

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Білоус Юрій Васильович

УДК 621.396.218:621.396.931

**МЕТОДИ ТЕРИТОРІАЛЬНО-ЧАСТОТНОГО ПЛАНУВАННЯ СІЛЬНИКОВИХ СИСТЕМ  
РУХОМОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТА АНАЛІЗ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: заслужений діяч науки й техніки України, доктор технічних наук, професор Лосев Юрій Іванович, Харківський військовий університет.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Колпаков Федір Федорович, Національний аерокосмічний університет “ХАІ” ім. М.С. Жуковського (м. Харків), професор кафедри приймально-передавальних пристроїв.

кандидат технічних наук, докторант Лемешко Олександр Віталійович, Харківський інститут військово-повітряних сил ім. Івана Кожедуба.

Провідна установа: Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова Державного комітету зв'язку та інформатизації України, кафедра технічної електродинаміки та систем радіозв'язку.

Захист відбудеться “ 21 ” \_\_\_\_\_ травня \_\_\_\_\_ 2003 р. о  14  годині на засіданні спеціалізованої вченої

ради Д 64.820.01 в Українській державній академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, площа Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, площа Фейербаха, 7.

Автореферат розісланий “ 21 ” \_\_\_\_\_ квітня \_\_\_\_\_ 2003 року.

Вчений секретар

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Аналіз сучасного стану стільникових систем рухомого радіозв'язку загального користування (ССРЗ) в Україні показує, що їх розвиток стримується відсутністю смуг частот, розподілених сухопутній рухомій службі зі статусом спільного використання в рекомендованих Регламентом радіозв'язку діапазонах частот; відсутністю адміністративних і організаційно-технічних процедур, пов'язаних із забезпеченням територіально-частотного планування (ТЧП) і електромагнітної сумісності (ЕМС) ССРЗ.

Існуючим нині методам територіально-частотного планування ССРЗ властивий ряд істотних недоліків. Так, у результаті планування ССРЗ методом однорідних мереж виходить мережа базових станцій (БС), у якій найближчі передавачі, що працюють у суміщеному каналі, є вузловими точками геометрично правильної сітки на поверхні Землі. Реальні мережі передавачів не мають правильної геометричної форми, а технічні характеристики передавачів не відповідають характеристикам, визначеним у теоретичній мережі. Відхилення від геометрично правильної структури, теоретичних значень потужностей і висот антен знижують ефективність планування ССРЗ методом однорідних мереж.

У роботах O'Leary, K. Hunt і F. Stocer задача ТЧП мережі радіостанцій (телевізійної системи малої потужності, системи рухомого радіозв'язку) зведена до еквівалентної узагальненої задачі розфарбування графа, обмеженої деяким вузьким підкласом класу всіх графів – реберно-обмежених графів, названих дисковими. Однак відомі рішення підзадач ТЧП методами теорії графів обмежуються лише частковими варіантами, які можуть мати місце на практиці.

Методи ТЧП, про які йшла мова вище, розроблялися в першу чергу для застосувань у радіомережах телевізійного й звукового мовлення. На відміну від них третій метод, запропонований М.А. Биховським, був розроблений винятково з метою планування ССРЗ. Метод Биховського дає можливість визначити параметри, необхідні для складання лише попереднього територіально-частотного плану ССРЗ і не може бути застосований для місцевості, де територія або розподіл абонентів є неоднорідними. Метод враховує, що завади на вході приймача мобільної станції (МС) створюють БС, які працюють у суміщеному частотному каналі. При цьому вводяться припущення, які спрощують імовірнісні закони розподілу цих завад. У методі Биховського не враховується, що завади зазнають флуктуацій спричинених багатопроменевим поширенням, через що їхні обвідні, подібно сигналу, підпорядковуються чотирьохпараметричному розподілу. У зв'язку з цим актуального значення набуває питання визначення ймовірнісних законів розподілу груп випадкових величин: потужностей сигналу й завади, сумарної потужності завад, а також відношення сигнал/завада (БСЗ), вільних від названих недоліків. Очевидно, що використання цих

законів при плануванні ССРЗ дозволить визначати основні параметри територіально-частотного плану із запасом, який враховує випадковий характер змін рівнів сигналів і завад.

У більшості розроблених до теперішнього часу комп'ютерних методів ТЧП критерієм оптимальності територіально-частотного плану виступає мінімум числа БС за умови забезпечення радіопокриття заданого відсотка території міста. Причому область території вважається покритою, якщо в кожній точці даної області рівень сигналу буде не менше мінімально припустимого рівня. Критерій мінімального числа БС є доцільним із погляду оператора ССРЗ, який прагне мінімізувати вартість системи й організаційно-технічні заходи на етапі її впровадження й експлуатації. Однак із погляду абонента такий підхід є недоцільним, оскільки він не враховує інтереси абонента, пов'язані з очікуванням підвищення якості обслуговування й розширення зони, охопленої послугами зв'язку.

У зв'язку з відзначеними недоліками існуючих методів територіально-частотного планування ССРЗ виникла необхідність проведення додаткових досліджень, спрямованих на розробку ефективних методів ТЧП, вільних від перерахованих недоліків.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано відповідно до Програми розвитку стільникових систем сухопутного рухомого зв'язку загального користування в Україні. Обраний напрямок досліджень безпосередньо пов'язаний з напрямками науково-дослідних робіт, які проводилися на кафедрі Телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетних і госпрозрахункових тем "Парус" (№197-1) і "Сфера" (№01-97), в яких автор брав участь у якості виконавця.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка нових методів територіально-частотного планування ССРЗ, які забезпечують планування цих систем з обліком імовірнісних характеристик сигналів і внутрішньосистемних завад, енергетичних утрат при поширенні радіохвиль на трасах, технічних характеристик ССРЗ, а також випадкового характеру потоку викликів. Стільникова система зв'язку, спроектована з використанням нових методів, на відміну від існуючих, повинна мати кращі характеристики якості обслуговування абонентів і ефективно використовувати наявний радіочастотний ресурс (РЧР). У зв'язку з цим у дисертаційній роботі вирішуються наступні задачі:

- аналізу існуючих методів територіально-частотного планування ССРЗ;
- розробки ймовірнісних моделей сигналів і внутрішньосистемних завад для задач ТЧП ССРЗ;
- розробки рекомендацій із практичного використання методів розрахунку енергетичних утрат при поширенні радіохвиль на трасах ССРЗ;
- розробки показника ефективності методів ТЧП і аналізу існуючих територіально-частотних планів ССРЗ на його основі;
- аналізу ефективності методу фіксованого розподілу частотних каналів у ССРЗ на основі

розробленої імітаційної моделі абонентського доступу до ресурсу системи;

- розробки методу розміщення БС на місцевості й коректування їхнього місцеположення;
- розробки методу побудови ССРЗ із мінімальною розмірністю кластера.

*Об'єктом дослідження* в дисертаційній роботі є процес територіально-частотного планування ССРЗ.

*Предмет дослідження* – методи територіально-частотного планування ССРЗ.

*Методи дослідження.* При розробці ймовірнісних моделей сигналів і внутрішньосистемних завад використовувалися методи теорії ймовірностей, теорії сигналів, радіофізики. При розробці рекомендацій із практичного використання методів розрахунку енергетичних утрат на трасах ССРЗ використовувалися методи регресійного аналізу, теорії погрішностей, радіофізики та теорії нейронних мереж (НМ). При розробці показника ефективності методів ТЧП, а також для визначення ймовірності відказу радіоканалу, використовувалися методи операційного числення, прикладної математики, теорії зв'язку. Аналіз ефективності методу фіксованого розподілу каналів проводився з використанням методів імітаційного моделювання. Задачі розміщення БС і коректування їхнього місцеположення вирішувалися з використанням методів теорії НМ і теорії множин.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Запропоновано нове ймовірнісне описання сигналів і внутрішньосистемних завад у ССРЗ із частотно-часовим і кодовим розділенням каналів, яке ґрунтується на понятті характеристичної функції (ХФ) потужності сигналу й завади, а також показано його застосування в задачі територіально-частотного планування ССРЗ. Нове описання враховує варіанти топології – випадкової і/або детермінованої – джерел і приймачів завад, швидкі й повільні завмирання сигналів і завад, а також протоколи підтримання безперервного зв'язку в ССРЗ.

2. Розроблено критерій ефективності методів ТЧП і метод планування ССРЗ, у якому, на відміну від відомих, визначення області покриття для окремих БС, їхніх груп і системи в цілому ґрунтується на обчисленні ймовірності відказу в обслуговуванні рухомого абонента (РА). На основі запропонованого ймовірнісного описання сигналів і внутрішньосистемних завад, з урахуванням характеристик ССРЗ як системи масового обслуговування (СМО), отримано аналітичні вирази для ймовірності відказу в обслуговуванні РА, а також ймовірності відказу радіоканалу ССРЗ.

3. Розроблено нову імітаційну модель абонентського доступу до каналного ресурсу ССРЗ, яка дозволяє врахувати реальні умови функціонування цих систем: наявність повторних викликів, випадкову тривалість розмови, вплив завмирань і накладень сигналів і т.п. На основі машинного експерименту показана можливість використання розробленої моделі для проведення розрахунків каналної ємності БС.

4. Запропоновано новий метод розміщення БС на місцевості з використанням НМ що самоорганізується, а також метод коректування місцеположення БС, який базується на використанні алгоритмів навчання НМ. Нові методи дозволяють проводити планування ССРЗ із метою одержання максимального числа абонентів, імовірність відказу в обслуговуванні яких не перевищує задану величину.

**Практичне значення отриманих результатів.** Запропоновані в дисертаційній роботі методи ТЧП є методологічною основою проектування ССРЗ.

Запропоноване ймовірнісне описання сигналів і внутрішньосистемних завад може використовуватися надалі для аналізу ЕМС у ССРЗ. Підхід, на основі якого отримано аналітичні вирази для ймовірності відказу радіоканалу ССРЗ, може використовуватися для аналізу завадостійкості систем радіозв'язку різного призначення.

Розроблено рекомендації з практичного використання методів розрахунку енергетичних втрат, виникаючих при поширенні радіохвиль на трасах ССРЗ, визначено погрішності розрахунку множника ослаблення з урахуванням точності електронної карти (ЕК), а також формалізовано задачу коректування параметрів моделей розрахунку втрат за результатами вимірювань у ССРЗ.

Створений спеціалізований програмний комплекс, що реалізовує імітаційну модель абонентського доступу до ССРЗ, дозволяє автоматизувати процес розрахунку каналної ємності й показників якості обслуговування абонентів ССРЗ.

Запропоновані методи ТЧП можуть увійти до складу програмно-апаратного комплексу (ПАК) планування ССРЗ. Програмна реалізація методів дозволить здійснювати проектування ССРЗ із погляду забезпечення ними заданої якості обслуговування абонентів, вираженої через імовірність відказу в обслуговуванні. Використання запропонованих методів дозволить також скоротити терміни проектування ССРЗ за рахунок підвищення ступеня його автоматизації.

Наукові положення і висновки дисертації лягли в основу лекційних курсів із дисциплін “Стільникові й зонові системи зв'язку” і “Радіотелефонні системи зв'язку”, які читаються на кафедрі Телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки. Результати дисертації впроваджено в лабораторний практикум із названих дисциплін, що підтверджується відповідним актом упровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Автор самостійно одержав основні результати, викладені в дисертації. У роботах, виконаних у співавторстві, особисто автору належать наступні наукові результати:

1. основні співвідношення, що дозволяють розрахувати ймовірність відказу радіоканалу, а також розрахунок імовірності в [1] і [8];
2. розробка алгоритму визначення мінімального значення розмірності кластера в [14];
3. обґрунтування вибору методології проектування й розробка атрибутивної моделі бази даних

у [15];

4. розробка імітаційної моделі абонентського доступу в [7];

5. розробка методики розміщення обладнання БС на пересіченій місцевості в [16].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати й положення дисертаційної роботи доповідалися: на 1-му Міжнародному молодіжному форумі "Електроніка і молодь у XXI столітті", Харків, 1997 р.; 4-му Міжнародному молодіжному форумі "Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті", Харків, 2000 р.; на 6-ій Міжнародній конференції "Теорія і техніка передачі, прийому й обробки інформації", Харків, 2000 р.; на 3-ій Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих фахівців країн СНД "Техніка і технологія зв'язку", Одеса, 2001 р.

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 12 статтях і 4 доповідях науково-технічних конференцій.

**Структура дисертаційної роботи.** Робота складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел (165 найменувань) і 3 додатків. Робота містить 211 сторінок, 65 рисунків, 4 таблиці, включаючи додатки обсягом 16 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить обґрунтування актуальності дисертаційної роботи, формулювання мети роботи й задач дослідження, наукової новизни і практичної цінності отриманих результатів.

**У першому розділі** представлено огляд і аналіз існуючих методів територіально-частотного планування ССРЗ. Показано, що використання у якості методу ТЧП результатів теорії однорідних мереж передавачів (ТОМП) дозволяє установити найкращий варіант покриття території мережею БС і оптимальний рознос між частотними каналами. Однак відомі обмеження, що накладаються на застосовність даного методу, не дозволяють використовувати безпосередньо результати ТОМП у реальному плануванні ССРЗ.

Розгляд методики розрахунку параметрів територіально-частотного плану показав, що основні параметри плану визначаються в даний час двома способами: на основі обчислення ВСЗ на границі зони БС або на основі обчислення відсотка часу, протягом якого допускається, щоб це значення було менше захисного відношення. У розділі відзначено недоліки, властиві двом способам.

За умови обмеженості потужності передавача БС отримано вираз для критичного значення відношення відстані між передавачами суміщеного каналу до радіуса зони БС, який враховує ослаблення сигналу й завад у напрямку МС, число завад по суміщеному каналу та необхідне захисне відношення сигнал/(взаємна завада плюс шум) на вході приймача МС.

Проведений аналіз комп'ютерних методів ТЧП показав, що основу більшості методів складає

набір моделей розрахунку енергетичних утрат, виникаючих при поширенні радіохвиль на трасах ССРЗ. Від точності застосовуваних моделей прямо залежать основні результати планування. У розділі вказується на істотний недолік більшості комп'ютерних методів територіально-частотного планування ССРЗ – вибір як єдиного критерію оптимальності процесу ТЧП мінімуму числа БС за умови забезпечення радіопокриття заданого відсотка території міста.

Аналіз можливостей існуючих методів територіально-частотного планування ССРЗ дозволив сформулювати перелік питань, які вимагають подальшого дослідження.

**Другий розділ** присвячено розробці ймовірнісних моделей сигналів і внутрішньосистемних завад для задач територіально-частотного планування ССРЗ.

Аналіз діючих підходів до оцінки внутрішньосистемних завад у ССРЗ дозволив зробити висновок, що основними видами завад, які визначають частотну ефективність ССРЗ і внутрішньосистемну ЕМС, є завади по суміщеному каналу. Наявність даного виду завад приводить до просторово-частотних обмежень у задачах присвоєння груп частотних каналів (ГЧК) базовим станціям.

З припущення, що ймовірнісні розподіли миттєвих значень обвідної корисного сигналу й завади описуються чотирьохпараметричним розподілом, отримано закони розподілу і ХФ потужності сигналу й сумарної потужності завад по суміщеному каналу на вході приймача МС. Так, наприклад, для ХФ потужності корисного сигналу  $P_c$  отримано наступний вираз:

$$\Theta_P(s) = \frac{4,34}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \int_0^{\infty} \frac{1}{\bar{P}_c} \left( \frac{\Lambda_c^2}{2\bar{P}_c} \beta^{k+1} + \beta^k \right) \exp\left( -\frac{\Lambda_c^2}{2\bar{P}_c} - \frac{(10 \lg(\bar{P}_c) - m_c)^2}{2\sigma_c^2} \right) d\bar{P}_c; \quad \beta = \frac{1}{1+s\bar{P}_c}, \quad (1)$$

де  $\bar{P}_c$  – середня потужність сигналу, Вт;

$\Lambda_c^2$  – квадрат модуля вектора середніх значень квадратурних складових сигналу;

$k$  – змінна, що приймає значення 0,5 або 1.

Формула (1) дозволяє врахувати більшість законів розподілу обвідної сигналу: якщо

$k = 0,5$  і  $\Lambda_c^2 = 0$ , маємо односторонній нормальний закон розподілу ймовірностей обвідної сигналу;

якщо  $k = 1$  і  $\Lambda_c^2 = 0$ , маємо релеєвський закон розподілу; якщо  $k = 1$  і  $\Lambda_c^2 \neq 0$ , маємо узагальнений релеєвський закон розподілу. В усіх випадках враховано, що середня потужність сигналу має логнормальний закон розподілу.

Отримані в роботі закони розподілу середнього значення потужності сигналу враховують протоколи підтримання безперервного зв'язку в ССРЗ. Розрахунки показали, що необхідна потужність передавача МС з урахуванням енергетичного запасу на повільні завмирання сигналу в



системі базових станцій, що здійснюють контроль рівня сигналу, виявляється меншою на 2...7 дБ, ніж у системі, що не використовує контроль. Даний факт дозволяє зменшити енергетику радіонапрямку від мобільної до базової станції.

Розроблене в дисертації ймовірнісне описання сигналів і внутрішньосистемних завад враховує, насамперед, варіанти топології – випадкової і/або детермінованої – джерел і приймачів завад у ССРЗ, наявність керування потужністю передавачів МС, телефонне навантаження (ТН) у зоні БС і той факт, що ССРЗ є системою масового обслуговування.

Наприклад, для ХФ сумарної потужності завад на вході приймача БС в ССРЗ з кодовим розділенням каналів отримано наступний вираз:

$$\Theta_{\zeta}(s) = v_1 \prod_{j=1}^{\rho_1 S_1 - 1} \Theta_{\xi_j}(s) \prod_{i=2}^7 v_i p_{r \max}(\Delta S_i) \Theta_{\xi}^{\rho_i \Delta S_i}(s), \quad (2)$$

де  $p_{r \max}(\Delta S_i)$  – максимальне значення щільності розподілу ймовірностей перебування  $r$ -го числа МС в  $i$ -му сегменті;

$v_i$  – ймовірність активності абонентів в  $i$ -й зоні;

$\rho_i \Delta S_i$ ,  $\rho_1 S_1$  – середня кількість МС в  $i$ -му сегменті та в зоні БС відповідно:

$$\rho_i \Delta S_i = \iint_{\Delta S_i} R_i \rho_i(\alpha_i, R_i) d\alpha_i dR_i; \quad \rho_1 S_1 = \iint_{S_1} R_i \rho_i(\alpha_i, R_i) d\alpha_i dR_i;$$

$\rho_i$  – поверхнева щільність МС;

$R_i$ ,  $\alpha_i$  – полярні координати точки-місцеположення МС;

$S_1$ ,  $\Delta S_i$  – площа зони БС та  $i$ -го сегмента відповідно.

У формулі (2) враховано, що для будь-якої БС одночасно існує шість сегментів, в яких можуть знаходитися джерела завад. Кожний сегмент утворюється перетином шестикутника, яким апроксимована зона БС, і круга, який являє собою зону суміжної БС.

При розгляді питання обліку завад від сусіднього каналу під час територіально-частотного планування ССРЗ відношення сигнал/завада від сусіднього каналу на вході приймача МС визначено для випадків, коли на БС використовуються неспрямовані та спрямовані антени. Досліджено залежності відношення сигнал/завада від сусіднього каналу на вході демодулятора МС при використанні в тракці проміжної частоти приймача фільтра Баттерворта і фільтра з гаусівською амплітудно-частотною характеристикою. У результаті показано, що при використанні діючих територіально-частотних планів у системах GSM-900 і D-AMPS навіть для найгіршого випадку поширення завад від сусіднього каналу впливом цих завад на характеристики ССРЗ

можна знехтувати й виконувати ТЧП без обліку завад від сусіднього каналу.

**Третій розділ** присвячено розробці рекомендацій з практичного використання методів розрахунку енергетичних утрат, що виникають при поширенні радіохвиль на трасах ССРЗ. У роботі докладно розглянуто методи Окамури, Хата, Уолфіша - Ікегамі, а також ряд методів, використовуваних для проведення розрахунків дифракційних утрат. Наводиться також коротка характеристика методу Ібрагіма – Парсона, моделі Terrain Integrated Rough Earth Model та методу Reflection plus Multiple Diffraction Loss.

Результати аналізу методів свідчать про те, що для міських і приміських районів із незначними нерівностями рельєфу втрати можна визначити за формулою Хата, яка дає практично однаковий з методом Окамури результат для відстаней між МС і БС до 30 км, але дозволяє легко організувати обчислення на ЕОМ. Розрахунок утрат за формулою Хата в ССРЗ цифрових і аналогових стандартів можна проводити на одній частоті для всієї території покриття: помилка у визначенні величини втрат, як показали розрахунки, не перевищує при цьому 0,3...0,6 дБ.

Утрати на трасах із значними нерівностями рельєфу необхідно визначати, користуючись методом Уолфіша - Ікегамі. Показано, що в умовах середнього міста залежність утрат від відстані, розрахована методом Уолфіша - Ікегамі, наближається до залежності, отриманої за формулою Хата.

Оскільки практично всі методи розрахунку енергетичних утрат на трасах ССРЗ є емпіричними, застосовність будь-якого методу для розрахунку в конкретному регіоні повинна досліджуватися додатково. У випадку відхилення результатів розрахунку від обмірюваних значень, необхідно виконати корекцію параметрів методу розрахунку. У роботі зазначено, що для методу Хата оцінки параметрів рівняння, яке враховує енергетичні втрати, можна визначити за обмірюваними значеннями методом найменших квадратів. Показано, що використання розповсюдженої моделі множинної регресії для прогнозування втрат при поширенні сигналу на трасах ССРЗ може виявитися неефективним, оскільки більшість складових утрат не можна представити у вигляді суми незалежних факторів, які можна було б вимірити безпосередньо на місцевості. Більш універсальним способом коректування параметрів методу розрахунку є спосіб, заснований на технології штучних НМ. У роботі представлена формалізація задачі коректування параметрів методів розрахунку втрат шляхом застосування багаточислової НМ і алгоритму зворотного функціонування, використовуваного для її навчання.

У третьому розділі були розглянуті також питання розрахунку множника ослаблення на трасах ССРЗ з урахуванням точності ЕК. Під точністю ЕК розумілася відповідність зображених на карті об'єктів і явищ дійсному їхньому місцезнаходженню, розмірам, плановим обрисам і висотному положенню. Точність оцінювалася величинами абсолютних і відносних позиційних погрешностей відповідних показників, визначених на карті, щодо дійсних значень.

Погрішність визначення місцеположення, відстаней і висот по карті приводить, як правило, до погрішності визначення множника ослаблення. У роботі визначено погрішності множника ослаблення як функції величин відстань і висота у випадках, коли його розрахунок виконувався методами Хата, Фока – Калініна, а також для випадку закритої траси з клиноподібними перешкодами.

Дослідження впливу точності ЕК на погрішність розрахунку енергетичних утрат, виникаючих при поширенні радіохвиль, показало, що граничні абсолютні погрішності множників ослаблення, обумовлені погрішностями визначення місцеположення, відстаней і висот по карті, не перевищують у більшості випадків 3 дБ.

**Четвертий розділ** присвячено питанню розробки показника ефективності методів територіально-частотного планування ССРЗ. У якості показника ефективності існуючих і знову розроблювальних методів запропоновано використовувати число абонентів, для яких імовірність відказу в обслуговуванні не перевищує припустиме значення. Таким чином, метод ТЧП є ефективним, якщо він дозволяє максимізувати число абонентів ( $N_a \rightarrow \max$ ) з урахуванням заданої якості їх обслуговування: рівень  $m_{ci}$  сигналу на вході приймача  $i$ -го абонента повинен бути не менше заданого значення  $P_0$ , а ймовірності відказу в обслуговуванні абонента в зоні однієї БС  $p_{отк1}$  і в багатозоновій мережі  $p_{отк\infty}$  не повинні перевищувати припустиме значення  $p_T$ :  $m_{ci} > P_0$ ;  $p_{отк1} < p_T$ ;  $p_{отк\infty} < p_T$ .

З урахуванням можливого блокування каналів на БС і події, пов'язаної з порушенням нормального функціонування радіоканалу, імовірність відказу абонентові в зоні однієї БС можна представити в наступному виді:

$$p_{отк1} = p_{бл} + p(h^2 < h_0^2) - p(h^2 < h_0^2)p_{бл}, \quad (3)$$

де  $p_{бл}$  – імовірність блокування розмовних каналів на БС;

$p(h^2 < h_0^2)$  – імовірність неперевикнення мінімально припустимого відношення сигнал/взаємна завада  $h_0^2$  на вході приймача МС.

Аналіз графіків залежності ймовірності відказу в обслуговуванні РА від швидкості його руху, радіуса зони БС, розмірності кластера й абонентської ємності системи показав, що ймовірність відказу слабо залежить від швидкості руху РА. Останній факт пояснюється тим, що за час розмови, що триває в середньому 90...120 секунд, РА не залишає зону однієї БС. Даний факт дозволив проводити надалі розрахунок імовірності відказу, розглядаючи тільки випадки розташування РА на границі зон трьох чи двох суміжних БС. У цих випадках імовірності відказу в обслуговуванні

абонента дорівнюють відповідно  $p_{\text{отк } 3} = \sum_{i=1}^3 C_3^i p_{\text{отк } 1}^i (1 - p_{\text{отк } 1})^{3-i}$  і  $p_{\text{отк } 2} = 2 p_{\text{отк } 1} - p_{\text{отк } 1}^2$ , де

$C_3^i$  – число всіх комбінацій із трьох елементів по  $i$ .

На основі ймовірнісного описання сигналів і внутрішньосистемних завад, з урахуванням характеристик ССРЗ як СМО, отримано аналітичні вирази для ймовірності відказу радіоканалу ССРЗ. При цьому розглядалися два випадки. У першому припускалося, що величина ВСЗ являє собою відношення двох випадкових величин – середньої потужності сигналу до середньої сумарної потужності завад, – кожна з яких має логнормальний закон розподілу ймовірностей. У другому випадку величина ВСЗ являла собою відношення потужності сигналу до сумарної потужності завад. На вид імовірнісних законів розподілу рівнів сигналів і завад в останньому випадку не накладалося особливих обмежень.

У першому випадку для ймовірності відказу радіоканалу отримано наступний вираз:

$$p(h^2 < h_0^2) = 0,5 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{m_c - m_\zeta - h_0^2}{\sqrt{2(\sigma_c^2 + \sigma_\zeta^2)}} \right) \right), \quad (4)$$

де  $m_c$  – медіанне значення  $\bar{P}_c$ , дБ·Вт;

$\sigma_c$  – середнє квадратичне відхилення (СКВ) медіанного значення змін потужності сигналу, дБ;

$\sigma_\zeta$ ,  $m_\zeta$  – СКВ і медіанне значення сумарної потужності завад, дБ;

$\operatorname{erf}(\ast)$  – функція помилок.

У другому випадку ймовірність відказу радіоканалу визначається виразом

$$\bar{p}(h^2 < h_0^2) = 1 - \int_0^\infty \Theta_\zeta \left( \frac{h_0^2}{\bar{P}_c} \right) \omega_c(\bar{P}_c) d\bar{P}_c; \quad \Theta_\zeta(s) = \sum_{r=1}^N p_r \prod_{i=1}^r \Theta_{\xi_i}(s), \quad (5)$$

де  $\omega_c(\bar{P}_c)$  – щільність розподілу ймовірностей середньої потужності сигналу;

$r$  – випадкова величина, яка має біноміальний закон розподілу:  $p_r = C_N^r p_{\text{бл}}^r (1 - p_{\text{бл}})^{N-r}$ ;

$N$  – кількість завад на вході приймача МС; в окремому випадку  $N = 3 \left\lceil \frac{R_0}{D} \left( 1 + \left\lceil \frac{R_0}{D} \right\rceil \right) \right\rceil$ ;

$R_0$  – радіус зони обслуговування ССРЗ;

$D$  – захисна відстань;

$\Theta_{\xi_i}(s)$  – характеристична функція потужності  $i$ -ї завади.

Отримані вирази для ймовірності відказу радіоканалу ССРЗ враховують сукупність очікуваних умов використання системи, а саме:

- морфологію територіально-частотних планів;
- присутність у точці прийому завод по основному каналу і випадковий їх характер, пов'язаний, насамперед, з випадковим характером виникнення заявок на обслуговування;
- комплексний характер завмирань сигналу й завади, суть якого полягає в тому, що крім порівняно повільних змін обвідної і потужності сигналу, пов'язаних із затіненням траси поширення радіохвиль, зміною впливу тропосфери на характеристики поширення, існують швидкі їхні зміни, динаміка яких устанавлюється на інтервалі в кілька періодів несучого коливання;
- використання процедури передачі керування.

У роботах автора [10, 11] розглянуто вплив на величину ймовірності відказу радіоканалу схеми рознесення прийому, використовуваної на МС.

**У п'ятому розділі** розглянуто питання аналізу територіально-частотних планів ССРЗ на основі обраного показника і розроблено пропозиції по підвищенню їхньої ефективності. Оскільки всі теоретичні методи ТЧП базуються на передумовах однорідності розподілу абонентів на території обслуговування, було зроблено припущення, що число абонентів, які обслуговуються системою, для різних варіантів територіально-частотних планів однакове. Це припущення дозволило проводити аналіз на основі обчислення ймовірності відказу в обслуговуванні абонентів, розташованих на границі зон БС.

Аналіз залежності ймовірності відказу радіоканалу ССРЗ від розмірності кластера  $C$  і припустимого значення ВЗЗ показав, що у випадку використання територіально-частотних планів із малими значеннями розмірності кластера ( $C = 3; 4$ ) при досить великому захисному відношенні сигнал/завада ( $h_0^2 > 15$  дБ) ймовірність відказу може набувати великих значень (більше 0,1). Крім того, системи, які використовують кластери великої розмірності ( $C = 12 \dots 21$ ), є менш чутливими до збільшення числа БС що заважають, особливо коли  $h_0^2 < 10$ . Використання антен із шириною діаграми спрямованості в горизонтальній площині  $60^\circ$  і  $120^\circ$  у цих системах менш ефективно, ніж у ССРЗ із малою розмірністю кластера і великим захисним відношенням  $h_0^2$ .

Показано, що істотний вплив на ймовірність відказу радіоканалу справляють флуктуації рівнів сигналу й завади, які виражаються через параметр  $\sigma$  – СКВ медіанного значення змін їх потужностей. Збільшення параметра  $\sigma$  в ССРЗ із великою розмірністю кластера завжди

приводить до збільшення ймовірності відказу радіоканалу, оскільки в цьому випадку погіршуються умови поширення сигналу в межах зони корисної БС. Сказане справедливо також і для ССРЗ з кластерами малої розмірності і спрямованими антенами на БС. Збільшення рівня флуктуацій сигналів і завад у ССРЗ із меншою розмірністю кластера у випадку використання неспрямованих антен, навпроти, може означати зменшення ймовірності відказу радіоканалу, оскільки в цьому випадку погіршуються умови поширення “близьких” завад у напрямку розглянутої МС.

Аналіз територіально-частотних планів систем NMT-450 і AMPS за критеріями відношення сигнал/завада й ймовірності обслуговування абонента показав, що притаманний системі NMT розподіл ГЧК за схемами 3/9 і 4/12 уступає розподілу, який використовується в американській системі AMPS (рис.1). Розподіл ГЧК за схемами 3/9 і 4/12 використовується також у системі GSM-900. У зв'язку з цим представляється доцільним рекомендувати використовувати територіально-частотний план системи AMPS при розгортанні систем NMT та GSM на території України.

Рис.1. Ймовірність відказу  $p_{\text{откз}}$  в системах NMT-450 і AMPS

З рис.1 випливає, що складний характер завмирань сигналів (швидкі завмирання поєднуються з повільними) приводить до значного збільшення величини  $p_{\text{откз}}$ . Урахування релеевських завмирань показує, що величина  $p_{\text{откз}}$  може дорівнювати 39% для розподілів 3/9 та 4/12. Неврахування швидких завмирань приводить до одержання занижених оцінок ймовірності відказу.

Для уточненого розрахунку кількості частотних каналів, необхідних для обслуговування РА у зоні БС з ймовірністю відказу не перевищуючою припустиму величину, розроблено стохастичні моделі ССРЗ і абонентського доступу до її ресурсу і поставлено експеримент з імітаційного моделювання. Стохастичні моделі враховують наявність повторних викликів, випадкову тривалість розмови, а також завмирання й накладення сигналів у каналі зв'язку. Результати експерименту вказали на відносно малу вагу долі відказів, які виникають внаслідок зіткнення пакетів від РА у каналі доступу, серед загальної кількості відказів при значеннях ймовірності блокування каналів менших 10%. Шляхом аналізу графічних залежностей показано, наприклад, що для обслуговування потоку заявок від абонентів загальною інтенсивністю 1000 викликів/год на БС необхідно організувати 43 розмовних канали, а для обслуговування потоку інтенсивністю 750 викликів/год необхідне число каналів скорочується до 34. При цьому ймовірність блокування каналів у годину найбільшого ТН не перевищує 10%.

**У шостому розділі** на основі проведених теоретичних досліджень запропоновано метод ГЧП ССРЗ. Як критерій ефективності розроблювального за допомогою методу територіально-частотного плану використовується число абонентів, для яких виконуються умови

надійного зв'язку:  $m_{ci} > P_0$ ;  $p_{отк1} < p_T$ ;  $p_{отк\infty} < p_T$ . У рамках описаного у роботі загального методу ТЧП розроблено інші методи.

Запропоновано новий метод розміщення БС. Показано, що з математичної точки зору задача розміщення БС еквівалентна задачі класифікації, у якій дані про територіальний розподіл абонентів потрібно розділити на стійкі групи. Такі задачі називають задачами класифікації без учителя або кластеризації. Серед евристичних алгоритмів класифікації без учителя, заснованих на використанні мір близькості між об'єктами, виділено мережні алгоритми, які будуються на основі ітераційного методу динамічних ядер. Метод динамічних ядер дозволяє знаходити набір з  $k$  ядер  $a_1, \dots, a_k$  і розбивку вибірки векторів даних  $\{x^P\}$  на  $k$  класів  $\{x^P\} = P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_k$ , мінімізуючи наступний критерій якості:

$$D = D(a_1, a_2, \dots, a_k, P_1, P_2, \dots, P_k) = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in P_i} d(x, a_i) \rightarrow \min, \text{ де } d(x, a_i) - \text{міра близькості } x \text{ і } a_i$$

– позитивно визначена квадратична форма від різниці  $x - a_i$ .

За певних умов метод динамічних ядер можна реалізувати за допомогою НМ Кохонена. Остання, у свою чергу, може легко навчатися на наборі даних, який представляє собою дискретну тривимірну функцію, що описує просторовий розподіл очікуваного ТН.

Для детального вивчення питання розміщення БС із застосуванням описаної в розділі НМ Кохонена була обрана представлена в роботі Tutschku множина вузлів запитів, яка відповідає центру міста Wurzburg. На даній множині вузлів група вчених з Інституту Комп'ютерних Наук (Wurzburg, Німеччина) вирішували задачу розміщення дев'яти БС за допомогою створеного ними програмного засобу планування стільникових систем зв'язку ІСЕРТ.

Для рішення задачі розміщення БС у дисертаційній роботі використовувався пакет прикладних програм Neural Network Toolbox, який функціонує під керуванням ядра системи MATLAB. Отримані результати порівнювалися з результатами ІСЕРТ. Оцінка результатів указала на можливість використання НМ Кохонена для задачі розміщення БС (рис.2 – 3).

Рис. 2. Карта newsom після 1000 циклів навчання

Рис. 3. Результат роботи ІСЕРТ

Жирними точками на рис. 2 – 3 відмічено БС. Нейронна мережа з випадковою початковою топологією формувалася за допомогою М-функції `newsom([0 9; 0 9],[3 3],'randtop','dist')`.

Практичний інтерес при реальному проектуванні топологічної структури ССРЗ викликає задача визначення мінімально можливого значення розмірності кластера  $C_{\min}$ . Зменшення розмірності кластера завжди означає збільшення частотної й економічної ефективності ССРЗ. У роботі запропоновано метод побудови ССРЗ із мінімальною розмірністю кластера, який дозволяє знаходити оптимальний у значенні використання частотного ресурсу розподіл ГЧК. Вхідним

даним для методу служить таблиця суміжності зон, яка містить перелік суміжних зон для обраної БС. Метод дозволяє, не удаючись до повного перебору, знаходити розподіл ГЧК з  $C \leq 4$ .

Недоліком розробленого методу розміщення БС за допомогою НМ Кохонена є те, що головним фактором, який ефективно впливає на місцеположення БС, вважалось ТН, а не потужності передавачів і чутливості приймачів МС і БС. Крім того, з розгляду виключалися також ефекти поширення радіохвиль (ослаблення сигналу внаслідок поглинання в середовищі, дифракція і т.п.). Запропонований метод розміщення БС не є оптимальним ще і тому, що число циклів навчання НМ на практиці було обмеженим (на рис.2 – 1000 циклів) через часові рамки й обчислювальну складність. Тому виникла необхідність розробки методу коректування місцеположення БС, яке повинне здійснюватися з урахуванням відомостей про потужність сигналу в точці прийому, ВСЗ і ймовірність відказу в обслуговуванні абонента.

Як критерій оптимального розміщення БС запропоновано використовувати кардинальне число множини вузлів запитів  $\bar{\Omega}_3$ , сформованої за спеціальним правилом:

$$\bar{\Omega}_3 = \overline{\Omega_1 \cup \Omega_2}, \quad \Omega_1 = \{MS_i : MS_i \notin Z\}, \quad \Omega_2 = \{MS_i : MS_i \in \bigcup (Z_k \cap Z_l)\} \quad \forall k, \forall l \in J, \quad k \neq l; \quad (6)$$

$$Z = \bigcup (Z_j : j \in J), \quad Z_j = \{MS_i : m_{cij} > P_0, p_{отки} < p_T\} \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad J = \{1, \dots, n\}, \\ I = \{1, \dots, m\};$$

де  $Z_j$  – зона  $j$ -ї БС;  $BS_j$  –  $j$ -а БС;  $MS_i$  –  $i$ -а МС;  $n, m$  – число БС і МС відповідно.

Оптимальне розміщення БС досягається у випадку, коли мінімізується цільова функція  $\aleph(\bar{\Omega}_3)$  – кардинальне число множини  $\bar{\Omega}_3$ :  $\aleph(\bar{\Omega}_3) \rightarrow \min$ . Показано, що оптимізація розміщення БС може бути виконана на основі алгоритмів навчання НМ – больцмановського та Коші.

У шостому розділі наведено структурну схему алгоритму територіально-частотного планування ССРЗ, яка узагальнює результати досліджень.

**У висновках** наведено результати досліджень і сформульовані загальні висновки по роботі.

**У додатках** наведено виводження виразу для ймовірності відказу радіоканалу, описуються імітаційна модель ССРЗ як системи масового обслуговування та спеціалізований програмний комплекс, у складі якого вирішувалася задача імітаційного моделювання процесу абонентського доступу до ССРЗ. Додатки включають також акт про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальному процесі в Харківському національному університеті радіоелектроніки.

## ВИСНОВКИ



У дисертаційній роботі виконано теоретичне узагальнення і представлено нове рішення наукової задачі, пов'язаної з дослідженням ефективності методів територіально-частотного планування ССРЗ і розробкою методів, які забезпечують планування цих систем з обліком імовірнісних характеристик сигналів і внутрішньосистемних завад, енергетичних утрат при поширенні радіохвиль на трасах, точності ЕК, технічних характеристик ССРЗ, а також випадкового характеру потоку викликів. Основні задачі, які переслідувалися в процесі дослідження ефективності й розробки нових методів ТЧП, полягали в забезпеченні підвищеної якості обслуговування абонентів ССРЗ, оптимального використання РЧР і внутрішньосистемної ЕМС. Задача підвищення якості обслуговування абонентів вирішувалася шляхом максимізації числа абонентів, для яких виконуються умови надійного зв'язку. Для забезпечення оптимального використання РЧР запропоновано використовувати метод призначення ГЧК, який дозволяє добиватися мінімальної розмірності кластера ССРЗ. Поліпшення внутрішньосистемної ЕМС у ССРЗ, спроектованої за допомогою запропонованих методів, досягається, на відміну від інших методів, шляхом використання уточнених імовірнісних моделей сигналів і внутрішньосистемних завад, які враховують топологію – випадкову і/або детерміновану – джерел і приймачів завад, швидкі й повільні завмирання, а також особливості протоколів підтримання безперервного зв'язку в ССРЗ. Основні результати дисертаційної роботи можна сформулювати так.

З припущення, що ймовірнісні розподіли миттєвих значень обвідної сигналу й завади по суміщеному каналу описуються чотирьохпараметричним розподілом, отримано закони розподілу і ХФ потужностей сигналу і соканальної завади на входах приймачів МС і БС, які враховують варіанти топології – випадкової і/або детермінованої – джерел і приймачів завад, швидкі й повільні завмирання сигналів і завад, а також протоколи підтримання безперервного зв'язку в ССРЗ. Показано, що при використанні відомих територіально-частотних планів у системах GSM-900 і D-AMPS впливом завад від сусіднього каналу можна знехтувати й виконувати планування ССРЗ без обліку цих завад.

Проведений у роботі аналіз методів розрахунку енергетичних утрат, які виникають при поширенні радіохвиль на трасах ССРЗ, показав, що для міських і приміських районів із незначними нерівностями рельєфу втрати при поширенні сигналу можна визначати по формулі Хата, яка дає практично однаковий з методом Окамури результат для відстаней між МС і БС менше 30 км, але дозволяє легко організувати обчислення за допомогою ЕОМ. Показано, що розрахунок утрат за формулою Хата в ССРЗ цифрових і аналогових стандартів можна проводити на одній частоті для всієї території обслуговування. Помилка у визначенні величини втрат при цьому не перевищує 0,3...0,6 дБ. Показано, що енергетичні втрати при поширенні сигналу на трасах із значними нерівностями рельєфу доцільно визначати, користуючись методом Уолфіша – Ікегамі. Визначено умови, за яких методи Уолфіша – Ікегамі і Хата дають близькі результати.

Формалізовано задачу коректування параметрів методів розрахунку енергетичних утрат на трасах ССРЗ за результатами натурних вимірювань. У методі Хата оцінки параметрів рівняння, яке описує енергетичні втрати при поширенні радіохвиль, можна визначити за обмірюваними значеннями методом найменших квадратів. Зазначено, що більш універсальним способом коректування параметрів методу розрахунку є спосіб, заснований на технології штучних НМ.

Проведені дослідження впливу точності ЕК на погрішність розрахунку втрат на трасах ССРЗ показали, що граничні абсолютні погрішності множників ослаблення, обумовлені погрішностями визначення місцеположення, відстаней і висот по карті, не перевищують 3 дБ. Зазначену цифру можна врахувати шляхом відповідного корегування рівняння передачі.

У якості показника ефективності методів ТЧП запропоновано використовувати число абонентів, імовірність відказу в обслуговуванні яких не перевищує припустимого значення. Уперше отримано аналітичні вирази для ймовірності відказу радіоканалу ССРЗ. Проведений аналіз імовірності відказу радіоканалу показав, що у випадку територіально-частотних планів із малими значеннями розмірності кластера ( $C = 3; 4$ ) при досить великому необхідному захисному відношенні сигнал/завада ймовірність відказу може набувати великих значень (більше 0,1). Крім того, системи, які використовують кластери великої розмірності ( $C = 12...21$ ), є “менш чутливими” до збільшення числа БС що заважають. Використання антен із шириною діаграми спрямованості в горизонтальній площині  $60^\circ$  і  $120^\circ$  у цих системах менш ефективно, ніж у ССРЗ із малою розмірністю кластера і великим необхідним захисним ВСЗ.

Аналіз територіально-частотних планів, притаманних системам NMT-450 і AMPS, показав, що розподіл ГЧК за схемами 3/9 і 4/12 у системі NMT поступається щодо критерію ймовірності відказу в обслуговуванні абонента розподілу, який використовується в американській системі AMPS. Тому планування систем NMT та GSM-900 на території України рекомендовано виконувати із залученням територіально-частотного плану системи AMPS.

На основі розробленої стохастичної моделі ССРЗ як СМО був поставлений експеримент на ЕОМ, у ході якого визначалася необхідна кількість частотних каналів на БС із припустимою ймовірністю блокування кожного. Нова модель ССРЗ враховує наявність повторних викликів, випадкову тривалість розмови, завмирання й накладення сигналів. Модель реалізовано у вигляді спеціалізованого програмного комплексу – системи з відкритою архітектурою.

На основі проведених теоретичних досліджень розроблено метод територіально-частотного планування ССРЗ, який використовує запропонований критерій ефективності. Новий метод вимагає побудови карти розподілу ТН. Розроблено новий метод розміщення БС із використанням НМ Кохонена, яка реалізує метод динамічних ядер. Можливість використання НМ для рішення задачі розміщення БС доведена на прикладі. Як розширення методу розміщення, запропоновано використовувати метод коректування місцеположення БС, який враховує відомості про

потужність сигналу в точці прийому, ВСЗ і ймовірність відказу в обслуговуванні абонента. Як критерій оптимального розміщення БС запропоновано використовувати кардинальне число множини вузлів запитів, сформованої за спеціальним правилом. Показано, що оптимізація розміщення БС може виконуватися на основі алгоритмів навчання НМ.

Розроблено метод побудови ССРЗ із мінімальною розмірністю кластера, який дозволяє знаходити оптимальний у змісті використання частотного ресурсу розподіл ГЧК. Метод дозволяє, не удаючись до повного перебору, знаходити розподіл ГЧК з  $C \leq 4$ .

Розроблені нові методи ТЧП можуть увійти до складу ПАК планування ССРЗ. Програмна реалізація методів дозволить проводити проектування ССРЗ із погляду забезпечення ними заданої якості обслуговування максимального числа абонентів.

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертації опубліковані в наступних роботах:

1. Білоус Ю.В., Плотников М.Д. Частотно-територіальне планування стільникових систем зв'язку стандарту NMT // Зв'язок. – 2000. – № 6. – С.26–30.
2. Білоус Ю.В. Погрешность расчета множителя ослабления в радиоперелиниях подвижной связи // Український метрологічний журнал. – 2001. – Вип.3. – С.53–56.
3. Білоус Ю.В. Калибрование моделей распространения радиоволн по результатам измерений в сотовых системах подвижной радиосвязи // Праці УНДІРТ. – 2001. – №1(25). – С.34–37.
4. Білоус Ю.В. Защищенность стільникової системи рухомого радіозв'язку від завад по сусідньому каналу // Зв'язок. – 2001. – № 4. – С.53–55.
5. Білоус Ю.В. Моделі завад у стільникових системах зв'язку з кодовим розділенням каналів // Праці УНДІРТ. – 2000. – №1(21). – С.17–21.
6. Білоус Ю.В. Частотна ефективність стільникових систем зв'язку // Зв'язок. – 1999. – №5. – С.39–40.
7. Білоус Ю.В., Білоус О.В., Маліцький О.Г. Призначення оптимальної кількості частот у сотових мережах зв'язку за результатами імітаційного моделювання // Радіотехніка. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. – 1998. – Вип. 108. – С.171–182.
8. Білоус Ю.В., Білоус О.В., Олійник В.Ф. Територіальне планування сотових мереж зв'язку з оцінкою інтегральних показників якості // Радіотехніка. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. – 1998. – Вип. 108. – С.161–170.
9. Білоус Ю.В. Аналіз імовірності відказу радіоканалу стільникової мережі зв'язку // Зв'язок. – 2000. – №1. – С.42–44.
10. Білоус Ю.В. Рознесення приймання у радіоканалах стільникових систем рухомого

радіозв'язку // Праці УНДІРТ. – 2001. – №3(27). – С.23 – 27.

11. Білоус Ю.В. Исследование эффективности схемы разнесенного приема в радиоканалах сотовых систем связи // Радиоэлектроника. – 2000. – №10. – С.55 – 60. – (Изв. вузов).

12. Білоус Ю.В. Аналіз територіального плану стільникової системи зв'язку міста Харкова // Радіотехніка. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. – 1999. – Вип.109. – С.173–183.

13. Білоус Ю.В. Территориальное планирование сотовых систем подвижной радиосвязи // 3-я Международная научно-техническая конференция "Техника и технология связи": Доклады. – Одесса: УГАС. – 2001. – С.122–128.

14. Білоус Ю.В., Абу-Румейях Мохамед. Побудова стільникової мережі зв'язку з мінімальною вимірністю кластера // IV Международный молодежный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". Сб. научных трудов. Часть 1. – Харьков: ХГТУРЭ. – 2000. – С.149–150.

15. Білоус Ю.В., Абу-Румейях Мохаммед. Методология проектирования баз данных, используемых при планировании сотовых систем подвижной радиосвязи // 6-я Международная конференция "Теория и техника передачи, приема и обработки информации". Сб. научных трудов. – Харьков: ХГТУРЭ. – 2000. – С.556–558.

16. Білоус Ю.В., Спесивцев В.Н. Методика размещения оборудования сотовых систем связи на пересеченной местности // 1-й Международный молодежный форум "Электроника и молодежь в XXI веке". Тезисы докладов. – Харьков. – 1997. – С.54.

## АНОТАЦІЇ

Білоус Ю.В. Методи територіально-частотного планування стільникових систем рухомого радіозв'язку та аналіз їх ефективності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2003.

Дисертація присвячена актуальній проблемі розробки ефективних методів територіально-частотного планування (ТЧП) стільникових систем рухомого радіозв'язку (ССРЗ). Запропоновано нове ймовірнісне описання сигналів і внутрішньосистемних завад у ССРЗ, яке ґрунтується на понятті характеристичної функції потужності сигналу й завади, а також показано його застосування в задачах ТЧП ССРЗ. Розроблено рекомендації з практичного використання методів розрахунку енергетичних утрат, виникаючих при поширенні радіохвиль на трасах ССРЗ. Визначено погрішності множника ослаблення з урахуванням точності електронної карти. Розроблено критерій ефективності методів ТЧП і метод планування ССРЗ, у якому визначення області покриття для окремих базових станцій (БС), їхніх груп і системи в цілому ґрунтується на

обчисленні ймовірності відказу в обслуговуванні рухомого абонента (РА). Отримано аналітичні вирази для ймовірності відказу в обслуговуванні РА, а також ймовірності відказу радіоканалу ССРЗ. Розроблено імітаційну модель абонентського доступу до ресурсу ССРЗ, яка дозволяє врахувати реальні умови функціонування цих систем: наявність повторних викликів, випадкову тривалість розмови, вплив завмирань і накладень сигналів і т.п. На основі машинного експерименту показана можливість використання розробленої моделі для проведення розрахунків каналної ємності БС. Запропоновано метод розміщення БС на місцевості з використанням нейронної мережі що самоорганізується, а також метод коректування місцеположення БС, який базується на використанні алгоритмів навчання нейронних мереж. Запропоновано метод побудови ССРЗ з мінімальною розмірністю кластера, який дозволяє знаходити оптимальний у змісті використання частотного ресурсу розподіл груп частотних каналів.

Ключові слова: територіально-частотний план, характеристична функція, завада, критерій ефективності, ймовірність відказу, множник ослаблення, електронна карта, нейронна мережа.

Билоус Ю.В. Методы территориально-частотного планирования сотовых систем подвижной радиосвязи и анализ их эффективности. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2003.

Диссертация посвящена актуальной проблеме разработки эффективных методов территориально-частотного планирования (ТЧП) сотовых систем подвижной радиосвязи (ССПР).

Из предположения, что вероятностные распределения мгновенных значений огибающей сигнала и помехи по совмещенному каналу описываются четырёхпараметрическим распределением, получены законы распределения и характеристические функции мощностей сигнала и соканальной помехи на входах приемников мобильной (МС) и базовой станции (БС), которые учитывают варианты топологии – случайной и/или детерминированной – источников и приемников помех, быстрые и медленные замирания сигналов и помех, а также протоколы поддержания непрерывной связи в СППР. Показано, что при использовании известных территориально-частотных планов в системах GSM-900 и D-AMPS влиянием помех от соседнего канала можно пренебречь и выполнять планирование СППР без учета этих помех.

Проведенный в работе анализ методов расчета энергетических потерь, возникающих при распространении радиоволн на трассах СППР, показал, что для городских и пригородных районов с незначительными неровностями рельефа потери при распространении сигнала можно определять по формуле Хата, дающей практически одинаковый с методом Окамуры результат для расстояний между МС и БС менее 30 км. Показано, что расчет потерь по формуле Хата в СППР

цифровых и аналоговых стандартов можно проводить на одной частоте для всей территории покрытия. При этом ошибка в определении величины потерь не превышает 0,3...0,6 дБ. Показано, что потери при распространении сигнала на трассах со значительными неровностями рельефа целесообразно определять, пользуясь методом Уолфиша – Икегами. Определены условия, при которых методы Уолфиша – Икегами и Хата дают близкие результаты.

Исследования влияния точности электронной карты на погрешность расчета энергетических потерь при распространении радиоволн показали, что предельные абсолютные погрешности множителей ослабления, обусловленные погрешностями определения местоположения, расстояний и высот по карте, не превышают 3 дБ. Указанная цифра может быть учтена путем соответствующей коррекции уравнения передачи.

В качестве показателя эффективности методов ТЧП предложено использовать число абонентов, для которых вероятность отказа в обслуживании не превышает допустимого значения. Впервые получены аналитические выражения для вероятности отказа радиоканала ССПР. Анализ вероятности отказа радиоканала ССПР показал, что в случае территориально-частотных планов с малыми значениями размерности кластера ( $C = 3; 4$ ), при достаточно большом защитном отношении сигнал/помеха вероятность отказа может принимать большие значения (0,1 и более). Кроме того, системы, использующие кластеры большой размерности ( $C = 12...21$ ), являются “менее чувствительными” к увеличению числа мешающих БС. Использование секторных антенн с шириной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости  $60^\circ$  и  $120^\circ$  в этих системах менее эффективно, нежели в системах с малой размерностью кластера и большим требуемым защитным отношением сигнал/помеха.

Анализ территориально-частотных планов, присущих системе NMT-450, показал, что распределение групп частотных каналов в соответствии со схемами 3/9 и 4/12 уступает относительно критериев вероятности отказа в обслуживании абонента и отношения сигнал/помеха распределению, используемому в американской системе AMPS.

На основе разработанной стохастической модели ССПР как системы массового обслуживания был поставлен эксперимент на ЭВМ, в ходе которого было определено необходимое количество разговорных каналов на БС с допустимой вероятностью блокирования каждого из них. Модель реализована в виде специализированного программного комплекса.

На основе проведенных теоретических исследований предложен метод ТЧП ССПР, использующий в качестве критерия эффективности территориально-частотного плана число абонентов, вероятность отказа в обслуживании которых не превышает допустимое значение.

Разработан новый метод размещения БС с использованием самоорганизующейся нейронной сети (НС), реализующей метод динамических ядер. Возможность использования самоорганизующейся НС для решения задачи размещения БС доказана на практическом примере.

Как расширение метода размещения, предложен метод корректирования местоположения БС, который учитывает сведения о мощности сигнала в точке приема, отношение сигнал/помеха и вероятность отказа в обслуживании абонента. В качестве критерия оптимального размещения БС предложено использовать кардинальное число множества узлов запросов, сформированного по специальному правилу. Показано, что оптимизация размещения БС может выполняться на основе алгоритмов обучения НС.

Предложен метод построения ССПР с минимальной размерностью кластера, позволяющий находить оптимальное в смысле использования частотного ресурса распределение ГЧК. Метод позволяет, не прибегая к полному перебору, находить распределение ГЧК с  $C \leq 4$ .

Разработанные в диссертационной работе методы ТЧП ССПР могут войти в состав программно-аппаратного комплекса планирования этих систем. Программная реализация методов позволит проводить проектирование ССПР с точки зрения обеспечения заданного качества обслуживания максимального числа абонентов.

Ключевые слова: территориально-частотный план, характеристическая функция, помеха, критерий эффективности, вероятность отказа, множитель ослабления, электронная карта, нейронная сеть.

Bilous Yu.V. Methods is territorial-frequency planning the cellular radio systems and analysis of their efficiency. – Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of the technical sciences on a speciality 05.12.02 – telecommunication systems and networks. Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkiv, 2003.

The dissertation is devoted to the actual problem of development of effective methods territorial-frequency planning (TFP) of cellular systems of a mobile radio communication (CSMR). It is offered new probabilistic model of signals and intrasystem noise in CSMR, which is based on concept of characteristic function of power of signal and noise, and also its application in tasks TFR CSMR is shown. The recommendations for practical use of methods of calculation of path losses in radio lines are developed. The errors of calculation path losses are determined in view of accuracy of an electronic map. The criterion of efficiency of methods TFP and method of planning CSMR is developed, in which the definition of area of a covering for base stations (BS) their groups and system as a whole is based on calculation of probability of failure in service of the mobile subscriber (MS). The analytical expressions for probability of failure in service MS and also probability of failure of the radiochannel CSMR are received. The simulation model of users access to a resource CSMR is developed which allows to take into account real conditions of functioning of these systems: presence of repeated calls, random duration of call, influence fading and interference's of signals etc. On the basis of computer-based experiment is

shown the possibility of use developed model for realisation of calculation of channel capacity BS is shown. The method of location BS on territorial with use self-organising neural network is developed and also the method of a correction of a location BS, which is based on use of algorithms learning neural network. The method of design CSMR with the minimal dimension of a cluster is developed which allows to find optimum in sense of use frequency resource distribution of groups frequency channels.

Key words: territorial-frequency the plan, characteristic function, noise, criterion of efficiency, probability of failure, path loss, electronic map, neural network.