даної групи РЕЗ. Матриця

мінімально припустимих розладів  $|\Delta f_{ij}^*|$  між кожною парою приймач-передавач визначається за правилом

$$\|\Delta f_{ij}^*\| = \max\{\|\Delta f_{ij}'\|, \|\Delta f_{ij}''\|\}.$$

З огляду на те, що обмеження нерівностей (3.7) і (3.8) задовольняють умові нестабільності, тому що кожна з функцій, які входять у нерівності, залежить лише від одного невідомого  $\Delta f_{ij}$ , а функції  $\varphi_i$ , і  $\psi_{ji}$  мають відповідні властивості опуклості (або ввігнутості), то локальний екстремум є разом з тим глобальним. При цих умовах задача нелінійного програмування (3.9) має рішення [8, 18].

### **3.3 Оптимальне регулювання потужності передавачів у системі радіозв'язку**

Ефективним методом зменшення перешкод у групі РЕЗ, розташованих у границях обмеженої території, є централізований вибір потужності в групі передавачів [19]. Збільшення потужності одного з передавачів, виражається рівнянням передачі

$$P_R = P_T G_R G_T \alpha_{ij},$$

де  $G_R, G_T$  - коефіцієнти підсилення антен приймача й передавача, поліпшує індивідуальні показники радіолінії, що складається з даного передавача й приймача, призначеного для прийому повідомлень. Однак це веде до зростання перешкод на інших лініях, погіршення якості передачі інформації у всій системі. З іншого боку, зменшення потужності передавача приводить до зменшення відносини сигнал/шум, і при подальшому зниженні - до втрати надійності зв'язку, тобто до погіршення якості передачі інформації у всій системі. Зрозуміло, що існують деякі значення потужностей при яких якість передачі інформації у всій системі буде при заданих умовах оптимальної. Знайти ці значення можна тільки розглядаючи всю математичну модель системи, описану в [7, 20].

Задача мінімізації сумарної потужності може стояти й у більше прикладному плані, наприклад при проектуванні ліній зв'язку з кодовим доступом. У системах з кодовим доступом під час найбільшого навантаження різко зростають внутрішньо системні перешкоди, які є одним з головних недоліків цих систем. Тому для зменшення негативного впливу радіоліній вводиться автоматичне регулювання потужності.

Як об'єкт розглядається пара радіопередаючих і радіоприймальних приладів. Окремий приймально-передавальний пристрій будемо вважати об'єктом системи. Припустимо, що  $i$ -й передавач для передачі інформації  $i$ -му приймачу розвиває потужність  $P_i$ . Потужність корисного сигналу, прийнятого на прийомній стороні, пропорційна потужності  $P_i$ ,  $P_{ci} = \alpha_{ij} P_i$ , де  $\alpha_{ij}$  - коефіцієнт пропорційності, що характеризує сумарне ослаблення сигналу при передачі по  $i$ -й радіолінії. Це ослаблення, дБ, у вільному просторі визначається формулою

$$\alpha_{ij} = 20 \lg \frac{\lambda}{4\pi R}$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі сигналу, що передається;  $R$  - відстань до приймача.

При цьому перешкода від  $j$ -го передавача буде залежати від сумарного ослаблення сигналу на шляху поширення від  $j$ -го елемента передавача до приймача  $i$ -го елемента  $\alpha_{ij}$ . Всі коефіцієнти  $\alpha_{ij}$  вважаються на заданому проміжку часу позитивними постійними величинами, які не залежать від потужностей  $P$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Тому відносини шум/сигнал на вході приймального пристрою  $i$ -го елемента

$$\lambda_i = \frac{N_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \alpha_{ij} P_j}{\alpha_{ij} P_i} \quad (3.10)$$

Систему рівнянь (3.10) можна записати в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \alpha_{11} P_1 - \alpha_{12} P_2 - \alpha_{13} P_3 \dots - \alpha_{1n} P_n &= N_1 \\ -\alpha_{21} P_1 + \lambda_2 \alpha_{22} P_2 - \alpha_{23} P_3 \dots - \alpha_{2n} P_n &= N_2 \\ -\alpha_{ij} P_2 + \lambda_i \alpha_{ij} P_i + \dots - \alpha_{in} P_n &= N_i \end{aligned} \quad (3.11)$$



Задача (3.13) з обмеженнями (3.14) належить до класу так званих  $S$ -задач, може бути вирішена з використанням модифікації симплекса-методу, тому що є задачею лінійного програмування.

### 3.4 Задачі по розподілу ресурсу в системі радіозв'язку

У системі радіозв'язку показники якості зв'язку в радіолініях мають, як правило, імовірнісний характер [9]. Це пов'язано, насамперед, із флуктуаціями рівнів корисного й прийому, що заважає сигналів у крапці, коли

$$P_{ci} = P_{c0} + X_c, \quad (3.15)$$

де  $P_{c0}$  - медіанне значення потужності сигналу на вході приймача, дБВт;  $X_c$  - випадкова Гауссівська величина з нульовим середнім значенням і дисперсією  $\sigma^2$ , що спричиняється глибину флуктуації.

У лініях радіозв'язку задаються припустимі втрати вірогідності  $D_{i3}$  (наприклад, імовірність помилок у прийомі дискретних сигналів або втрати артикуляції телефонних сигналів). При цьому втрата вірогідності зв'язку залежить від значення відносини сигнал/завада+шум  $z_i$ , у смузі прийому на вході приймача. Якщо флуктуації рівнів сигналів і завад у радіолініях розподілені за нормальним законом, то ймовірність забезпечення зв'язку в  $i$ -й радіолінії з вірогідністю не гірше заданої  $D_i \leq D_{i3}$  (надійність або завадостійкість зв'язку) визначається як

$$p(D_i \leq D_{i3}) = p(z_i \leq z_{i3}) = F\left[\frac{z_{i0} - z_{i3}}{\sigma_{z_i}}\right], \quad (3.16)$$

де  $z_{i0} = -101g\lambda_i$  - медіанне значення відносини потужності сигналу до суми потужностей перешкод і шуму на вході приймача  $i$ -й радіолінії, дБ;

$z_{i\zeta} = -101g\lambda_{i\zeta}$  - відношення потужності сигналу до суми потужностей перешкод і шуму, дБ, при якому забезпечується необхідна достовірність  $D_{i3}$  прийому інформації.

$Q_{z/l}$  - середньоквадратичне відхилення імовірнісної величини  $z_i$ , або розсіювання перевищення рівня сигналу над рівнем перешкод, дБ;

$F(\xi)$  - інтеграл імовірності Лапласа,

$$F(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt,$$

$\xi = \frac{Z_{i0} - Z_{ic}}{\sigma_{Z_i}}$  - розрахунковий параметр.

Медіанне значення відношення сигнал/завада+шум  $Z_{i0}$  залежить від багатьох факторів, а саме, від потужності передавача, коефіцієнтів посилення антен, медіанного значення загасання сигналу на трасі розповсюдження, рівнів завад та ін.[1]

Розглянемо задачу розподілу наявного в ЗРЗ ресурсу потужностей передавачів базової станції між  $n$  радіолініями з метою максимізації одного з показників групової ефективності зв'язку. Можна сформулювати наступні задачі оптимізації.

Максимізація ймовірності забезпечення зв'язку з вірогідністю не гірше заданої у всіх обслуговуваних радіолініях, (групової надійності зв'язку):

$$P^*(\vec{P}) = \prod_{i=1}^n p_i(P_i) \Rightarrow \max_{\vec{P}} \quad (3.17)$$

за умови

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_Z, P_i > 0, i = \overline{1, n}.$$

Максимізація математичного очікування числа радіоліній, у яких забезпечується зв'язок з вірогідністю не гірше заданої:



$$\bar{n}(\bar{P}) = \sum_{i=1}^n p_i(p_i) \max_{\bar{P}} \quad (3.18)$$

за умови

$$\sum_{i=1}^n P_i = P, P_i > 0, i = \overline{1, n}.$$

Максимізація мінімальної серед групи радіоліній імовірності забезпечення зв'язку з вірогідністю не гірше заданої:

$$\min_{i \in \overline{1, n}} p_i(P_i) \Rightarrow \max_{\bar{P}} \quad (3.19)$$

за умови

$$\sum_{i=1}^n P_i = P, P_i > 0, i = \overline{1, n}.$$

Вибір одного із критеріїв оптимальності (3.17) - (3.19) залежить від задач, які вирішуються при організації зв'язку в групі радіоліній. Враховуючи на округло-вигнутий характер цільової функції, для рішення задач (3.17) - (3.19) використаємо метод динамічного програмування [2].

Відповідно до принципу оптимальності Беллмана, задача вирішується шляхом багатокрокового пошуку компонентів оптимального вектора  $\vec{P}$ . Для задач (3.17), (3.18) і (3.19) функціональні рівняння динамічного програмування мають відповідно вид:

$$p_k^* = \max_{0 < P_k \leq P \leq P_z} [p_k(P_k) p_{k-1}^*(P - P_k)] \quad (3.20)$$

$$\bar{n}_k(P) = \max_{0 < P_k \leq P \leq P_z} [p_k(P_k) + n_{k-1}^*(P - P_k)] \quad (3.21)$$

$$p_{\min k}^* = \max_{0 < P_k \leq P \leq P_z} \min [p_k(P_k) p_{\min k-1}^*(P - P_k)] \quad (3.22)$$

Алгоритм рішення задачі методом динамічного програмування складається із двох етапів. На першому етапі для кожного кроку визначається розподіл й умовні оптимальні значення (3.20) – (3.22). При цьому для першого кроку значення цільової функції  $P_i^*(P) = n_i(P) = P_{min_i}(P) = P_i(P)$  розраховується при різних значеннях  $P$  ( $0 < P \leq P_\Sigma$ ). На другому етапі для кожного кроку визначається заключний (безумовний) розподіл. Причому, спочатку для  $P = P_\Sigma$  визначається ресурс, що виділяється в інтересах  $n$ -ї радіолінії. Потім при  $P = P_\Sigma - P_n^*$  обчислюється оптимальне значення  $P_{n-1}^*$ , і ін [6, 12].

### **3.5 Шляхи підвищення надійності систем мобільного зв'язку з використанням методу дублювання основних компонентів**

Розвиток сучасних технологій які застосовуються для створення передових мобільних гаджетів передбачає постійне перебування пристрою в режимі онлайн. Сучасні смартфони, планшети або інші мобільні пристрої постійно підтримують зв'язок між хмарними сховищами та іншими сервісами, що надають свої послуги в режимі реального часу. Гаджет відстежує зміни, що вносяться користувачем і забезпечивши надійний ступінь захисту зберігає інформацію на віддаленому сервері. Якщо раніше користувач сам вибирав час і умови взаємодії з зовнішніми хмарними технологіями, то з розвитком сучасних мережевих технологій 4-го та 5-го поколінь мобільного зв'язку девайси мають можливість синхронізуватися між сервісами з мінімальним втручанням людини. Однак, для повнофункціональної роботи сучасного пристрою необхідно забезпечити надійну роботу і віддаленого сервера/сховища, який представляє собою складну обчислювальну мережу, зав'язану на безперервну роботу компонентів електронних обчислювальних машин.

При виході з ладу одного з компонентів необхідна провести його заміну в найкоротші терміни, або побудувати систему таким чином, щоб кожен NE був взаємозамінний або було можливо передбачити його резервування. Виходячи з

цього сучасні мережеві технології мають різні способи побудови і взаємокомпенсації елементів, якщо передбачається гаряча заміна зазначеного елемента.

Проте, бувають випадки коли працюючу (ввімкнену) резервовану систему неможливо ремонтувати. Коли у процесі роботи системи можливо відновлювати лише деякі елементи які мають великий процент відмови, у зв'язку з чим вдається домогтися підвищення показника надійності мережі LTE.

Так як для ремонту елемента необхідно його вимкнення, відновлення використовується при активному методі резервування.

Для нерезервованих систем скорочення часу відновлення веде до збільшення коефіцієнту готовності, що не впливає на безвідмовність системи. При наявності резервування відновлення стає ефективним засобом підвищення надійності. Завдяки скороченню часу відновлення мережевих елементів резервованої системи, які відмовили, існує можливість суттєво підвищити, як коефіцієнт готовності, так і безвідмовність системи. Для відновлювальних систем поєднання резервування та відновлення має набагато більше значення, як для невідновлювальних систем поєднання резервування з профілактичним контролем працездатності усіх елементів (окремо кожного).

Розглянемо на прикладі дубльованої системи, в якій присутні два однакових NE — основний та резервний, особливості резервованих систем. В разі коли перемикач між основним та резервним NE абсолютно надійний, зменшуючи час ремонту, стає можливим домогтися дуже високої надійності системи.

Припустимо, що під час ремонту в елементах не можуть виникнути вторинні відмови.

Дубльована система може знаходитися в одному із трьох станах, котрі позначимо цифрами:

- 0 – система працездатна (обидва елементи працездатні);
- 1 – система працездатна, але один із елементів - відмовив (система схильна до відмови);
- 2 – система непрацездатна (відмовила).

Позначимо ймовірність перерахованих раніше станів через  $P_0(t)$ ,  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ . Ці ймовірності залежать від початкових станів системи, в якій вона знаходилась коли  $t = 0$ .

В залежності від призначення дубльованої системи до неї можуть висунуті різноманітні вимоги:

1. Після ввімкнення система повинна безвідмовно працювати певний час; перерви в роботі недопустимі. При цьому необхідно знати ймовірність неперервної безвідмовної роботи системи (ймовірність перший раз не опинитися у стані 2). Іноді кажуть, що для таких систем непрацездатний стан є поглинаючим. При цьому розраховують умову ймовірності безвідмовної роботи на інтервалі  $(0, t)$  за умови, що при  $t=0$  основний та резервний елементи працездатні.

2. Необхідно вилучити певний заданий момент часу, коли система працездатна, але перерви у роботі системи не відіграють ніякої ролі. При цьому будуть розглядатися готовність системи та її характеристики: функція готовності  $\Gamma(t)$  або коефіцієнт готовності. Інакше кажучи, знаходиться ймовірність не опинитися у стані 2. Цей випадок відрізняється від попереднього тим, що існує можливість переходу зі стану 2 в стан 1.

Розрахуємо формули для функції готовності та ймовірності безвідмовної роботи дубльованої системи з відновленням. Припустимо, що основний та резервний елементи однонадійні, мають показникові розподілення часу безвідмовної роботи та часу відновлення:  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ,  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ , відмова непрацездатних елементів неможлива, відмови виявляються миттєво, як показано на рис. 3.4.

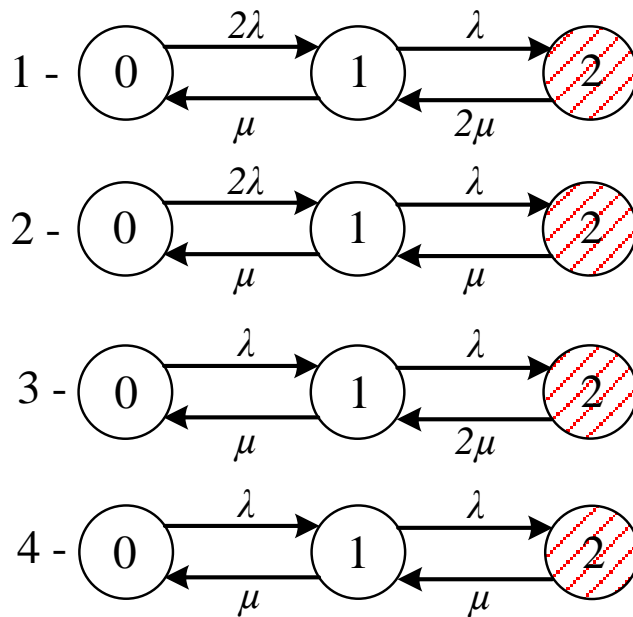


Рис. 3.4. Графи станів різноманітних варіантів дубльованої системи

Спочатку розглянемо системи у яких відмови допустимі. На Рис. 3.4. наведені графи станів чотирьох можливих варіантів дубльованої системи з відновленням:

- 1) Навантажений резерв; при відмові елементів вони можуть ремонтуватися як по одному, так і одночасно (відновлення без обмежень);
- 2) Навантажений резерв; елементи, які відмовили можуть ремонтуватися лише по одному (обмежене відновлення);
- 3) Ненавантажений резерв; відновлення проводиться без обмежень;
- 4) Ненавантажений резерв; відновлення по одному елементу (обмежене).

Диференційні рівняння для ймовірностей станів відповідно до графів станів рис. 3.4. мають вигляд:

Для першого варіанту

$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + 2\mu P_2(t); \\ P_2'(t) &= \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t); \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Для другого варіанту

$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_2(t); \\ P_2'(t) &= \lambda P_1(t) - \mu P_2(t); \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

Для третього варіанту

$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= \lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + 2\mu P_2(t); \\ P_2'(t) &= \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t); \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Для четвертого варіанту

$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= \lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_2(t); \\ P_2'(t) &= \lambda P_1(t) - \mu P_2(t); \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

Дані рівняння повинні бути доповнені нормуючою умовою

$$\sum_{i=0}^2 P_i(t) = 1 \quad (3.27)$$

У результаті вирішення рівнянь (1) – (5) при початкових умовах  $P_0(0) = 1$ ;  $P_1(0) = P_2(0) = 0$  знайдемо залежності  $P_i(t)$  для  $i = 0, 1, 2$ .

$$\Gamma(t) = P_0(t) + P_1(t) = 1 - P_2(t) \quad (3.28)$$

Функції готовності розглянутих раніше чотирьох варіантів резервованих систем з відновленням мають вигляд:

Для першого варіанту

$$\Gamma_1(t) = 1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2} \left[ 1 + \frac{1}{\lambda + \mu} (x_2 e^{x_1 t} - x_1 e^{x_2 t}) \right], \quad (3.29)$$

де  $x_1 = -(\lambda + \mu)$ ;  $x_2 = -2(\lambda + \mu)$ ;

Для другого варіанту

$$\Gamma_2(t) = 1 - \frac{2\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2 + \lambda^2} \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 4\lambda\mu}} (y_2 e^{y_1 t} - y_1 e^{y_2 t}) \right], \quad (3.30)$$

де  $y_1 = -\frac{3\lambda + 2\mu - \sqrt{\lambda^2 + 4\lambda\mu}}{2}$ ;  $y_2 = -\frac{3\lambda + 2\mu + \sqrt{\lambda^2 + 4\lambda\mu}}{2}$ ;

Для третього варіанту:

$$\Gamma_3(t) = 1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2 + \mu^2} \times \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{\mu^2 + 4\lambda\mu}} (z_2 e^{z_1 t} - z_1 e^{z_2 t}) \right], \quad (3.31)$$

$$\text{де } z_1 = -\frac{2\lambda + 3\mu - \sqrt{\mu^2 + 4\lambda\mu}}{2}; \quad z_2 = -\frac{2\lambda + 3\mu + \sqrt{\mu^2 + 4\lambda\mu}}{2};$$

Для четвертого варіанту:

$$\Gamma_4(t) = 1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2 - \lambda\mu} \times \left[ 1 - \frac{1}{2\sqrt{\lambda\mu}} (\gamma_2 e^{\gamma_1 t} - \gamma_1 e^{\gamma_2 t}) \right], \quad (3.32)$$

$$\text{де } \gamma_1 = -(\lambda + \mu - \sqrt{\lambda\mu}); \quad \gamma_2 = -(\lambda + \mu + \sqrt{\lambda\mu}).$$

На рис. 3.5. наведені залежності  $\Gamma(t)$ , які обчислюються за розглянутими вище формулами (7) — (10) при  $\lambda = 0,01$  1/ч та  $\mu = 0,1$  1/ч.

На Рис. 3.5. зображені графіки функцій готовності, якщо  $\lambda = 0,01$  1/ч та  $\mu = 0,1$  1/ч. Для чотирьох варіантів дубльованої системи, графі станів яких наведені на рис. 3.3.

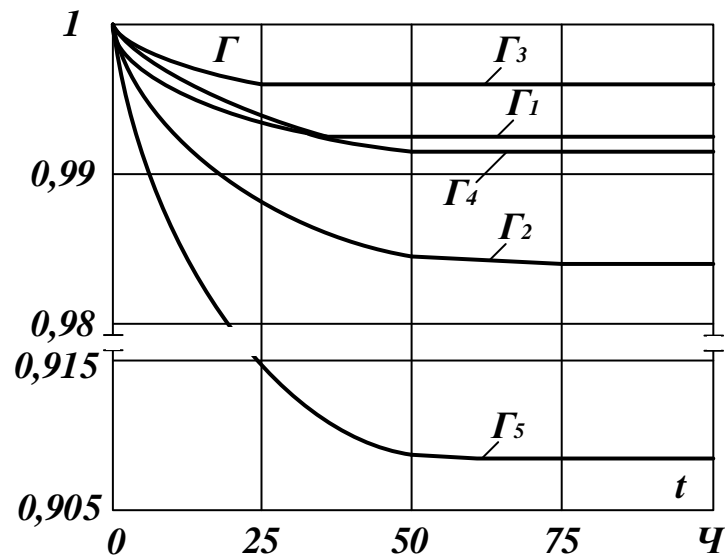


Рис. 3.5. Графіки функцій готовності

Для зрівняння на графіку присутня функція готовності  $\Gamma_5(t)$  нерезервованої системи LTE з тими самими значеннями:  $\lambda = 0,01$  1/ч та  $\mu = 0,1$  1/ч. Якщо прийняти вираз  $\lambda/\mu = \rho$ , тоді з формул (7) — (10) отримаємо:

$$k_{\Gamma_1} = \frac{1+2\rho}{(1+\rho)^2}; \quad (3.33)$$

$$k_{\Gamma_2} = \frac{1+2\rho}{(1+\rho)^2 + \rho^2}; \quad (3.34)$$

$$k_{\Gamma_3} = \frac{2(1+\rho)}{(1+\rho)^2 + 1}; \quad (3.35)$$

$$k_{\Gamma_4} = \frac{1+\rho}{(1+\rho)^2 - \rho}. \quad (3.36)$$

Коли  $\rho = 0,1$  в результаті отримуємо:  $k_{\Gamma_1} = 0,992$ ;  $k_{\Gamma_2} = 0,984$ ;  $k_{\Gamma_3} = 0,995$ ;  $k_{\Gamma_4} = 0,991$ .

Таким чином, для того щоб підвищити готовність відновлювальної дубльованої системи, необхідно створити умови, які забезпечують наявність ненавантаженого резерву та відновлення без обмежень. Це також відповідає інтуїтивним представленням на рахунок даного процесу.

Складемо системи диференціальних рівнянь, для визначення умовної ймовірності безвідмовної роботи, при тому, що стан 2 поглинаючий, тобто відсутні переходи зі стану 2 в стан 1. В такому випадку при відповідності з графами станів на рис. 3.4 в результаті отримаємо:

для першого та другого варіантів

$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -2P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t); \\ P_2'(t) &= 2\lambda P_1(t); \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

для першого та другого варіантів



$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= \lambda P_0(t) - (\lambda + \mu) P_1(t); \\ P_2'(t) &= \lambda P_1(t); \end{aligned} \right\} \quad (3.38)$$

Коли початкові умови  $P_0(0) = 1$ ,  $P_1(0) = P_2(0) = 0$ , В результаті розв'язання системи рівнянь (3.37) та (3.38) відповідно з нормуючою умовою (3.9) отримаємо вираз для умовної ймовірності безвідмовної роботи:

$$\rho(t) = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} (\beta_2 e^{\beta_2 t} - \beta_1 e^{\beta_1 t}), \quad (3.39)$$

Де для першого та другого варіантів

$$\beta_{1,2} = -\frac{1}{2} \left[ \mu + 3\lambda \mp \sqrt{\lambda^2 + 6\lambda\mu + \mu^2} \right]; \quad (3.40)$$

Для третього та четвертого варіантів

$$\beta_{1,2} = -\frac{1}{2} \left[ \mu + 2\lambda \mp \sqrt{4\lambda\mu + \mu^2} \right]. \quad (3.41)$$

Залежності  $\rho(t)$ , обчислені за формулами (17) – (19) для  $\lambda = 0,01$  1/ч та  $\mu = 0,1$  1/ч, представлені на рис. 3.5. Також для порівняння наведені графіки функцій надійності невідновлювальних систем: нерезервованої, із навантаженим та ненавантаженим дублюванням.

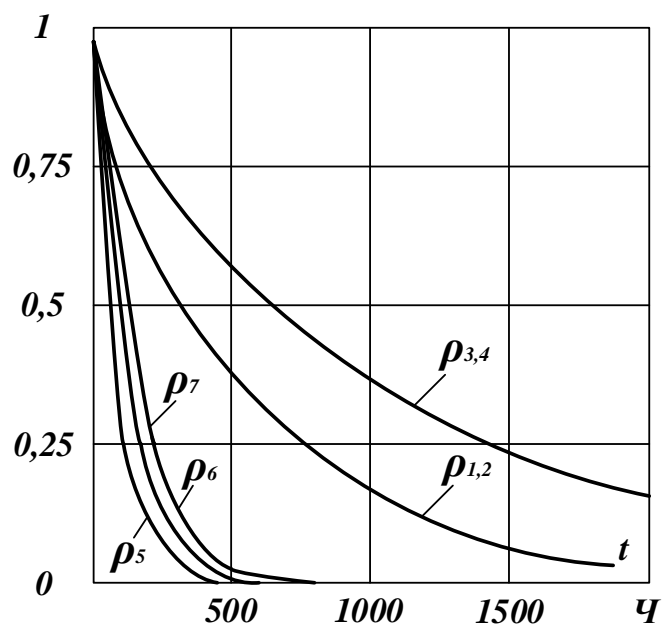


Рис. 3.6 Графіки функцій надійності різновидних систем

На рис. 3.5. зображені графіки функцій надійності різновидних систем при  $\lambda = 0,01$  1/ч та  $\mu = 0,1$  1/ч:

$\rho_{1,2}(t)$  — для першого та другого варіантів дубльованої системи (графіки станів варіантів наведені на рис. 3.4);

$\rho_{3,4}(t)$  — так само для третього та четвертого варіантів;

$\rho_5(t)$  — для нерезервованої системи;

$\rho_6(t)$  — для навантаженого дублювання без відновлення;

$\rho_7(t)$  — для ненавантаженого дублювання без відновлення.

Середній час безвідмовної роботи резервованої відновлювальної системи LTE визначається так, якщо в початковий момент часу (коли  $t=0$ ) всі елементи резервованої системи працездатні, тоді середній час безвідмовної роботи являється часом переходу із початкового стану до підмножини непрацездатних станів.

Припустимо, що немає обмежень для числа ремонтних бригад, відмови виявляються миттєво, апаратура контролю безвідмовна, основний та резервний елементи однонадійні та мають показовий розподіл часу безвідмовної роботи і також часу відновлення. При цьому, задіюючи методи [28], можливо отримати наступні вирази для середнього часу безвідмовної роботи системи зі спільним резервуванням, яка складається з одного основного та  $k-1$  резервних елементів:

При навантаженому резерві:

$$m_{t_{c1}} = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{\left(1 + \frac{\mu}{\lambda}\right)^j}{1+j} \quad (3.42)$$

У випадку  $\lambda/\mu \ll 1$

$$m_{t_{c1}} \approx \frac{\mu^{k-1}}{k\lambda^k} \quad (3.43)$$

При навантаженому резерві:

$$m_{t_{c2}} = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{1}{1+j} \frac{k!}{(k-j-1)!} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^j \quad (3.44)$$

У випадку  $\lambda/\mu \ll 1$

$$m_{t_{c2}} \approx (k-1)! \frac{\mu^{k-1}}{k\lambda^k} \quad (3.45)$$

В реальних системах можуть існувати обмеження за числом ремонтних бригад, загально допустимому числу відновлень та інше.

Саме тому значення  $m_{t_c}$ , обчислені за формулами (3.44) – (3.45) доведеться розраховувати верхньою межею середнього часу безвідмовної роботи резервованої відновлювальної системи. Значення  $m_{t_c}$  майже для всіх основних випадків резервування наведені у табл.1.

Вирази для  $m_{t_c}$  при  $r = 1$  отримані шляхом складання та вирішення системи диференційних рівнянь, відповідних графам станів при  $r = 1$ .

Зіставивши формули для середнього часу безвідмовної роботи дубльованої відновлювальної системи з навантаженим резервом за умови ідеального контролю згідно виразу (3.44) зі значенням середнього часу безвідмовної роботи невідновлювальної системи із ненавантаженим резервом  $m_{t_c}'' = 3/2\lambda$  знайдемо:

$$\frac{m_{t_c}}{m_{t_c}''} = 1 + \frac{\mu}{3\lambda} = 1 + \frac{1}{3\rho}$$

Таблиця 3.1.

Значення  $m_{t_c}$  майже для всіх основних випадків резервування

Кількість надлишкових елементів	Вид резерву	Число ремонтних бригад	Формула для $m_{t_c}$
Один $k = 2$	Навантажений	$r \geq 1$	$\frac{\mu + 3\lambda}{2\lambda^2}$
	Невантажений	$r \geq 1$	$\frac{\mu + 2\lambda}{\lambda^2}$
Два $k = 3$	Навантажений	$r = 1$	$\frac{2\mu^2 + 4\lambda\mu + 11\lambda^2}{6\lambda^2}$
		$r \geq 1$	$\frac{2\mu^2 + 7\lambda\mu + 3\lambda^2}{6\lambda^2}$
	Невантажений	$r = 1$	$\frac{\mu^2 + 2\lambda\mu + 3\lambda^2}{\lambda^3}$
		$r \geq 1$	$\frac{2\mu^2 + 3\lambda\mu + 3\lambda^2}{\lambda^3}$

Таким чином, якщо  $\rho = \lambda/\mu = 0,01 \longrightarrow 0,001$  застосування відновлення підвищує середній час безвідмовної роботи резервованої системи у декілька разів.

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі отримано такі результати:

1. Проаналізовано проблеми конкуренції транспортних технологій АТМ та ІР у фіксованому та мобільному зв'язку. На сьогодні завдяки розвитку технології компресії, пропускнує спроможності телекомунікаційних мереж, більш низької вартості обладнання та тенденції росту трафіку даних над трафіком голосу визначено пріоритетні переваги технології ІР.

2. На основі проведених теоретичних досліджень визначено, що зростаючий попит на різноманітні телекомунікаційні послуги на сьогодні фактично підштовхує до проектування, стандартизації та побудови мереж 4-го покоління, які більш оптимізовано під ІР та дозволить передавати дані на швидкостях більш 2-х Мбіт/с. Проведено аналіз сучасного стану мереж та послуг телекомунікацій, які характеризуються: неоднорідністю телекомунікаційних мереж; зміною пріоритетів в управлінні телекомунікаційними мережами; потребою в управлінні взаємодією телекомунікаційних мереж різних операторів; підвищенням вимог до надійності телекомунікацій; створенням ГП; збільшенням попиту на різноманітні високоякісні послуги телекомунікацій; потребою у координації діяльності споживачів та постачальників послуг телекомунікацій; необхідністю усунення суперечності між соціальною та індивідуальною потребою в інформації.

3. Сформульовано вимоги до перспективних телекомунікаційних мереж зв'язку, розглянуто можливість та необхідність реалізації вискоефективних телекомунікаційних мереж зв'язку майбутнього покоління. Визначено стратегію створення і розвитку NGN, LTE та систем управління мобільного радіозв'язку, яка буде органічною частиною єдиної СУ діяльністю оператора і дозволить забезпечити управління складною різноманітною мережею з максимальним рівнем автоматизації для забезпечення різних категорій споживачів сучасним набором послуг телекомунікацій від базових до високошвидкісних послуг мультимедіа.

4. Проаналізовано системи мобільного радіозв'язку: статичні (безінерційні) і динамічні (інерційні). Визначено кожній з них як об'єкту особливості, що

характеризують різні сторони їхнього функціонування.

5. Досліджено основні властивості систем. При визначенні інтегральних якостей систем (забезпечення стійкості), важливу роль відіграє *цілісність*, яка відображає залежність між елементами. *Причинність* - визначає здатність системи реагувати на вхідні впливи, тобто виступає як властивість фізичної реалізації пристроїв або систем. Важливою характерною властивістю є *керованість* -, здатність систем ідентифікуватися або адаптуватися, завдяки розподілу впливів на керуючі (корисні) і збуджуючі діяння (негативні). *Структурна складність* є однією з властивостей, за допомогою яких система здобуває здатність перетворювати надходжувану інформацію. Структурна складність, віднесена до рівня взаємодії між елементами системи, дозволяє враховувати різноманітний характер цих взаємозв'язків. *Зв'язність* (або *структурна зв'язність*) системи є однією з найважливіших її якісних характеристик. Щоб усвідомити й виявити ті математичні конструкції, які описують характер зв'язку між окремими елементами системи, проведено дослідження зв'язності за допомогою теоретично-графових засобів та методів комбінацій топології. Результати аналізу дають можливість здійснювати аналіз зв'язності вузлів у системі зв'язку, за допомогою якого можна визначити самі слабкі зв'язки й забезпечити потрібний рівень зв'язності властивості систем.

Отже,  $q$  – аналіз доцільно проводити при синтезі систем зв'язку, а також при їхньому плануванні.

Удосконалено метод оперативного визначення групи робочих частот радіоелектрозв'язку для забезпечення електромагнітної сумісності у системі радіозв'язку.

6. Встановлено, що доцільно здійснювати керування роботою групи діапазонних РЕЗ ( $M$  приймачів й  $N$  передавачів) за допомогою частотного диспетчерського центру (ЧДЦ). Визначено, що для виконання своїх функцій ЧДЦ повинен мати попередньо розраховану матрицю мінімально припустимих частотних розладів  $\|_{\Delta f_{ij}}$  у парі приймач-передавач, яка враховує всі впливи.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аболиц И.А. и др. Многоканальная связь – М.: Связь, 1971. - 493 с.
2. Банкет В.Л., Дорофеев В.М. Цифровые методы в спутниковой связи. - М.: Радио и связь, 1988. - 240 с.
3. Беркман Л.Н., Гніденко М.П., Чумак О.І., Булгач С.В., Григорович В.В. Основи побудови мереж NGN із забезпеченням належної якості обслуговування. – Навчальний посібник підготовлено для роботи студентів вищих навчальних закладів. Київ: - ННІТІ ДУІКТ. 2008. - 113 с.
4. Бесекерский В.А. и др. Микропроцессорные системы автоматического управления. Л.: Машиностроение, 1988. – 365 с.
5. Бесекерский В.А., Изранцев В.В. Системы автоматического управления с микро-ЭВМ. - М: Наука, 1987. – 320 с.
6. Бірюков М.Л., Стеклов В.К., Костік Б.Я. Транспортні мережі телекомунікацій: системи мультиплексування. - К.: Техніка, 2005. – 312 с.
7. Бурнашев М.В. О минимаксном обнаружении неточно известного сигнала на фоне белого Гауссовского шума. – Теор. вероятн. и ее примен., 1979. – т.24, №3. – С. 106-118.
8. Бірюков Н.Л., Стеклов В.К. Транспортные сети и системы электросвязи – системы мультиплексирования. - К.: ЗАТ “Віпол”, 2003. – 352 с.
9. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1969. – 363 с.
10. Беркман Л.Н. Архитектура интеллектуальной сети // Информатика и связь: сб. научн. Трудов УГАС им. А.С. Попова Одесса. - 1996. – 30 с.
11. Артеменко М.Ю., Беркман Л.Н., Олешко Т.І., Ткаченко О.М., Коршун Н.В. Принципи побудови інтелектуальних систем управління мережами зв'язку // Зв'язок. – 2006. - №7. – С. 43-46.
12. Беркман Л.Н., Рудик Л.В., Стец О.С. Локальні системи управління мережами зв'язку // Вісник Українського будинку економічних та науково-технічних знань. – 2005 - №3. - С. 18-23.

13. Беркман Л.Н., Стеклов В.К., Стародуб Н.М. Объединение векторных критериев оптимальности систем управления телекоммуникационными сетями // Київ: Матеріали доповідей учасників Ювілейної міжнародної науково-практичної конференції, тов. “Знання України”. - 2000. – С. 14-16.

14. Беркман Л.Н., Ткаченко О.М. Оптимізація систем управління телекомунікаційними мережами на основі алгоритмів теорії ігор // Нові технології: Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2006. – №2(12). – С. 147-150.

15. Беркман Л.Н. Инвариантные системы управления сетями связи // “Зв’язок”.- 2000.- №2. - С.30-32.

16. Булгач С.В., Чумак О.І., Рудик Л.В., Розвиток NGN на базі сучасної системи управління // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології /Cominfo’ 2007/», I Міжнародна науково-технічна конференція. Збірник ТЕЗ.ДУІКТ - С.81-82.

17. Булгач С.В., Єфремов С.О., Гресько Ю.В., Рогожніков О.І. Проектування системи управління на базі модифікованого мінімаксного критерію оптимізації. /Сучасні інформаційно-комунікаційні технології /COMINFO’2010-Livadia/. VI Міжнародна науково-технічна конференція. Збірник ТЕЗ. 04-08 жовтня 2010.- С.55-56.

18. Булгач С.В. Пропозиції щодо підвищення завадостійкості в багатопозиційних сигналах для технології WiMax // Зв’язок. - 2009. - №1-2(85-86). - С. 63-66.

19. Булгач С.В. Дискретно-різницеве перетворення в застосуванні до синтезу інваріантних методів модуляції сигналу// Зв’язок. - 2010. - №1(89). - С. 61-63

20. Булгач С.В. Особливості стандарту IEEE. 802.11a /Сучасні інформаційно-комунікаційні технології. /COMINFO’2008-Livadia/ IV Міжнародна науково-технічна конференція. Збірник ТЕЗ. 15-19 вересня 2008.- С. 91-92с.



# ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ