ISSN 2306-4412 (Print), ISSN 2306-4455 (CD-ROM), ISSN 2708-6070 (Online)

УДК 621.395

[0000-0002-8683-3286] **О. І. Романов,** *д.т.н., професор,*
[0000-0003-0716-3788] **М. М. Нестеренко,** *к.т.н., доцент,*
[0000-0002-4291-0438] **В. Б. Маньківський,** *к.т.н., асистент,*
[0000-0002-6691-2438] **І. О. Сайченко,** *асистент*
Інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського
пров. Індустріальний, 2, м. Київ, 03056, Україна

МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ В МЕРЕЖІ ДОСТУПУ МОБІЛЬНОГО ОПЕРАТОРА

Основна увага при плануванні мережі мобільного оператора приділяється частотному розподілу та електромагнітній сумісності. Основний аргумент полягає в тому, що рішення цієї задачі забезпечить виконання умов оптимального розподілу частотного ресурсу і, як наслідок, дасть можливість оптимізувати рівень завад у сусідніх зонах. Водночас не розглядається питання рівномірності розподілу трафіку по елементах мережі. Як результат, такий підхід негативно впливає на показники пропускної здатності та якості обслуговування QoS. В роботі для підвищення ефективності розподілу навантаження при плануванні зон обслуговування базових станцій пропонується додатково враховувати результати аналізу потоків подій обслуговування в стільниках та дані системи білінгу.

Ключові слова: *QoS, пропускна спроможність, розподіл навантаження, сектор базової станції.*

Вступ. Нині в Україні йде активне впровадження технологій 4G і 5G на мережах операторів мобільного зв'язку. Однак внаслідок помилок у прогнозуванні тенденцій розвитку такого типу мереж склалася ситуація, при якій для обслуговування всього голосового трафіку ще довгий час будуть використовуватися мережі технологій 2G і 3G. Крім того, оператори отримують дохід – як фінансовий, так і іміджевий – від використання наявного сегмента мережі. Тому, при плануванні шляхів розвитку існуючих та перспективних мереж необхідно приділяти увагу підвищенню їх продуктивності.

Планування мережі оператора мобільного зв'язку починається з визначення розподілу частот, що в подальшому забезпечує електромагнітну сумісність мережевих елементів і якість послуг, що надаються.

Зміни кількості абонентів у стільниках, зростання обсягів вхідного навантаження вимагають проведення оптимізації структури мережі. Оператори мережі мобільного зв'язку використовують два основні підходи в процесі вирішення задач корекції існуючої мережі – аналіз частотно-територіального покриття і прогноз зон обслуговування базових станцій (BS, Base Station).

У сучасних мобільних мережах, особливо в зв'язку з появою технологій стека UMTS, кількість дзвінків у процентному співвідношенні скоротилася за рахунок зростання трафіку даних. Абонентське голосове навантаження не зростає, і оператори мобільних мереж концентруються на оптимізації радіопокриття для мережі передачі даних шляхом емпіричного підходу до визначення оптимальних параметрів базових станцій. При такому підході кожний оператор має свій алгоритм оптимального налаштування. Стандарти 3GPP виступають, з одного боку, лише як рекомендації для налаштування (нижня межа якості), а з другого – як рівень задоволеності абонентів якістю зв'язку (верхня межа).

Кількість скарг на радіопокриття при такому підході зросла, більша частина з них припадає на надання послуг з передачі голосу. Причинами зростання помилок і погіршення якості зв'язку при передачі мови є неефективне радіопланування з точки зору кінцевого абонента. Водночас, з точки зору рівня інтерференції і гістерезису, радіопланування виконано ідеально.

У GSM мережах основною стратегією побудови мереж було забезпечення задовільної якості радіочастотного покриття – забезпечення достатнього рівня сигналу. У мережах UMTS перевага надається пропускній здатності радіоресурсу, який може бути нада-

© О. І. Романов, М. М. Нестеренко, В. Б. Маньківський, І. О. Сайченко, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.3.2020.200346

ний кінцевому абоненту у вигляді віртуального каналу.

Мета дослідження. В ході експлуатації мережі відбувається коригування спроектованої мережі на підставі даних про використання канального ресурсу.

В роботі пропонується для аналізу оптимальності розподілу навантаження використовувати дані, які описують характер самих даних. Такі дані мають й інше формулювання – метадані. Ці дані агрегуються в білінговій системі і використовуються при складанні прогнозу по наданню послуг відділами прогнозування.

Для підвищення ефективності функціонування мережі і якості послуг, що надаються, пропонується доповнити існуючі підходи до планування, враховуючи дані з білінгової системи для розрахунку виконаного навантаження з прив'язкою до секторів БС.

У роботі розглянуто стратегію доступу без резервування, коли в секторі радіоканали призначені для обслуговування як дзвінків усередині стільника, так і хендоверних викликів. Це спрощення зроблено для першого оцінювання ефективності підходу до оцінювання розподілу навантаження. Водночас запропоновано підхід без урахування радіоканалів резервування для обслуговування хендовера та основних викликів при перевантаженні (модель з втратами).

Аналіз останніх досліджень. У цій сфері більшість досліджень характеризуються однією спільною рисою – критерієм оптимального розподілу виступають показники радіотракту, наприклад потужність сигналу в точках прийому. Відповідно, при такому підході оптимізацію проводять без урахування самого характеру даних.

В роботах [1, 2] при аналізі не беруть до уваги ряд даних про характер дзвінка, таких як дзвінок прямий або хендоверний. Автори цих робіт не враховують особливості профілю абонента і не визначають взаємозв'язок із секторами обслуговування. Водночас ці дані агрегуються в білінгові системи і використовуються при складанні прогнозу по наданню послуг відділами прогнозування, але не використовуються при плануванні мережі.

Також у роботі [2] враховується розподіл навантаження з точки зору взаємного електромагнітного впливу. Запропонований підхід є одним з найбільш часто використовуваних – це модель розрахунку потужності сигналу Окамура–Хата.

В роботі [3] ефективність функціонування мережі розглядається з точки зору завантаженості каналу. Водночас інформативно вимірюється завантаженість каналів передачі даних (TCH – Traffic Channel) з точки зору співвідношення завантаженості та доступного ресурсу. Автори поглиблюються в ступінь завантаженості каналів даних, доходячи висновку, що завантаженість даних каналів наближається до 100 % (у ЧНН), що є критерієм оптимального розподілу навантаження.

Як показано в роботі [4], оптимальне покриття можна охарактеризувати візуально, на основі завантаженості мережі. Автори не беруть до уваги канали загального призначення (CCCH – Common Control Channel), які здатні значно уточнити дані по завантаженості в мережі, з розбивкою на транзитні виклики (handover, хендовер) та пошукові запити самих кінцевих пристроїв. При цьому завантаженість каналів прив'язується не до конкретної БС, а до центру комутації (MSC), хоча саме TCH має безпосереднє відношення до БС.

Проблематика. Зазначається, що на етапі планування мережі оператори мобільного зв'язку використовують різні математичні моделі розрахунку і прогнозування як покриття, так і абонентського навантаження. Однією з найбільш часто використовуваних є модель розрахунку потужності сигналу Окамура–Хата. Пропонований підхід у статті пропонує враховувати причину виникнення трафіку хендовер як результат неоптимального планування секторів БС.

Оператори в країнах СНД використовують мережі, які поєднують в собі технології стека UMTS і GSM. Вони не вважають рентабельним перехід до мереж LTE найближчим часом, концентруючи увагу на спільному використанні двох мереж одночасно (рисунок 1).

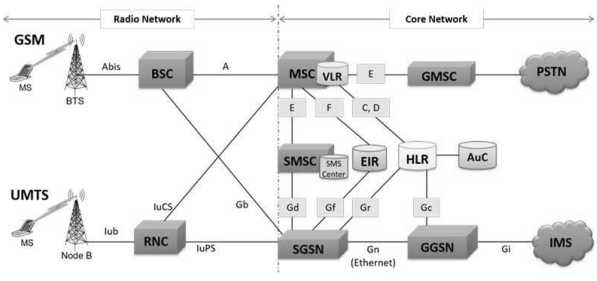

Рисунок 1 – Типова структура мобільної мережі GSM і UMTS операторів в Україні

В таких умовах оператори стикаються з низкою проблем, які були попередньо вирішені операторами розвинених країн, що

© О. І. Романов, М. М. Нестеренко, В. Б. Маньківський, І. О. Сайченко, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.3.2020.200346

перейшли до «чистого» UMTS і зрештою до LTE.

У статті акцент зроблено на взаємному розташуванні секторів БС стільників UMTS і GSM з урахуванням їх взаємного впливу на розподіл навантаження. Цей сценарій характерний для територій із середньою щільністю мобільних пристроїв. Водночас поліпшення в зонах UMTS приведе й до поліпшення якості зв'язку в гібридних мережах. Критерієм підвищення якості зв'язку є зменшення кількості відмов у наданні з'єднань. Один із шляхів досягнення цього – домогтися оптимального розподілу навантаження в стільниках. У статті пропонується оцінити оптимальне покриття, ґрунтуючись на показниках білінгової системи, яка є невід'ємною частиною мережі оператора. Дані з білінгової системи допоможуть оцінити точність моделі оцінювання розподілу навантаження в мережі.

Аналіз узагальненої моделі показує, що на процес функціонування обслуговування навантаження впливає безліч різнорідних чинників. Урахування цих факторів, зниження їх негативного впливу, використання можливостей адаптації до змін у секторі обслуговування навантаження не за допомогою зміни порогів спрацьовування процедур хендовера, а при проектуванні зони покриття, виходячи з прогнозування рівня хендовера, дасть можливість підвищити ефективність функціонування обслуговування навантаження в секторах БС.

Модель оптимального розподілу навантаження в мережі. Аналіз процесу функціонування процесу обслуговування навантаження в системах мобільного зв'язку дає змогу виділити чотири компоненти моделі аналізу оптимальності розподілу трафіку в мережі (рисунок 2):

1. Сектор БС обслуговування мобільного терміналу.

2. Система зміни секторів БС.

3. Система забезпечення керуванням навантаження в секторі БС.

4. Фактори, що впливають на них.

Об'єктом управління є навантаження в секторах обслуговування БС, що являє собою сукупність функціонально пов'язаних і взаємодіючих між собою та абонентами елементів.

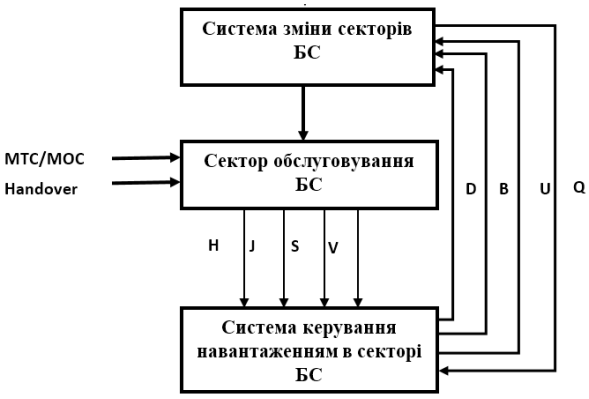

Рисунок 2 – Модель оптимального розподілу навантаження в мережі

У процесі функціонування системи між її елементами, які є об'єктами управління, й тими, що містять органи управління, здійснюється інформаційний обмін, який характеризується наявністю різного типу даних.

Від об'єктів управління в органи управління можуть передаватися такі дані:

• для контролю розподілу навантаження – показники швидкості зміни стільників, які передаються по каналу BCCH в кожному стільнику ($h1$, ... hi, ... ε H);

• параметр C1 для обслуговуючого стільника, менший нуля (C1 <0) протягом 5 с, коли втрати на радіоінтерфейсі занадто великі і для MS потрібно змінити стільник ($j1$, $j2$, ... ji, ... ε J);

• значення параметра C2 для сусідніх стільників, яке перевищує це ж значення для обслуговуючого стільника протягом 5 с ($q1$, $q2$, ..., qi, ... ε Q).

Від органів управління на об'єкти управління можуть передаватися такі команди:

• зміна стільника всередині LA (Location Area) ($u1$, $u2$, ..., ui, ... ε U) – інформація про те, що новий стільник належить тій же LA, по каналу BCCH сусідніх стільників;

• зміна стільника всередині одного MSC ($s1$, $s2$, ..., si, ... ε S) – MS при зміні стільника виявляє зміну LA на основі аналізу інформації, що передається по каналу BCCH;

• оновлення місцеположення при вході в зону обслуговування нового MSC / VLR ($b1$, $b2$, ..., bi, ... ε B) – оновлення місцеположення LU (Location Update) здійснюється тоді, коли MS переміщується в нову LA;

• використання необхідних резервних каналів для хендовера ($v1$, $v2$, ..., vi, ... ε V) – утримання розмови при транзитному використанні сектора ділянок мережі;

© О. І. Романов, М. М. Нестеренко, В. Б. Маньківський, І. О. Сайченко, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.3.2020.200346

• система управління системою вимірів показника радіоінтерфейсу при доставці повідомлень (*d*1, *d2*, ..., *di*, ... ε *D*) – вимірювання рівнів сигналів BCCH на частотах, яка обслуговує і сусідні стільники.

Математична інтерпретація моделі. Для розгляду моделі секторного аналізу введемо такі параметри інтенсивностей викликів у секторах БС: вхідні – λ_{MOC}, вихідні – λ_{MTC} і хендовер – λ_{hand}.

Джерелами навантаження БС можуть бути наступні види викликів:

• ініційовано і завершено в одному й тому ж стільнику мережі GSM або UMTS;

• ініційовано в стільнику GSM і завершено в стільнику мережі UMTS, і навпаки;

• ініційовано в одному і завершено в іншому стільнику мережі UMTS;

• хендовера, що надійшов у стільник мережі GSM із сусідніх стільників цієї ж мережі і завершився в розглянутому стільнику;

• хендовера, що надійшов у стільник мережі GSM із сусідніх стільників мережі UMTS і завершився в розглянутому стільнику.

Для створення математичної моделі введемо обмеження і допущення:

1. Потоки ініційованих і завершених викликів (Mobile Originated Calls і Mobile Terminated Calls) і хендовера (Handover Calls) є пуассоновим потоком з інтенсивностями λ_{MOC}, λ_{MTC}, λ_{hand}. Сумарний потік викликів, що створюють навантаження на базову станцію, так само є пуассоновим як у каналах TCH (GSM), так і в каналах DTCH (UMTS):

$$\lambda=\lambda_{hand}+\lambda_{MOC}+\lambda_{MTC}+\lambda_{hand_DTCH}+\lambda_{DLCH}+\lambda_{ULCH}. \quad (1)$$

Будь-який виклик з інтенсивністю μ_1 завершує обслуговування всередині стільника і з інтенсивністю μ_2 переходить на обслуговування в стільник інших мереж (Handover Calls). Закон розподілу тривалості обслуговування викликів як в стільнику, так і при хендовері, має експоненційний характер з параметрами μ_1 і μ_2 відповідно. Тривалість зайняття радіоканалу визначається сумою величин $\mu_1+\mu_2$.

2. Тривалість обслуговування будь-якого виклику описується експоненційним розподілом χ (t)

$$(X(t) \quad n). \quad (2)$$

3. Вхідне навантаження, що буде визначатися через інтенсивність вхідних потоків (1), позначимо через *Z*. Водночас виконане навантаження – інтенсивність обслужених заявок (2) – позначимо через *Y*.

Проаналізуємо приклад реалізації сценарію: виклик ініційовано і завершено в одному стільнику GSM, наявний вхідний хендовер від стільників UMTS, без обмеження на резервування радіоканалів для вхідного хендовера. Для цього сценарію використовуємо модель системи з відмовами – Ерланг B [4]. Ймовірність відмови (P_R) в такій системі може бути описана виразом

$$\frac{\frac{(\lambda\ \tau)^n}{}}{\sum_{n\ 0}^{N}(\frac{(\lambda\ \tau)^n}{})} \quad \frac{\frac{}{}}{\sum_{n\ 0}^{V}(\frac{}{})}, \quad (3)$$

де τ – одиничний інтервал;

λ – кількість подій за τ.

Ймовірність відмови визначається як для МТС стандарту GSM цього стільника, так і для вхідного хендовера від стільників стандарту UMTS.

В процесі обслуговування з подіями в стільнику базової станції можуть відбуватися різні етапи життєвого циклу. Одним із показників, яким нехтують при обліку завантаженості стільника, є ймовірність того, що за час *t* всі канали вільні:

$$\frac{}{\left[\Sigma\ \ _0\left(\frac{}{}\right)\right]} \quad (4)$$

Саме цей показник доцільно використовувати при аналізі завантаженості БС, враховуючи, що БС може бути застосована як транзитна при хендовері. З огляду на те, що стандартним показником стільника БС є його завантаження в ЧНН (час найбільшого навантаження), вираз для оцінювання ймовірності зайнятості *V* каналів набуде вигляду

$$\left[\frac{}{}\right]. \quad (5)$$

Використовуючи рівняння (3)–(5), визначимо середню кількість зайнятих каналів:

$$\langle k\rangle \quad \sum \quad \left[\frac{}{(n\ \ 1)!}\right]. \quad (6)$$

Цей підхід до моделі дає можливість визначити перевантажені і недовантажені ділянки мережі, перейшовши від зайняття каналів до функціонуючого навантаження в стільнику БС, а далі, в процесі управління обслуговування заявок, використовувати отримані дані для забезпечення рівномірності завантаження елементів мережі, виявляючи трафік хендовера на сусідню БС, який не враховується при стандартному плануванні [8].

© О. І. Романов, М. М. Нестеренко, В. Б. Маньківський, І. О. Сайченко, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.3.2020.200346

У запропонованому сценарії навантаження формуються в секторі GSM. У цій моделі процесом обслуговування викликів у стільнику виступає N-канальна (кількість радіоканалів у стільнику) повнодоступна система масового обслуговування (СМО), на яку надходять два пуассонові потоки заявок: 1 – потік викликів (λ_{MTC}), 2 – потік хендовера з UMTS в GSM-інтенсивність (λ_{hand}).

***Можливі два варіанти роботи*:**

• в момент надходження заявки (Z_0) виклик надходить на обслуговування і займає один канал, якщо є вільний (Y);

• якщо в момент надходження заявки в СМО немає вільних каналів, то виклик втрачається (R_0).

Тривалості обслуговування заявок – незалежні випадкові величини, що мають експоненційний розподіл з параметром інтенсивності μ (рисунок 3).

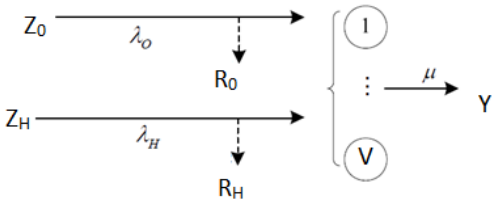

Рисунок 3 – Вхідне навантаження при сценарії хендовера меж секторами GSM та UMTS

Основними характеристиками для аналізу є ймовірність p_{lost_1} втрати викликів (блокування нового виклику) і ймовірність p_{lost_h} (ймовірність блокування хендовера). Для створення математичної моделі стільника необхідно використовувати наведене вище твердження для опису життєвого циклу системи – зміни стану системи (стільника). Подібний підхід було використано в роботі [5] при аналізі життєвого циклу GSM. У цій роботі акцент зроблено на специфіку комбінованих мереж GSM і UMTS, розглядаючи тільки хендовер між БС, що обслуговуються одним контролером BSC.

Стан стільника (який є СМО) може змінитися або за рахунок надходження викликів, або за рахунок завершення обслуговування викликів. Згідно з (1) сумарний потік викликів, що надходять на базову станцію стільника, є пуассоновим, тобто має одну з властивостей – відсутність післядії, отже, процес надходження заявок у стільник після моменту t не залежить від функціонування системи до моменту t [6].

Згідно з (2) тривалість обслуговування заявок, які надійдуть у стільник після t, не залежить від стану системи до моменту t. За властивістю стаціонарності пуассонового потоку ймовірність надходження дзвінка в момент від t до $t+\Delta t$ (малий інтервал, в межі – нескінченно малий) дорівнює Δt / T ($\Delta t << T$). З другого боку, якщо інтервал можна порівняти з T, формула працювати не буде, тому що вона диференціальна – для нескінченно малого інтервалу.

За властивістю стаціонарності пуассонового потоку тривалість обслуговування викликів залежить тільки від довжини інтервалу Δt. Ця властивість пуассонового потоку дає можливість представити його як потік, який має властивість потоку Маркова – властивість відсутності післядії.

Марковський процес задається графом переходів зі стану в стан. Цими станами є варіанти життя викликів у стільнику, а зміни цих станів визначаються ймовірністю переходу. Для розв'язання задачі використовуємо ланцюг Маркова з n станами обслуговування викликів у стільнику з дискретним часом, що викликано властивістю пуассонового потоку – стаціонарність, а також тим, що аналіз зміни системи проводиться в ЧНН з інтервалами в одну годину. Особливістю ланцюгів Маркова є те, що кількість таких станів є кінцевою. Ця властивість виконується, враховуючи, що канальний ресурс стільника є обмеженим, відповідно умови зайняття і звільнення цих каналів описуються кінцевою кількістю умов переходу. Ланцюг Маркова буде однорідним через властивості ординарності пуассонового потоку. Відповідно, матриця перехідних ймовірностей системи не буде залежати від поточного стану ланцюга.

Також цей марковський однорідний процес з дискретним станом – процес однорідної загибелі і розмноження, і він має вигляд, зображений на рисунку 4. Граф станів витягнуто в ланцюжок, в якому перескок через два стани можливий тільки через проміжний.

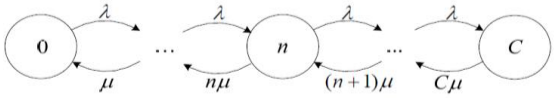

Рисунок 4 – Марковський процес зміни статусів при обслуговуванні заявки в мережі оператора

Для створення математичної моделі попередньо визначимо ймовірності деяких подій.

© О. І. Романов, М. М. Нестеренко, В. Б. Маньківський, І. О. Сайченко, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.3.2020.200346

Після цього представимо у вигляді ланцюга Маркова умови зміни станів і уявімо розв'язувальну модель у вигляді матриці переходів, яка в майбутньому може бути розв'язана через рівняння Колмогорова або з використанням розв'язку задачі Коші.

Кількість подій пуассонового потоку (1) на інтервалі довжини Δt має розподіл з інтенсивністю $\lambda * \Delta t$. Отже, ймовірність того, що за час Δt в стільник вступить певна кількість викликів, дорівнює

$$P(t) = e^{\frac{-\tau}{T}} = e^{-\lambda * \tau}. \quad (7)$$

Визначимо тепер середній час очікування першого дзвінка. Ймовірність, що до моменту t дзвінка не було, а в інтервалі $(t + \Delta t)$ надійшов, дорівнює

$$P(t) = e^{\frac{-\tau}{T}} * \frac{\Delta t}{T}. \quad (8)$$

Помноживши (8) на Δt і беручи інтеграл, одержимо середній час очікування події:

$$\int_0^{\infty} t * e^{\frac{-\tau}{T}} * \frac{\Delta t}{T} = T. \quad (9)$$

Параметр T – це середній час очікування події: вхідного дзвінка (МТС) або події по хендоверу. Можна як параметр використовувати не T, а обернену величину λ, і тоді ймовірність настання події дорівнює $\lambda * \Delta t$ [7].

Параметр розподілу Пуассона – це середня кількість дзвінків в одиничному інтервалі. Абстрагуємося від одиничного інтервалу τ: якщо за інтервал відбувається λ подій, то ймовірність, що за цей інтервал відбувається k-подій, дорівнює

$$P(k, \lambda) = \frac{(\lambda)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}. \quad (10)$$

Використовуючи (10), отримаємо, що ймовірність того, що за час Δt в стільник не надходить виклик, дорівнює

$$P(0, \lambda) = \frac{(\lambda)^0}{0!} \cdot e^{-\lambda} = \frac{1}{1} \cdot e^{-\lambda} = e^{-\lambda}. \quad (11)$$

Ймовірність того, що за час Δt в стільник надійде одна заявка, дорівнює

$$P(1, \lambda) = \frac{(\lambda)^1}{1!} \cdot e^{-\lambda} = \frac{\lambda}{1} \cdot e^{-\lambda} = \lambda \cdot e^{-\lambda}. \quad (12)$$

Ймовірність того, що за час Δt в стільник надійде два і більше дзвінків або хендовер [9], можна описати з властивості ординарності простішого потоку, який характеризується тим, що за досить малий проміжок часу ймовірність появи двох або більшої кількості викликів є величиною малого порядку τ.

Властивість експоненційного розподілу є ймовірністю того, що за час Δt не закінчиться обслуговування виклику:

$$P(0, \mu) = \frac{(\mu)^0}{0!} \cdot e^{-\mu} = \frac{1}{1} \cdot e^{-\mu} = e^{-\mu}. \quad (13)$$

Тоді ймовірність того, що за час Δt в стільнику не закінчиться обслуговування n викликів, дорівнює

$$P(0, \mu) = \left[\frac{(\mu)^0}{0!} \cdot e^{-\mu}\right]^n = \left[\frac{1}{1} \cdot e^{-\mu}\right]^n = e^{-n \cdot \mu}. \quad (14)$$

Ймовірність, що за Δt завершений один виклик, дорівнює

$$P(1, \mu) = \left[\frac{(\mu)^1}{1!} \cdot e^{-\mu}\right]^n = \left[\frac{\mu}{1} \cdot e^{-\mu}\right]^n = \mu \cdot e^{-n \cdot \mu}. \quad (15)$$

Описані вище ймовірності є частиною життєвого циклу подій у стільнику мобільного оператора. Припустимо, що в момент t в стільнику обслуговувалося n викликів: $n = \{1, C\}$, де C – максимальна кількість можливих каналів у стільнику. Це можна записати як $X(t + \Delta t) = n$. В наступний момент часу $t + \Delta t = \tau$ стан стільника може:

1) не змінитися, тобто за час τ в стільник не надійде жодного нового виклику (11), і жоден виклик не закінчить обслуговування (14):

$$P_{n+0}(0, \lambda, \mu) = P(0, \lambda) \cdot P(0, \mu) = e^{-(n \cdot \mu + \lambda)}; \quad (16)$$

2) перейти в стан +1, якщо за час $t + \Delta t$ один виклик надійде в стільник (12), а жоден інший виклик із тих, що перебувають в обслуговуванні, не закінчить його (13):

$$P_{n+1}(0, \lambda, \mu) = P(1, \lambda) \cdot P(0, \mu) = \lambda \cdot e^{-(\mu + \lambda)}; \quad (17)$$

3) перейти в стан -1, якщо за час $t + \Delta t$ один виклик буде завершений у стільнику (15), і не надійде жодного нового виклику (11):

$$P_{n-1}(1, \lambda, \mu) = P(0, \lambda) \cdot P(1, \mu) = \mu \cdot e^{-(n \cdot \mu + \lambda)}; \quad (18)$$

4) ймовірність того, що за час Δt в стільник надійде два і більше дзвінків або хендовер (за досить малий проміжок часу) є величиною малого порядку τ.

У підсумку, за час τ в стільнику навантаження може збільшитися за рахунок надходження нового виклику, зменшитися за рахунок обслуговування виклику або залишитися на тому ж рівні. Одночасне надходження двох типів викликів будемо розглядати як послідовні події на ділянці $t + \Delta t$ при $\Delta t \to 0$, виражене властивістю ординарності потоку подій [10]. Таким чином, вирази (16)–(18) описують життєвий цикл перебування викликів у стільнику

© О. І. Романов, М. М. Нестеренко, В. Б. Маньківський, І. О. Сайченко, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.3.2020.200346

як процес розмноження і загибелі з наступними перехідними ймовірностями зі стану n в стан $n + 1$ (або $n – 1$):

$$\begin{cases} P_{n+0}(0,\lambda,\mu) = e^{-(n\cdot\mu+\lambda)}, \\ P_{n+1}(0,\lambda,\mu) = \lambda \cdot e^{-(\mu+\lambda)}, \\ P_{n-1}(1,\lambda,\mu) = \mu \cdot e^{-(n\cdot\mu+\lambda)}, \\ P_{n+2}(2,\lambda,\mu) = o(\tau) \end{cases} \quad (19)$$

Результати математичної моделі. Основною особливістю марковських процесів є те, що їх умовні функції щільності ймовірностей задовольняють диференціальним рівнянням часткових похідних типу. Такий підхід для розв'язання лінійних рівнянь прийнятий у телекомунікаціях як достатній [11]. Ця система рівнянь (19) розв'язується методом задачі Коші або рівняннями Колмогорова.

Для однорідного процесу загибелі і розмноження згідно з графом станів (див. рисунок 4) система рівнянь (19) може бути представлена в діагональній матриці порядку n, котрий відповідає однорідній системі лінійних алгебраїчних рівнянь щодо вектора граничних ймовірностей станів [7]. Для розв'язання такої системи рівнянь можна скористатися підходом локального балансу і умовою нормування:

$$P(1,\lambda) = 1 - P(0,\lambda) = 1 - e^{-\lambda}. \quad (20)$$

Відповідно, для будь-якого n

$$P_n = \frac{P_{k-1}}{k!} P_k \cdot \frac{P_k}{(k+1)!} P_{k+1} \cdots \frac{P_{k-n}}{(k+n)!} P_{k+n} = \frac{P^n}{n!} \cdot P_0 . \quad (21)$$

Враховуючи умови нормування (20), отримаємо P_0:

$$P_0 = \sum_{n=0}^{V} \frac{Z^n}{n!} , n \in \{0, V\}. \quad (22)$$

Визначимо ймовірність втрати заявки в стільнику, виходячи з умов, що в момент τ (надходження заявки) в стільнику відсутні вільні канали (V), тобто розподіл $\chi(\tau) = V$. Використовуючи вирази (21)–(22), отримаємо

$$P_R = \frac{Z_0^V}{V!} \cdot \left[\sum_{n=0}^{V} \frac{Z^n}{n!}\right]^{-1}. \quad (23)$$

Вираз (23) можна застосувати при допущенні, що величина надходження двох і більше заявок є величиною малого порядку τ.

На наступному етапі визначимо ймовірність втрати заявки в стільнику під час хендовера з сусідніх стільників (GSM, UMTS):

$$P_{R_handover} = \frac{Z_h^V}{V!} \cdot \left[\sum_{n=0}^{V} \frac{Z^n}{n!}\right]^{-1}. \quad (24)$$

У статті використано локальну частину мережі одного з операторів мобільного зв'язку міста Київ з досліджуваною топологією мережі, як показано на рисунку 1. В мережі аналіз проведено на трьох ділянках БС GSM-1800, які підключені до одного контролера BSC і мають найбільший відсоток завантаженості в мережі – умовно ці зони зобразимо на рисунку 5. Середній діаметр кожної зони – до 1 км.

а) *б*) *в*)

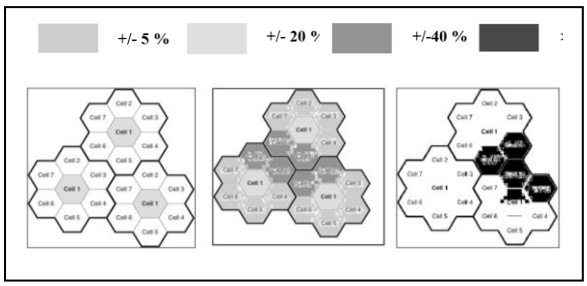

Рисунок 5 – Навантаження в стільниках: плановане (*а*), прогнозоване (*б*), реальне (*в*)

Спочатку ділянка (рисунок 5, *а*) Cell1 – Cell7) мала тільки одну групу секторів, але в ході експлуатації було збільшено ще на групи БС (дві групи секторів Cell1 – Cell7). Проте питання ефективності такого підходу полягає в зменшенні кількості скарг від абонентів. Тому на цьому прикладі пропонується оцінити доцільність збільшення зони покриття.

Оцінювання результатів здійснено шляхом порівняння запланованої частини (вона закладена в плануванні) з прогнозованим розподілом навантаження на мережу. На рисунку 5, *б* показано ступінь відхилення прогнозованого навантаження: колір відповідає проценту відхилення від прогнозу.

Темні ділянки на рисунку 5, *в* показують область із недостатньою кількістю вільних каналів для обслуговування навантаження. Водночас ця модель передбачала збільшення +20 % порівняно із запланованою (рисунок 5, *а*, *б*) в зоні приграничних секторів. У той же час похибка моделі становила 9 %, не передбачаючи відсутності вільних каналів для обслуговування навантаження на граничній ділянці (рисунок 5, *в*). Цю помилку можна пояснити тим, що дані сусідніх секторів БС не були враховані. Ці сусідні сектори належали іншому BSC, і передача, яка була зроблена із сусідньої БС, призвела до збільшення навантаження, яке не було включено в модель.

Необхідні дані формуються в ході обслуговування, центром накопичення таких даних є білінгова система оператора. Ця система

© О. І. Романов, М. М. Нестеренко, В. Б. Маньківський, І. О. Сайченко, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.3.2020.200346

виступає не тільки як система взаєморозрахунку з абонентом, а як система агрегації та аналізу даних. Для розв'язання цієї задачі було проаналізовано дані CDR (Call Data Records – формат збереження подій). Ці дані було згруповано по секторах БС, також було виділено в окрему групу хендоверні дані. При такому групуванні було враховано ряд специфічних характеристик, притаманних білінговій системі. Одна з них – CDR відноситься до того сектора БС, в якому було завершено виклик, навіть якщо більшу частину часу виклик обслуговувався в іншому секторі БС.

Висновки. В цьому варіанті розглянуто стратегію доступу без резервування, коли в секторі радіоканали призначені для обслуговування як дзвінків усередині стільника, так і хендоверних викликів, без радіоканалів резервування для обслуговування хендовера. Тому, ймовірності відмови в обслуговуванні для надходження викликів і хендоверів рівні.

Коли мережа вже в експлуатації, аналіз її роботи здійснюється за допомогою оцінювання статистичних даних щодо подій у системі, використовуючи різні аналітичні програмні комплекси. До останніх відносяться: хендоверні характеристики, скинуті з'єднання, невдалі спроби встановлення з'єднань, інтерференція та ін. Для оптимального оцінювання роботи системи недостатньо знати кількість подій у системі, необхідно оперувати характеристиками навантаження при обслуговуванні цієї ділянки мережі: тривалість подій, час початку, показники якості події.

Було змодельовано і показано, що використана модель прогнозування виконаного навантаження вхідного трафіка ефективніша, ніж традиційні підходи до радіопланування, за рахунок виявлення трафіку, «перекинутого» на сусідній стільник БС, який не враховується при радіоплануванні. Продуктивність мережі значно підвищується при використанні цього методу.

Перспективи подальшого дослідження. В цьому варіанті розглянуто стратегію доступу без резервування, це упущення є досить суттєвим для більш точного прогнозування. В першу чергу, необхідно продумати математичну величину, яка опише це значення. Крім того, такий показник має бути внесений у формування загальної ймовірності.

У статті розглянуто лише один сценарій: виклик ініційовано і завершено в одному стільнику GSM, наявний вхідний хендовер від стільників UMTS. У самій роботі цей сценарій обраний як найбільш характерний для мобільної мережі. В подальших дослідженнях планується розглянути й інші сценарії, які доповнять запропоновану модель. Так, найістотнішим доповненням до моделі буде розгляд такого сценарію – передачу даних ініційовано і завершено в іншому стільнику UMTS.

У подальших висвітленнях необхідно звернути увагу на підходи до віртуалізації обладнання [12]. Такий підхід буде спрямований на віртуалізацію обладнання в центрі мережі, що дасть можливість збільшити швидкість аналізу даних CDR та перенести цей процес в режим реального часу. Це є перспективним напрямом, з урахуванням того, що трафік можна буде перенаправляти від одного сектора до іншого, не чекаючи перевантаження в секторі.

Подальші дослідження мають бути зміщені в бік LTE, як найбільш поширеної в місцях підвищеної концентрації мобільних пристроїв. Виділяючи при цьому окрему нішу для мобільних пристроїв IoT. Для цих пристроїв виділяють окрему зону в спектрі спеціально виділеного діапазону частот (NB-IoT).

Список використаних джерел

[1] Syahfrizal Tahcfulloh, and Eka Riskayadi, "Optimized suitable propagation model for GSM 900 path loss prediction", *Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. 14, p. 162, 2015.

[2] A. Degollado-Rea, S. Vidal-Beltrán, J. López-Bonilla, and G. Bahadur Thapa, "Okumura-Hata, Walfish-Ikegami and 3GPP propagation models in urban environments for UMTS networks", *The SciTech, Journal of Science & Technology*, pp. 70-78, 2015.

[3] Segun I. Popoola, and Olasunkanmi Fatai Oseni, "Empirical path loss models for GSM network deployment in Makurdi, Nigeria", *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, vol. 3, pp. 85-94, 2014.

[4] Ю. В. Гайдамака, Э. Р. Зарипова, и К. Е. Самуйлов, *Модели обслуживания вызовов в сети сотовой подвижной связи*: учеб.-метод. пособие. Москва: РУДН, 2008.

[5] О. І. Романов, О. В. Чмиренко, та В. Б. Маньківський, "Оцінка ємності мережі мобільного зв'язку WCDMA", *Сис-*

© О. І. Романов, М. М. Нестеренко, В. Б. Маньківський, І. О. Сайченко, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.3.2020.200346

теми озброєння і військова техніка, № 1 (21), с. 184-188, Київ, 2010.

[6] М. А. Скулиш, О. І. Романов, та Л. С. Глоба, "Принцип обслуговування потоків у гетерогенному телекомунікаційному середовищі", *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, № 2, с. 92-98, 2018.

[7] Т. Л. Саати, *Математические методы исследования операций*. Москва: Воениздат, 1963.

[8] В. Ю. Бабков, М. А. Вознюк, и П. А. Михайлов, *Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование*: учеб. пособие для вузов. Москва: Горячая линия-Телеком, 2007.

[9] C. Fuchs, N. Aschenbruck, P. Martini, and M. Wieneke, "Indoor tracking for mission critical scenarios: A survey", *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 7, no. 1, pp. 1-15, 2011.

[10] A. Bhuvaneshwari, R. Hemalatha, and T. Satyasavithri, "Statistical tuning of the best suited prediction model for measurements made in Hyderabad City of Southern India", in *Proc. World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, 2013, vol. II.

[11] Dusit Niyato, and Dong In Kim, "Relay-centric radio resource management and network planning", *IEEE Transactions on Wireless Comunication*, vol. XX, pp. 76-89, 2009.

[12] O. Romanov, M. Nesterenko, N. Fesokha, and V. Mankivskyi, "Evaluation of productivity virtualization technologies of switching equipment telecommunications networks", *Information and Telecommunication Sciences*, vol. 1, pp. 53-58, 2020.

References

[1] Syahfrizal Tahcfulloh, and Eka Riskayadi, "Optimized suitable propagation model for GSM 900 path loss prediction", *Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. 14, p. 162, 2015.

[2] A. Degollado-Rea, S. Vidal-Beltrán, J. López-Bonilla, and G. Bahadur Thapa, "Okumura-Hata, Walfish-Ikegami and 3GPP propagation models in urban environments for UMTS networks", *The SciTech, Journal of Science & Technology*, pp. 70-78, 2015.

[3] Segun I. Popoola, and Olasunkanmi Fatai Oseni, "Empirical path loss models for GSM network deployment in Makurdi, Nigeria", *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, vol. 3, pp. 85-94, 2014.

[4] Yu. V. Gaydamaka, E. R. Zaripova, and K. Ye. Samuylov, *Cellular mobile call service models*. Moscow, Russia: RUDN, 2008. [in Russian].

[5] A. I. Romanov, A. V. Chmyrenko, and V. B. Mankivskyi, "Estimation of WCDMA mobile network capacity", *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, no. 1 (21), pp. 184-188, Kyiv, 2010. [in Ukrainian].

[6] M. A. Skulysh, O. I. Romanov, and L. S. Globa, "The principle of flow maintenance in a heterogeneous telec-?mmunications environment", *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky*, no. 2, pp. 92-98, 2018. [in Ukrainian].

[7] T. L. Saati, *Mathematical methods of operations research*. Moscow, Russia: Voenizdat, 1963. [in Russian].

[8] V. Yu. Babkov, M. A. Voznyuk, and P. A. Mikhaylov, *Mobile networks. Frequency spatial planning*. Moscow, Russia: Goryachaya liniya-Telekom, 2007. [in Russian].

[9] C. Fuchs, N. Aschenbruck, P. Martini, and M. Wieneke, "Indoor tracking for mission critical scenarios: A survey", *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 7, no. 1, pp. 1-15, 2011.

[10] A. Bhuvaneshwari, R. Hemalatha, and T. Satyasavithri, "Statistical tuning of the best suited prediction model for measurements made in Hyderabad City of Southern India", in *Proc. World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, 2013, vol. II.

[11] Dusit Niyato, and Dong In Kim, "Relay-centric radio resource management and network planning", *IEEE Transactions on Wireless Comunication*, vol. XX, pp. 76-89, 2009.

[12] O. Romanov, M. Nesterenko, N. Fesokha, and V. Mankivskyi, "Evaluation of productivity virtualization technologies of switching equipment telecommunications networks", *Information and Telecommunication Sciences*, vol. 1, pp. 53-58, 2020.

© О. І. Романов, М. М. Нестеренко, В. Б. Маньківський, І. О. Сайченко, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.3.2020.200346

A. I. Romanov, *Dr.Tech.Sc., professor,*
M. M. Nesterenko, *Ph.D., accociate professor,*
V. B. Mankivskyi, *Ph.D., assistant,*
I. O. Saichenko, *assistant*
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
Industrial lane, 2, Kyiv, 03056, Ukraine

MODEL OF OPTIMAL LOAD DISTRIBUTION IN MOBILE OPERATOR ACCESS NETWORK

The main attention when planning the network of a mobile operator is paid to frequency distribution and electromagnetic compatibility. The main argument is that the solution of this problem will ensure the fulfillment of the conditions of optimal frequency resource allocation and, as a consequence, will allow to optimize the level of interference in neighboring zones. At the same time, the issue of uniformity of traffic distribution among network elements is not considered. As a result, this approach negatively affects the performance and quality of service. In order to increase the efficiency of load distribution in the planning of base station service areas, it is proposed to additionally take into account the results of the analysis of service event flows in cells and the data of the billing system.

Initially, radio planning determines the further quality of services on mobile network. At the same time there is no adaptation to changing external conditions. In large cities with a developed infrastructure, the constantly changing situation forces mobile operator to constantly adjust the conditions of signal propagation. The constant increase in volume of transmitted information requires the optimization of load distribution on cellular structure, the search for optimal methods of ensuring electromagnetic compatibility (EMC), the territorial distribution of the frequency resource of the operator. High efficiency of network quality in such conditions is provided by the operator at close interaction of the services of planning, optimization and operation of network by use of expensive software. This paper offers a look at the problem in terms of subscriber traffic.

In the paper, the strategy of access without redundancy is considered, when in the sector radio channels are designed to service both calls within the cell and hand-made calls, without radio redundancy channels to service handover. Therefore, the probabilities of denial of service for incoming calls and handovers are equal.

Keywords: *quality of service (QoS), bandwidth, load distribution, base station sector.*

© О. І. Романов, М. М. Нестеренко, В. Б. Маньківський, І. О. Сайченко, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.3.2020.200346