

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-55-33>

УДК 621.35

**Баховський Петро Федорович**, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-7923-3293>

**Євсюк Микола Миколайович**, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-3768-8959>

Луцький національний технічний університет, м Луцьк, Україна

## АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ РАДІОЛІНІЙ ПІД ЧАС ОБМІНУ ДАНИМИ В СИСТЕМАХ SAE / EPS

**Баховський П.Ф., Євсюк М.М.** Аналіз енергетичного балансу радіоліній під час обміну даними в системах SAE / EPS. В роботі проведено аналіз енергетичного балансу висхідної та низхідної радіоліній у системах мобільного зв'язку під час обміну даними, розраховано межу розміру зони обслуговування для фіксованої швидкості передачі даних. Розрахована межа може відповідати або не відповідати критеріям межі стільника, яка формується таким чином, щоб забезпечити енергетичний баланс на визначеній зоні функціонування систем мобільного зв'язку з якісними параметрами системи SAE/EPS. Мета аналізу низхідної радіолінії полягає у визначенні допустимих втрат під час розповсюдженні радіохвиль із забезпеченням необхідної швидкості передачі даних і підтримці зони обслуговування, обмеженої енергетичним балансом висхідної радіолінії. Результати аналізу енергетичного балансу системи SAE/EPS можна використовувати для випадку коли проєктування виконується з метою забезпечення заданих розміру зони обслуговування й швидкості передачі даних та для планування зон обслуговування групи додаткових каналів радіозв'язку.

**Ключові слова:** радіолінія, радіозв'язок, енергетичний баланс, радіоканал, зона обслуговування, сектор.

**Bakhovskiy P., Yevsyuk M.** Analysis of the energy balance of radio lines during data exchange in SAE / EPS systems.

The paper analyzes the energy balance of uplink and downlink radio lines in mobile communication systems during data exchange, calculates the size limit of the service area for a fixed data transfer rate. The calculated limit may or may not meet the criteria of the cell limit, which is formed in such a way as to ensure the energy balance in the defined area of operation of mobile communication systems with quality parameters of the SAE/EPS system. The purpose of the analysis of the downlink radio is to determine the permissible losses during the propagation of radio waves while ensuring the necessary data transfer rate and maintaining the service area limited by the energy balance of the uplink radio link. The results of the analysis of the energy balance of the SAE/EPS system can be used for the case when the design is carried out in order to ensure the specified size of the service area and data transfer rate and for planning the service areas of a group of additional radio communication channels.

**Keywords:** radio line, radio communication, energy balance, radio channel, service area, sector..

**Постановка наукової проблеми.** Розрахунок енергетичного балансу двох радіоліній систем мобільного зв'язку дає можливість визначити розмір зони обслуговування такими системами. Вказана межа має відповідати фізичним параметрам стільника, яка задається таким чином щоб підтримати необхідну швидкість передачі по периметру стільника з вищими швидкостями передачі, але лише в межах її внутрішньої області. Якщо швидкість передачі даних задана, то розмір зони обслуговування під час обміну даними задається з умовою, що всі мобільні абоненти, які знаходяться в її межах, працюють з цією швидкістю передачі із використанням додаткового каналу [1]. Опрацювання наукових джерел [1, 2, 4] показало, що методика аналізу таких радіоліній під час прийому/передачі інформації може застосовуватись для режиму обміну даними за визначених умов:

1. Додаткові канали, які підтримуються радіоінтерфейсом, будуть практично безперервно та постійно зайняті, так як вони розподілені між користувачами.
2. Інформаційна швидкість буде більшою за ту, яка відповідає швидкості передачі даних для межі стільника.
3. При передачі матимуть місце додаткові витрати енергії електромагнітних хвиль в біологічній структурі користувача (близько 2 дБ).

Користувач терміналу доступу з антеною, що знаходиться за межами будівельного об'єкту або транспортного засобу, може вносити малі втрати або їх зовсім не вносити, тому в подальшому аналізі при обміні інформаційними даними ці втрати будуть прирівнюватись до нульових значень. Необхідне співвідношення енергії корисного сигналу до сумарної потужності теплових шумів приймача та радіозавад, призначене для забезпечення заданої якості та надійності роботи радіоліній стосовно додатку обміну даними менше, ніж при передачі розмови. Це пояснюється тим, що додаток обміну даними фактично не працює в режимі реального часу, тому кадри, прийняті з перешкодами, будуть змушені повертатись назад з вимогою забезпечення безпомилкового прийому/передачі даних. Мета формування системи проєкту SAE/EPS полягає в забезпеченні саме якісного обслуговування з передачі даних на високій швидкості.

**Аналіз досліджень.** Проведені результати моделювання в [2] показали, що неочікуване збільшення допустимої невизначеності передачі символу в кадрі не викликає істотного зменшення пропускної здатності під час обміну даними за протоколом TSP/IP. Для радіочастотного проєктування необхідно враховувати аналіз енергетичного балансу радіоліній, що базується на швидкості передачі додатковим каналом. В такому випадку фізична межа стільника визначатиметься межею зони обслуговування для передачі даних. Якщо використовується аналіз енергетичного балансу радіолінії в режимі передачі мови, то сервіс обміну даними з високою швидкістю буде доступний з відповідною якістю забезпечення зв'язку, а реалізоване зростання об'єму передачі пакетних даних (або імовірність досягнення вищої швидкості передачі даних) зменшиться, коли мобільний абонент знаходитиметься близько до граничної межі стільників. Максимальні допустимі втрати під час розповсюдження радіохвиль у режимі обміну пакетними даними можуть бути збільшені за використання користувачами терміналів доступу антен з вищим коефіцієнтом підсилення і більшою потужністю передавача. Необхідно зауважити, що інтерференційний запас є стабільним (становить 5,5 дБ не зважаючи на те, що число додаткових каналів, доступних для кожної фіксованої швидкості передачі даних, зменшується так само, як і при збільшенні швидкості передачі). Зменшення числа додаткових каналів може збільшити навантаження під час формування стабільності її функціонування.

**Мета роботи.** Аналітичне опрацювання енергетичного балансу висхідної та низхідної радіоліній в системі SAE/EPS (System Architecture Evolution/Evolved Packet System - еволюція системної архітектури/розвинена пакетна система) під час обміну даними для визначення можливостей розрахунку розміру зони обслуговування з фіксованою швидкістю передачі даних, яку необхідно забезпечити на межі зони стільника передавача/передавача базової станції.

**Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.** Занижені вимоги щодо відношення енергії корисного сигналу до сумарної потужності теплових шумів приймача та радіозавад, необхідні для забезпечення заданої якості та надійності роботи радіолінії під час обміну даними, можуть бути використанні для збільшення максимальних допустимих втрат під час розповсюдження радіохвиль, а отже і збільшення розміру зони обслуговування. Відомо, що за мінімальної швидкості передачі даних допустимі втрати під час розповсюдження радіохвиль для двох заданих таких режимів роботи системи проєкту SAE/EPS дещо відрізняються, і зі збільшенням швидкості обміну даними ця відмінність зростатиме і досягає 6 дБ. Таким чином, максимальний розмір зони обслуговування для сервісу високошвидкісного обміну даними буде менший в порівнянні з аналогічним параметром для передачі розмови.

Опускаючи громіздкі об'єми обчислення, зупинимося на результатах проведеного аналізу енергетичного балансу. Як приклад використана висхідна радіолінія системи проєкту SAE/EPS з швидкостями передачі пакетних даних від 19,2 кБіт/с до 153,6 кБіт/с, які суттєво відрізняються від одержаних результатів, що для швидкості передачі 9,6 кБіт/с, визначені як довідкові дані. Таким чином, зовнішній фізичний периметр стільника може бути визначений з використанням балансу радіолінії для швидкості передачі даних 9,6 кБіт/с. В межах такого периметру можна розрахувати додаткові обмеження, що накладаються на допустимі втрати енергії електромагнітних хвиль у децибелах з більшою швидкістю обміну даними [4].

Результати аналізу енергетичного балансу системи SAE/EPS можна використовувати для випадку коли проєктування виконується з метою забезпечення заданих розміру зони обслуговування й швидкості передачі даних та для планування зон обслуговування для групи додаткових каналів [3].

Зменшення максимальних допустимих втрат під час розповсюдження радіохвиль із збільшенням швидкості передачі, призведе до зменшення розміру зони обслуговування, що наочно підтверджує ефект «дихання» стільника, характерний для систем зв'язку з кодовим розподіленням каналів [1]. Таке співвідношення енергії якісного сигналу до сумарної потужності теплових шумів приймача та радіозавад, необхідне для забезпечення заданої якості та надійності роботи радіолінії. Отриманий при цьому вигравш (близько 3 дБ) пояснюється застосуванням турбокодів з можливістю повторної передачі/повернення інформаційних даних.

За результатами матеріалів [2, 5] встановлено, що аналіз балансу радіолінії найдоцільніше проводити методами числового моделювання, проте обчислюване навантаження, що виникає під час таких розрахунків, досить велике, що і приводить до необхідності пошуку простіших засобів [5].

Енергетичний баланс низхідної і висхідної радіолінії з використанням методу симетричного аналізу передбачає, що всі мобільні абоненти розміщені симетрично на межі стільника. Мета аналізу низхідної радіолінії полягає у визначенні допустимих втрат під час розповсюдженні радіохвиль із забезпеченням необхідної швидкості передачі даних і підтримці зони обслуговування, яка обмежена енергетичним балансом висхідної радіолінії [3].

Для аналізу вибрана швидкість передачі даних в додатковому каналі, яка підтримується на межі стільника за умови [2]:

- діюче обладнання визначається єдиною швидкістю передачі даних, наприклад 76,8 кБіт/с. Ця швидкість передачі даних відповідає фізичному краю по периметру стільника та таким чином визначає розмір зони обслуговування для заданої швидкості.

- концентричне розташування визначене двома швидкостями передачі даних, наприклад 76,8 кБіт/с і 9,6 кБіт/с. Нижча швидкість передачі даних визначає зовнішню межу стільника для цієї швидкості (рис. 1). Вища швидкість визначає внутрішню межу зони обслуговування, в границях якої може підтримуватися вища швидкість передачі даних (рис. 1).

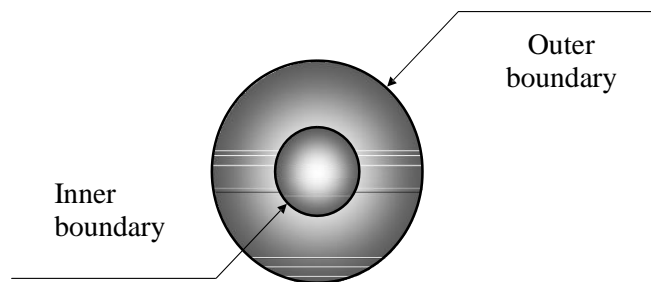


Рис. 1 - Концентричне розташування терміналу мобільного абонента в межах стільника (внутрішні та зовнішні межі визначені двома швидкостями передачі даних): Inner boundary – внутрішня межа, наприклад 76,8 кБіт/с; Outer boundary – зовнішня межа, наприклад 9,6 кБіт/с .

В ході аналізу розрахунковим методом необхідно визначити, чи є достатньою потужність передавача базової станції для досягнення необхідного відношення енергії інформаційного біта до сумарної потужності теплового шуму та інтерференції в приймачі мобільного абонента з урахуванням повільних завмирань електромагнітних хвиль під час їх розповсюдження. Швидкості передачі даних у всіх радіолініях під час обміну даними не є ідентичними. В аналізі повинні розглядатися мобільні абоненти, що використовують обидва канали – основний низькошвидкісний і додатковий високошвидкісний. Програмне забезпечення автоматичного перемикавання секторів доступне лише для основного каналу і не використовується в додаткових каналах низхідної радіолінії.

У системах мобільних телекомунікацій SAE/EPS високошвидкісні додаткові канали динамічно призначаються, коли здійснюється передача пакетних даних, і відключаються, коли така передача закінчується. Для управління рівнем системної інтерференції одночасно активується обмежене число додаткових каналів. Ці високошвидкісні канали можуть розглядатися як сервери в моделі Ерланга [3].

Пакетні дані, які підлягають передачі, або передаються відразу, або зберігаються в очікуванні передачі. У висхідній радіолінії зберігання даних забезпечується в мобільному пристрої обміну даними. У низхідній радіолінії зберігання даних забезпечується в буфері стільника. Ця ситуація відповідає черзі стосовно моделі Ерланга, [3] коли отриманий запит на обслуговування чекає доступу до серверів. В обох випадках може бути збережено велику кількість повідомлень, які надійшли, тоді довжина черги, як і визначає модель Ерланга буде наближатися до безкінечності. Співвідношення між завантаженням, кількістю серверів і середнім часом очікування в черзі також визначаються цією моделлю трафіку. Як тільки перераховані значення визначені, може бути розрахована повна пропускна здатність із використанням наступного виразу:

$$K = \sum_{N=0}^{N-1} n\mu r(n) + N\mu r$$
, де  $K$  – повна пропускна здатність;  $r(n)$  – час затримки залежно від навантаження [5].

Трафік обміну даними в мережах проекту SAE/EPS передбачається планувати по наведеному в [5] алгоритму:

1. Визначення числа серверів і швидкості обміну даними, які забезпечують радіоінтерфейс у межах сектору.
2. Завдання середнього необхідного часу очікування в черзі на обслуговування.
3. Розрахунок пропускної можливості, яку може забезпечити сектор.
4. Оцінка пропускної можливості, яка може створюватись групою абонентів шляхом визначення загального навантаження.
5. Порівняння пропускної можливості для групи абонентів з ймовірною пропускною можливістю з метою визначення кількості числа секторів.

Наприклад, якщо один сектор може забезпечити підтримку пропускної здатності 100 кБіт/с для заданого обмеженого часу очікування, то необхідно 10 секторів для реалізації загальної пропускної здатності в 1000 кБіт/с. В дійсності ж для виконання ряду інших вимог, наприклад таких, як забезпечення необхідної зони обслуговування, може знадобитися ще більше число секторів, а відповідно необхідно буде збільшити кількість каналів для прийому/передачі інформації.

Далі, за числом секторів можна оцінити залежність інтерференційного співвідношення від розташування мобільних абонентів (МА) в межах стільника. При цьому допускається, що значення і статистика зміни інтерференційного відношення ідентичні як для основних, так і для додаткових каналів. Це визначено симетричним розміщенням всіх МА на межі стільника під час передачі даних і є або точним або консервативним залежно від використовуваної конфігурації низхідної радіолінії. Під час передачі МА, що знаходяться у внутрішній межі стільника, програмне забезпечення серверу терміналу здійснює автоматичне перемикавання секторів; відношення потужності корисного сигналу, що приймається від головного обслуговуючого сектора, до потужності інтерференційних сигналів інших секторів максимізується і фактичне інтерференційне співвідношення погіршується (для розглянутого випадку з (-4 дБ) під час передачі розмови до (+2 дБ) під час обміну даними з використанням додаткового каналу). Наведений приклад досить консервативний, оскільки в ньому використовується вмонтоване розташування, при якому симетричне позиціонування МА на межі стільника забезпечує умови для прийому досить потужних інтерференційних радіосигналів від сусідніх стільників за невеликої потужності сигналу від головного обслуговуючого серверу.

Допустимі втрати під час розповсюдження радіохвиль у низхідній радіолінії складають 128 дБ, це дещо менше, ніж у висхідній радіолінії (не менше 144,4 дБ), але при цьому забезпечується підтримка передачі даних у низхідній радіолінії в основних та додатковому каналах (наприклад зі швидкостями 9,6 і 153,6 кБіт/с відповідно).

Отже, радіус зони обслуговування з передачі даних для заданого трафіку визначається енергетичним потенціалом низхідної радіолінії, що пояснюється діленням потужності передавача базової станції між мобільними абонентами.

**Висновки.** Аналізуючи вище наведене визначимо, що в даних умовах на межі зони обслуговування може підтримуватися одночасна робота одинадцяти основних каналів у режимі передачі даних і одого додаткового каналу, який забезпечує передачу максимального об'єму трафіку (коефіцієнт використання каналу - одиниця). При цьому 21,8% потужності передавача базової станції витрачається на передачу сигналів у службових каналах, а 78,2% - припадають на основні та додаткові канали трафіку (для розглянутого прикладу повна пропускна здатність низхідної радіолінії складає 259,2 кБіт/с).

#### Список бібліографічного опису

1. Баховський П.Ф., Євсюк М.М. Кількісний опис вирашу за рахунок м'якого автоматичного перемикавання секторів у висхідній радіолінії систем мобільного зв'язку // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи. Міжнародна науково-технічна конференція НТУУ КПІ. Київ, 2015. С. 151-153.
2. Баховський П.Ф., Євсюк М.М. Окремі аспекти розрахунку енергетичного балансу радіоліній проекту SAE/EPS в мережах мобільного зв'язку. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. - Випуск 37, м. Луцьк, 2012. С.14-22.
3. Баховський П.Ф., Євсюк М.М. Застосування моделі Ерланга до аналізу обміну даними у системах мобільного зв'язку // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи. Міжнародна науково-технічна конференція НТУУ КПІ. Київ, 2014, С.59-61с.
4. Баховський П.Ф., Євсюк М.М., Селепина Й.Р. Деякі особливості розрахунку характеристик радіоліній радіоінтерфейсу SAE/EPS в мобільних телекомунікаційних мережах. // 69-та науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів. Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова. Одеса, 2014, 3-5 грудня. С. 9-12.

5. Баховський П.Ф., Євсюк М.М. Окремі аспекти розвитку мобільних телекомунікацій // Перспективні технології та прилади. Збірник наукових праць. Луцьк: Луцький НТУ, 2018. №13. С. 25-33.

#### References

1. Bakhovskyi P.F., Yevsyuk M.M. Quantitative description of the gain due to soft automatic switching of sectors in the uplink of mobile communication systems // Radio engineering fields, signals, devices and systems. International scientific and technical conference of NTUU KPI. - Kyiv, 2015. P. 151-153.
2. Bakhovskyi P.F., Yevsyuk M.M. Some aspects of calculating the energy balance of radio lines of the SAE/EPS project in mobile communication networks. // Scientific notes. Interuniversity collection. - Issue 37, Lutsk, 2012. P. 14-22.
3. Bakhovskyi P.F., Yevsyuk M.M. The application of the Erlang model to the analysis of data exchange in mobile communication systems // Radio engineering fields, signals, devices and systems. International scientific and technical conference of NTUU KPI. - Kyiv, 2014, P. 59-61.
4. Bakhovskyi P.F., Yevsyuk M.M., Selepina Y.R. Some features of calculating the characteristics of SAE/EPS radio interface radio lines in mobile telecommunication networks. // 69th scientific and technical conference of professors and teaching staff, scientists, graduate students and students. Odesa National Academy of Communication named after O.S.Popova. - Odesa, 2014, December 3-5. P. 9-12.
5. Bakhovskyi P.F., Yevsyuk M.M. Some aspects of the development of mobile telecommunications // Promising technologies and devices. Collection of scientific works. – Lutsk: Lutsk National Technical University, 2018. No. 13. P. 25-33.