

О.Р. Рихальський, к.т.н., доц.  
Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова  
Національного авіаційного університету

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛУ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ СТАНДАРТУ GSM НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ

*Проводиться аналіз побудови та функціонування мобільної системи зв'язку цифрового стандарту GSM, розглянуті фактори, що погіршують якість передачі цифрової інформації через наявність додаткових каналів прийому як від базових станцій, що працюють на співпадаючих частотах, так і від базових станцій, що працюють на сусідніх частотних каналах. Наведена методика розрахунку показників якості каналу зв'язку (рівень перешикод за сусідніми частотними каналами та ймовірність помилки на один біт), яка враховує побічні випромінювання в мобільній системі стандарту GSM.*

**Постановка проблеми.** Аналіз останніх досліджень, у яких започатковано розв'язання проблеми. Основним стандартом мобільної системи зв'язку на сьогоднішній день є цифровий стандарт GSM [1–4]. У стандарті для прийому/передачі відведена смуга частот шириною 25 МГц, в якій розміщується 124 канали зв'язку. Рознесення частот між сусідніми каналами зв'язку складає 200 кГц. Використання додатково часового ущільнення дозволяє на одній несучій частоті розмістити 8 мовних каналів одночасно. Для модуляції радіосигналу використовується спектрально-ефективна гауссівська частотна маніпуляція з мінімальним частотним зсувом – GMSK. Маніпуляція називається так тому, що послідовність інформаційних бітів до модулятора проходить через фільтр нижніх частот з гауссівською амплітудно-частотною характеристикою (ГФНЧ), що дає значне зменшення ширини смуги частот сигналу, що випромінюється. Попередня гауссівська фільтрація дозволяє значно збільшити швидкість спадання спектра GMSK сигналу порівняно з сигналами MSK (мінімальна частотна маніпуляція). Одночасно з високою спектральною ефективністю GMSK модуляції притаманне також збільшення міжсимвольної інтерференції, що може погіршити якість передачі цифрової інформації через наявність додаткових каналів прийому як від базових станцій, що працюють на співпадаючих частотах, так і від базових станцій, що працюють на сусідніх частотних каналах.

Смуга частот спектра сигналу GMSK, яка містить заданий відсоток потужності, залежить від значення добутку ширини смуги ГФНЧ  $B$  на тривалість одного біта  $T$  [5]. У разі  $BT = \infty$ , характеристики GMSK та MSK сигналів збігаються. Зменшення значення  $BT$  призводить до більш компактного спектра, але і до збільшення рівня міжсимвольної інтерференції.

Виходячи з цього, **метою статті** є розробка методики врахування побічних випромінювань у мобільній системі стандарту GSM під час розрахунку показників якості каналу зв'язку. Врахування інтерференційних складових на сусідніх частотних каналах дозволить оцінити погіршення ймовірності помилки передачі цифрової інформації в мобільних системах зв'язку.

**Постановка наукового завдання. Формулювання мети статті.** Робота мобільного зв'язку забезпечується розвинутою мережею базових станцій (фіксованих антен), які передають інформацію на комутаційні центри за допомогою радіочастотних сигналів. З метою забезпечення підвищення якості мобільного зв'язку оператори збільшують кількість базових станцій та здійснюють їх постійне переоснащення відповідно до найновітніших технологічних розробок галузі [6].

Для покращення якості зв'язку, в першу чергу, потрібно розробити частотно-територіальний план (ЧТП). Під час проектування системи виконується прив'язка системи вибраного стандарту до реальної території. Для цього необхідно:

- визначити допустиме число мовних каналів у стільнику;
- забезпечити трафік відповідно до демографічної ситуації на території;
- визначити кількість стільників та їх межі;
- розрахувати потужність передавача базової станції (БС) тощо [7].

Аналіз стану проблеми частотно-територіального планування мережі рухомого і фіксованого радіозв'язку показує, що для його вирішення не існує суто формалізованих алгоритмів, а вхідні дані часто виявляються недостатніми і неточними, що дозволяє зробити висновок про те, що найбільш конструктивним підходом до вирішення даної складної задачі є декомпозиція всієї процедури планування на ряд етапів.

Також дану проблему можна вирішити за рахунок оптимізації місць розташування базових станцій, потужності передавачів, висот антен та їх типів (неспрямовані або спрямовані за секторами) і розподіл частот між базовими станціями [8].

При розробці методики покращення якості зв'язку дуже важливо врахувати умови поширення радіохвиль. При організації мережі стільникового зв'язку для визначення оптимального місця встановлення і кількості БС, а також при вирішенні інших завдань необхідно вміти розрахувати характеристики сигналу в будь-якій точці простору в межах всієї зони обслуговування. Міське середовище утворює специфічні умови для поширення радіохвиль. Тіньові зони, багаторазове відбиття і розсіювання хвиль формують багатопроменеві поля із складною інтерференційною структурою та різкими просторовими змінами рівня сигналу. Багатопроменевий характер поширення радіохвиль, коли в точку прийому приходять хвилі з різних напрямків і з різними часовими затримками, породжує явище міжсимвольної інтерференції у разі передачі кодових послідовностей. Спотворення сигналу, які обумовлені міжсимвольною інтерференцією, можуть викликати серйозні погіршення характеристик системи і якості високошвидкісної передачі цифрової інформації, якщо тривалість затримки перевищує тривалість символу.

Модель поширення радіохвиль у вільному просторі знаходить широке застосування під час аналізу умов поширення радіохвиль у різних системах зв'язку. Ця модель пропонує відсутність відбиття радіохвиль від будь-яких поверхонь. Середовище поширення в межах радіотраси вважається однорідною. Не враховується дифракція хвиль на перешкодах, розсіювання, рефракція та інші явища, що супроводжують процес поширення радіохвиль [9]. Втрати у вільному просторі в даній методиці враховуються.

Наступним кроком, після розробки частотно-територіального плану, є розрахунок співвідношення сигнал–шуму на вході приймача мобільної станції (МС).

Чутливість приймача характеризується його можливістю приймати слабкі радіосигнали. Для оцінки чутливості використовують мінімально допустиме значення напруженості поля радіосигналу в антені, або мінімально допустиме значення потужності радіосигналу на вході приймача.

Виходячи з цього, **наукове завдання** полягає в розробці методики покращення якості зв'язку, через врахування впливу параметрів модуляції сигналу мобільної системи стандарту GSM. При цьому розраховуються показники якості каналу зв'язку: рівень перешкод за сусідніми частотними каналами та ймовірність помилки на один біт.

**Викладення основного матеріалу.** Мінімально допустиме значення потужності радіосигналу на вході приймача можна розрахувати, як [9]:

$$P_c = \frac{P_{BC} G_{PP} G_{BC} \lambda^2}{(4\pi R)^2}, \quad (1)$$

де  $P_c$  – потужність приймального сигналу;  $P_{BC}$  – потужність передавача базової станції;  $G_{PP}$  і  $G_{BC}$  – коефіцієнти підсилення приймальної антени МС і передавальної антени БС, відповідно;  $R$  – відстані від передавальної до приймальної антени.

На вході приймача МС діють власні теплові шуми і зовнішні перешкоди. Зовнішні перешкоди поділяються на індустриальні та шуми випромінювання. Вважають, що такі зовнішні перешкоди в межах шумової смуги приймача мають рівномірний спектр та їх оцінюють за допомогою коефіцієнта шуму.

Потужність теплових шумів приймача дорівнює [10]:

$$P_T = N_T k T_0 \Pi, \quad (2)$$

де  $N_T$  – коефіцієнт шуму приймача;  $k$  – постійна Больцмана;  $T_0$  – температура приймача;  $\Pi$  – ефективна ширина шумової смуги приймача.

Рівень потужності теплового шуму в дБ:

$$p_T = 10 \lg P_T = 10 \lg (N_T k T_0 \Pi) = n_T + 10 \lg (k T_0) + 10 \lg \Pi. \quad (3)$$

Враховуючи, що

$$n_T = 10 \lg N_T, \text{ дБ.} \quad (4)$$

та  $10 \lg (k T_0) = -174$  дБм/Гц, якщо  $T_0 = 290$  К; запишемо для рівня потужності теплового шуму при вказаних числових значеннях:

$$p_T = n_T - 174 + 10 \lg \Pi_{\text{kHz}}, \quad (5)$$

де  $\Pi_{\text{kHz}}$  – значення  $\Pi$ , яке виражене в кілогерцах. Типове значення коефіцієнта шуму приймача  $n_T = 7...9$  дБ для частот 800...1000 МГц [10].

Співвідношення сигнал–шум на вході приймача визначається за такою формулою:

$$q_{C-ш} = \frac{P_C}{P_T}. \quad (6)$$

Співвідношення сигнал–шум, яке виражене в дБ набуває вигляду:

$$q_{C-ш}(R) = p_C(R) - p_T. \quad (7)$$

Розрахувавши співвідношення сигнал–шум на вході приймача, потрібно врахувати наявність інтерференційних перешкод на співпадаючих частотах. Тому наступним кроком даної методики є розрахунок співвідношення сигнал/(шум + інтерференція) на вході приймача МС.

В системах рухомого зв'язку на вхід приймача МС надходить корисний сигнал БС і заважаючий сигнал від інших БС мережі. Коли несучі частоти корисного та заважаючого сигналів співпадають, то виникають інтерференційні перешкоди на співпадаючих частотах. Такі перешкоди створюють БС сусідніх кластерів. На рисунку 1 показано фрагмент ЧТП розмірністю  $N = 7$ . Цифрами 1...7 позначені частотні групи присвоєні стільникам. Розглядаючи дію сигналу й інтерференційних перешкод на МС, які розташовані на межі стільника, видно, що перешкоди створюються БС, які позначені М1,...,М6. Найбільш несприятливий випадок відповідає мінімальному рівню приймального сигналу, тобто положенню МС на межі стільника (позначена жирною крапкою). На рисунку 1 показані шляхи приходу заважаючих сигналів на цю МС.

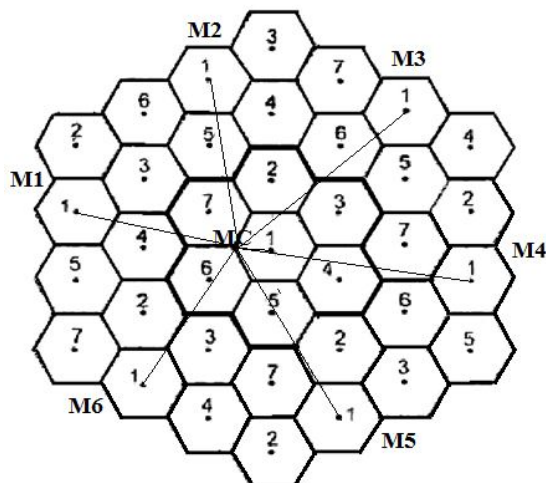


Рис. 1. Фрагмент частотно-територіального плану з  $N_{кл} = 7$

Потужність корисного сигналу, що надходить на МС від БС, подамо в вигляді (1). Тоді потужність для  $j$ -го заважаючого сигналу, прийнявши  $R = R_j$ :

$$P_{ij} = \frac{P_{БС} G_{ПР} G_{БС} \lambda^2}{(4\pi R_j)^2}. \quad (8)$$

Сумарну потужність інтерференційних перешкод на співпадаючих частотах можна знайти як суму потужностей заважаючих сигналів  $j$ -ої БС:

$$\sum_{i=1}^j P_i = P_{i1} + P_{i2} + \dots + P_{ij}. \quad (9)$$

Ефективним способом підвищення співвідношення сигнал–інтерференція є застосування секторних антен. Фрагменти ЧТП при  $N = 7$  з використанням секторних антен з шириною діаграми спрямованості (ШДС)  $\alpha = 120^\circ$  та  $\alpha = 60^\circ$  показані на рисунку 2.

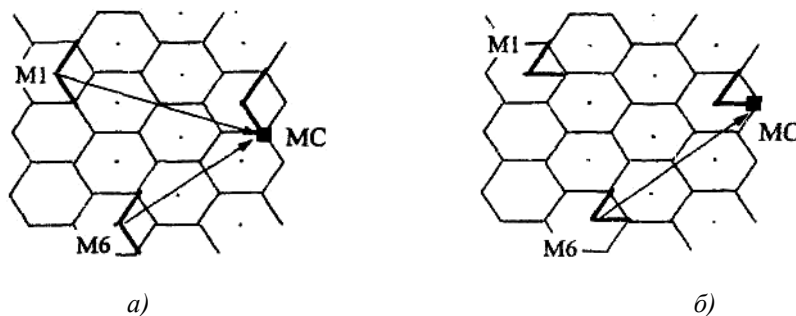


Рис. 2. Фрагменти ЧТП у разі  $N = 7$  з використанням секторних антен з ШДС: а)  $\alpha = 120^\circ$ , б)  $\alpha = 60^\circ$

Сектори стільників, у яких використовуються однакові частоти, позначені жирними лініями. Коли  $\alpha = 120^\circ$  залишилось два заважаючих сигнали на відстані  $R_1$  та  $R_6$ . Для варіанта  $\alpha = 60^\circ$  залишився тільки один заважаючий сигнал та відстані  $R_6$ .

На мобільну станцію, яка знаходиться на межі стільника № 1 (рис. 1) впливають і шуми, й інтерференційні перешкоди на співпадаючих частотах, тому загальний вплив можна подати як добуток потужності шуму та сумарної потужності від заважаючих станцій. Тому співвідношення сигнал/(шум + інтерференція) можна записати таким чином:

$$Q_{c-ш+i} = \frac{P_c}{P_T + \sum_{i=1}^n P_i} \quad (10)$$

Частотний план присвоюється стандарту і визначає розподіл частот прийому і передачі між каналами. Частотні канали, які розташовані в такому плані поряд, називаються сусідніми.

ЧТП розробляється для конкретної території, на якій розгорнута система. В ньому вказується розмірність кластера; розподіл частотних груп між стільниками; розміщення стільників на території; кількість каналів у кожній частотній групі, що належить стільнику; номінальне значення частот каналів у такій групі. На БС до однієї антени може бути підключено до 16 каналних прийомопередавачів. Для запобігання утворення взаємних перешкод не допускається робота передавачів сусідніх каналів через загальну антену БС.

На МС інтерференційні перешкоди від сусідніх каналів створюють передавачі сусідніх стільників. Вибірковість за цими каналами забезпечує смуговий фільтр приймача МС. На рисунку 3 показана типова (одностороння) АЧХ цього фільтра. Тут позначено  $f_0$  – центральна частота каналу;  $f_1, f_2, f_3$  – несучі сусідніх каналів;  $F$  – розстроювання;  $\Pi_\Phi$  – ширина смуги пропускання фільтра за рівнем -3дБ;  $\tilde{a}_\Phi$  – послаблення фільтра щодо рівня на краю смуги. Типовий фільтр за межами смуги пропускання вносить затування  $\gamma_\Phi = 24$  дБ на октаву.

Інтерференційна перешкода по сусідньому каналу може виникнути на БС в ситуації, коли МС1 знаходиться на межі стільника, а МС2 біля БС (всередині стільника) (рис. 4).

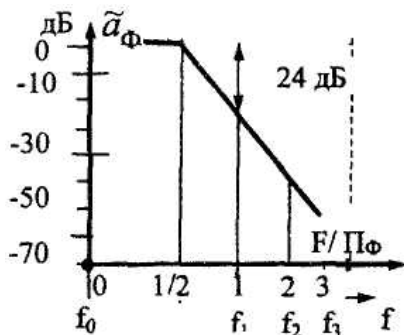


Рис. 3. Типова АЧХ смугового фільтра приймача МС

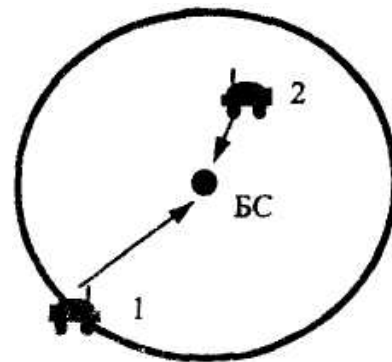


Рис. 4. Інтерференційна перешкода по сусідньому каналу

Цю проблему зазвичай вирішують двома шляхами: вибирають приймач з високою вибірковістю і забезпечують регулювання потужності випромінювання МС.

МС, що знаходиться біля БС, може створювати перешкоди прийому сигналу віддаленої МС через перенавантаження підсилювача приймача (рівень сигналу перевищує максимальний вхідний рівень). Точка насичення такого підсилювача відповідає максимальному вхідному рівню сигналу  $P_{нас} \approx 55$  дБм. Якщо рівень сигналу перевищує це значення, то в спектрі сигналу через нелінійні процеси виникають небажані складові. Коли їх частоти потрапляють в смугу пропускання сусідніх каналів, вони створюють перешкоди. При прийманні в сусідньому каналі сигналу від віддаленої МС значення співвідношення сигнал/перешкода може виявитися нижче допустимого [10].

Проаналізувати рівень інтерференційних перешкод, що створюються сусідніми частотними каналами можна з використанням нормованої спектральної щільності потужності сигналів з MSK та GMSK, що наведена на рисунку 5 [11].

На графіку показано рівень потужності головної пелюстки, яка передається на центральній частоті каналу  $f_0$  і рівні потужностей бічних пелюсток, які передаються в сусідніх каналах на частотах  $f_1, f_2, f_3$  і т. д.

Досліджуючи саме рівень бічних пелюсток, а також потрапляння спектра сигналу бічних пелюсток в смугу пропускання приймача, що працює на основній частоті, можна встановити негативний інтерференційний вплив на корисний сигнал, що надходить від заважаючих БС сусідньої частоти до МС.

Розрахунок рівня сумарної потужності інтерференційних перешкод від сусідніх частотних каналів є основним завданням розробки методики впливу параметрів модуляції сигналу мобільної системи стандарту GSM на показники якості зв'язку.

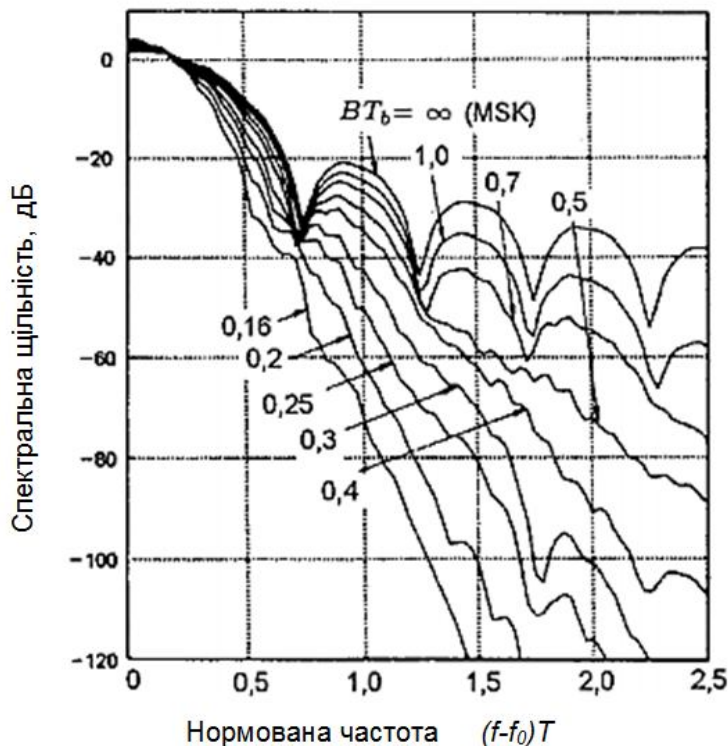


Рис. 5. Нормована спектральна щільність потужності сигналу з GMSK

Після розрахунку рівня сумарної потужності інтерференційних перешкод від сусідніх частот потрібно визначити співвідношення сигнал/(шум + інтерференція + інтерференція від сусідніх частот) і порівняти зі співвідношення сигнал/(шум + інтерференція), а потім знайти відсоток уточнення розрахунку співвідношення сигнал/шум.

Знаючи співвідношення сигнал/шум на вході приймача МС, можна визначити ймовірність помилки передачі одного біта.

Приклад залежності ймовірності помилки прийому сигналу GMSK від співвідношення сигнал/шум на вході вирішального пристрою приведена на рисунку 6 [12].

З графіка рисунка 6 видно, що під час збільшення співвідношення сигнал/шум ймовірність помилки передачі одного біта інформації зменшується. Тому, щоб передача інформації була безпомилковою, потрібно зменшувати, а в кращому випадку усувати, шуми та інші сигнали, що заважають, на вході приймача МС.

За запропонованою методикою можна побудувати алгоритм дослідження впливу параметрів модуляції сигналу передавача мобільної системи стандарту GSM на показники якості зв'язку (рис. 7). Згідно з наведеним алгоритмом, для дослідження впливу параметрів модуляції сигналу передавача мобільної системи стандарту GSM на показники якості зв'язку необхідно спочатку ввести параметри ЧТП (вказується розмірність кластера; розподіл частотних груп між стільниками; розміщення стільників на території; кількість каналів у кожній частотній групі, що належить стільнику; номінальне значення частот каналів у такій групі), згідно з яким і будуть проводитися дослідження. Далі, згідно з обраним частотно-територіальним планом, обираємо частоту, на якій будуть проводитися розрахунки і розраховуємо згідно з виразами (1), (5) та (9) потужність корисного сигналу, потужність шуму і сумарну потужність інтерференційних перешкод на співпадаючих частотах на вході МС, відповідно. Наступним кроком, згідно з алгоритмом, є визначення співвідношення сигнал/(шум + інтерференція) за виразом (10). Дане співвідношення дозволить проаналізувати вплив шумів та інтерференційних перешкод на

співпадаючих частотах на потужність корисного сигналу і з'ясувати причини виникнення та подолання наявності цих перешкод.

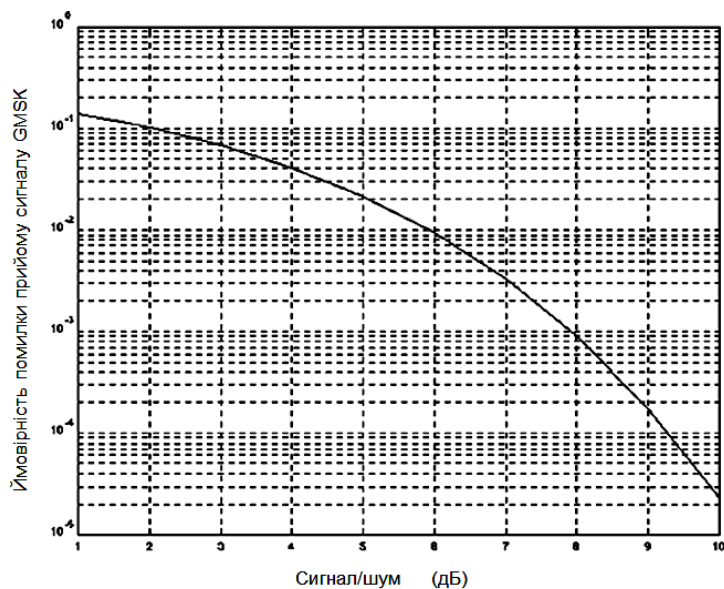


Рис. 6. Графік залежності ймовірності помилки прийому сигналу GMSK від співвідношення сигнал/шум

Потім необхідно визначити рівень перешкод від сусідніх частотних каналів залежно від параметрів модуляції. Для визначення рівня перешкод від сусідніх частотних каналів залежно від параметрів модуляції потрібно використати рисунок 5 та проаналізувати потрапляння спектра сигналу бічних пелюсток в смугу пропускання приймача, що працює на основній частоті, і яким чином дане потрапляння впливає на значення співвідношення сигнал/(шум + інтерференція).

Після проведених розрахунків знайдемо загальне значення співвідношення сигнал/(шум + інтерференція + інтерференція від сусідніх частот) і порівняємо зі співвідношенням сигнал/(шум + інтерференція). Знайдемо відсоток уточнення співвідношення сигнал/(шум + інтерференція).



Рис. 7. Алгоритм дослідження впливу параметрів модуляції сигналу передавача мобільної системи стандарту GSM на показники якості зв'язку

За допомогою графіка (рис. 6) знайдемо ймовірність помилки передачі одного біта, що відповідає уточненому значенню співвідношення сигнал/шум із врахуванням випромінювання передавача на сусідніх частотних каналах.

**Висновки.** Таким чином, у статті вирішене завдання розробки методики оцінки впливу параметрів модуляції сигналу мобільної системи стандарту GSM на показники якості зв'язку, а саме: розроблена методика розрахунку рівня потужності корисного сигналу, потужності шуму та інтерференційних перешкод на співпадаючих частотах й інтерференційних перешкод від сусідніх частотних каналів на вході мобільної станції. Розроблено математичну модель, алгоритм та метод порівняння, що дозволить на практиці більш точно отримати показники якості зв'язку при зміні параметрів модуляції.

#### Список використаної літератури:

1. Тлумачний словник з інформатики / Г.Г. Півняк, Б.С. Бусигін, М.М. Дівізінюк та ін. ; за ред. акад. НАН України Г.Г. Півняка. –2-ге вид., перероб. і доп. – Дніпропетровськ : Нац. гірнич. ун-т, 2010. – 605 с.
2. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами : учебн. пособие / Э.А. Сукачев. – Изд. 2-ое, испр. и доп. – Одесса : УГАС, 2000. – 119 с.
3. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи / Ю.А. Громаков. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 1998. – 240 с.
4. Бойко М.П. Системы стільникового зв'язку : конспект лекцій / М.П. Бойко. – Одесса : ОНАЗ, 2004. – 76 с.
5. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM / В.И. Попов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2005. – 296 с.

6. *Петренко В.И.* Системы и средства подвижной радиосвязи : учеб. пособие / *В.И. Петренко, В.Е. Рачков, Ю.В. Иванов* ; под. ред. *В.И. Петренко*. – Ставрополь : СВИС РВ, 2010. – 231 с.
7. Системы мобильной связи : учеб. пособие / *В.И. Ипатов, В.К. Орлов, И.М. Самолов и др.* – М. : Горячая линия–Телеком, 2003. – 272 с.
8. *Бабков В.Ю.* Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование : учеб. пособие / *В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, Михайлов*. – М. : Горячая линия–Телеком, 2007. – 224 с.
9. *Гавриленко В.Г.* Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи / *В.Г. Гавриленко, В.А. Яшинов*. – Нижний Новгород, 2003. – 148 с.
10. *Маковеева М.М.* Системы связи с подвижными объектами : учеб. пособие / *М.М. Маковеева, Ю.С. Шинаков*. – М. : Радио и связь, 2002. – 440 с.
11. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра : пер. с англ. / *К. Феер* ; под ред. *В.И. Журавлева*. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с.
12. *Давронбеков Д.* Средства передачи и приема информации в мобильных системах связи : конспект лекций / *Д. Давронбеков*. – Ташкент, 2011. – 169 с.

**РИХАЛЬСЬКИЙ** Олександр Ростиславович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– обробка інформації та математичне моделювання у радіотехнічних системах.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2013