

## **РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ПРОПУСКНОЮ ЗДАТНІСТЮ НИЗХІДНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ТЕХНОЛОГІЇ LTE, ЩО ВИКОРИСТОВУЄ ПЕРШИЙ ВИД РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ**

© Гаркуша С.В., Гаркуша О.В., 2015

Наведено результати розроблення математичної моделі розподілу частотно-часового ресурсу низхідного каналу зв'язку технології LTE, що використовує перший вид розподілу ресурсів. Запропонована модель спрямована на забезпечення гарантованої якості обслуговування користувачів безпроводової мережі виділенням станціям користувачів необхідної пропускної здатності в низхідному каналі зв'язку. Проаналізовано запропоновану модель розподілу частотно-часового ресурсу технології LTE з погляду забезпечення необхідних пропускних здатностей різних станцій користувачів у низхідному каналі зв'язку.

**Ключові слова:** LTE, частотно-часовий ресурс, ресурсний блок, блок планування, математична модель, необхідна пропускна здатність, перший вид розподілу ресурсів.

S. V. Garkusha, O. V. Garkusha

Poltava University Economics and Trade, Poltava

## **DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF MANAGEMENT BANDWIDTH DOWNLINK LTE USING RESOURCE ALLOCATION TYPE 1**

© Garkusha S. V., Garkusha O. V., 2015

It was established that one of the main problems in the wireless network that operates using LTE, is the task of ensuring the required quality of service, which includes the need for the user equipment network bandwidth required in the downlink. Providing the required bandwidth can be achieved by solving the problems of distribution of a time-frequency resource in a downlink, which acts as resource blocks. As shown by the analysis known solutions for bandwidth allocation in the downlink LTE are oriented on the use of Resources Allocation Type 0, which has a low flexibility due to combination in the resource blocks group. The analysis decision on the need to develop a mathematical model of bandwidth management downlink LTE, using the first type of resource allocation is formulated as a problem of resource allocation sides, to provide the required bandwidth of each user equipment.

As a result of this article proposed a mathematical model of the distribution bandwidth downlink LTE which novelty is the use of the Recourse Allocation Type 1. The calculation of the unknown variables in the model proposed in accordance with the conditions, it is advisable to carry out the limitations in solving optimization problems using an optimality criterion aimed at maximizing the overall performance of the downlink. The formulated problem from a mathematical point of view is a task Integer Linear Programming (ILP). In the model the desired variables are boolean, and restrictions on the unknown variables are linear. Using the proposed model has allowed to produce records of technological features downlink LTE

(partition resource blocks into subsets assigned to the subscriber station RB only one subset), as well as the territorial remoteness of user equipment (the type of modulation and coding).

As an example, a solution was obtained in the formulated optimization problem using a system MatLab R2014a. This has been enabled bintprog package optimization Optimization Toolbox. Graphically it shows how dependent bandwidth allocation and resource blocks of the downlink between the user equipment required when changing the value of one of them. The analysis found that the use of the proposed model aims to provide each user equipment the quality of service in terms of bandwidth in the downlink with the possibility of access to additional (non-guaranteed) bandwidth.

**Key words:** LTE, frequency-time resources, resource block, block scheduling, mathematical model, required bandwidth, resource allocation type 1.

### Вступ

Одним з ефективних шляхів підвищення продуктивності та поліпшення основних показників якості обслуговування (Quality of Service, QoS) в технології LTE (Long-Term Evolution) є використання принципів оптимального розподілу мережевих ресурсів. Використання рішень щодо розподілу мережевих ресурсів дає змогу ефективно реагувати на зміну стану та умов функціонування безпроводової мережі, які можуть спричинятись, наприклад, виходом з ладу або перевантаженням її елементів, коливаннями трафіку, що надходить у мережу, динамікою зміни сигнально-завадової обстановки тощо. Функції розподілу мережевих ресурсів у технології LTE можуть бути покладені на систему управління радіоресурсами (Radio Resource Management, RRM), а саме на планувальника (scheduler), який відповідальний за планування ресурсів для станцій користувачів (Users Equipment, UE). У технології LTE, як і в HSDPA або WiMAX, механізми планування ресурсів низхідного каналу зв'язку не визначені стандартом, залишаючи право вибору за виробниками обладнання базових станцій (evolved NodeB, eNodeB) [1].

До таких ресурсів, насамперед, належать символи (часовий ресурс) і частотні піднесні (частотний ресурс). Найменшою структурною одиницею радіоресурсу, який можна виділити тій чи іншій станції користувача, є ресурсний блок (Resource Block, RB) [2]. Необхідно зауважити, що рішення RRM про виділення мережевих ресурсів передусім ґрунтується на вимогах до QoS. Тому задача розподілу частотно-часових ресурсів у технології LTE повинна бути сформульована як задача розподілу RB між UE мережі залежно від заявлених вимог до пропускної здатності та параметрів QoS.

Оскільки в технології LTE один низхідний канал одночасно використовується декількома UE, то необхідний вибір механізму або методу планування частотно-часових ресурсів для забезпечення доступу до середовища передавання даних всім станціям користувачів. Механізм планування, своєю чергою, планувальник використовує для розподілу пропускної здатності між UE. Основною ідеєю розподілу частотно-часових ресурсів у технології LTE є надання привілеїв під час передачі даних UE, з найкращими радіопараметрами.

Розв'язуючи задачі розподілу пропускної здатності, необхідно враховувати той факт, що в технології LTE запропоновано три види розподілу ресурсів (Resource Allocation Type, RAT). У роботах [3–6] запропоновані моделі розподілу ресурсних блоків у низхідному каналі зв'язку технології LTE, що використовують нульовий вид розподілу ресурсів (Resource Allocation Type 0, RAT 0). У разі використання RAT 0 за кожною станцією користувача виконується закріплення однієї або декількох груп ресурсних блоків (Resource Block Group, RBG), сформованих відповідно до технологічних особливостей LTE. При цьому кількість RB, що входять до складу однієї RBG ( $P$ ), залежить від ширини частотного каналу, що використовується, і визначається відповідно до табл. 1 [7]. Основним недоліком RAT 0 є те, що за будь-якою станцією користувача в низхідному каналі зв'язку може бути закріплена кількість ресурсних блоків, лише кратна параметру  $P$ .

## Залежність розміру RBG від загальної кількості RB, що формуються

| Кількість RB, що формується, $N_{RB}^{DL}$ | Розмір RBG, $P$ |
|--|-----------------|
| $\leq 10$                                  | 1               |
| 11–26                                      | 2               |
| 27–63                                      | 3               |
| 64–110                                     | 4               |

З метою гнучкішого управління пропускнуою здатністю низхідного каналу зв'язку в технології LTE запропоновано використовувати перший вид розподілу мережевих ресурсів (Resource Allocation Type 1, RAT 1). У разі використання RAT 1 вся множина ресурсних блоків розділяється на декілька підмножин, що не перекриваються (subset), кількість яких визначається параметром  $P$  (рис. 1).



Рис. 1. Приклад розподілу ресурсних блоків між підмножинами

Як показано на рис. 1, кількість ресурсних блоків у підмножинах може відрізнятися. Для визначення потужності підмножин ресурсних блоків у технології LTE запропоновано використовувати вираз [7]:

$$N_{RB}^{RBG\text{subset}}(p) = \begin{cases} \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P^2} \right\rfloor P + P, & p < \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P} \right\rfloor \bmod P; \\ \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P^2} \right\rfloor P + (N_{RB}^{DL} - 1) \bmod P + 1, & p = \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P} \right\rfloor \bmod P; \\ \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P^2} \right\rfloor P, & p > \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL} - 1}{P} \right\rfloor \bmod P. \end{cases} \quad (1)$$

де  $N_{RB}^{RBG\text{subset}}(p)$  – потужність  $p$ -ї підмножини;  $p$  – поточний номер підмножини ресурсних блоків, для якого виконуються визначення її потужності ( $p = \overline{0, P-1}$ );  $N_{RB}^{DL}$  – кількість RB, що формуються упродовж передавання одного часового слоту. В технології LTE кількість RB залежить від ширини частотного каналу та може набувати таких значень: 6, 15, 25, 50, 75, 100.

У результаті проведеного аналізу прийнято рішення про необхідність розроблення математичної моделі управління пропускнуою здатністю низхідного каналу зв'язку технології LTE, що використовує перший вид розподілу ресурсів, сформульованої як задача розподілу ресурсних блоків, для забезпечення необхідної пропускнуої здатності кожної станції користувача.

**Математична модель управління пропускнуою здатністю низхідного каналу зв'язку**

У запропонованій моделі вважаються відомими такі вихідні дані:

1)  $N$  – кількість станцій користувачів;

2)  $K_s$  – кількість піднесних для передавання даних в одному RB. Цей параметр залежить

від частотного рознесення між піднесними  $\Delta f$  та повинен задовольняти умову  $K_s \Delta f = 180$  кГц.  $K_s$

може набувати значень 12 та 24, які відповідають частотному рознесенню між піднесними  $\Delta f$  в 15 кГц та 7,5 кГц;

3)  $N_{\text{sybm}}^{RB}$  – кількість символів, що формують один ресурсний блок. Параметр  $N_{\text{sybm}}^{RB}=7$  у випадку використання нормального циклічного префіксу (cyclic prefix, CP). Тривалість нормального CP першого OFDM-символу становить  $T_{CP}^1=5,2$  мкс, а з другого по шостий OFDM-символ –  $T_{CP}^{2-6}=4,7$  мкс. У разі використання розширеного CP ( $T_{CP}=16,7$  мкс) RB складається з шести OFDM-символів ( $N_{\text{sybm}}^{RB}=6$ );

4)  $T_{RB}=0,5$  мс – час передачі одного RB;

5)  $T_{SF}=1$  мс – час передачі одного підкадру;

6)  $N_{SF}^{RB}=2$  – кількість RB, що формуються на однакових піднесних і виділяються на час передачі одного підкадру;

7)  $R_c^n$  – швидкість коду, що використовується для кодування сигналу  $n$ -ї UE;

8)  $k_b^n$  – бітове завантаження символу  $n$ -ї UE;

9) вид розподілу каналів – FDD або TDD, а також конфігурація кадру, що використовується (табл. 2);

10)  $R_{\text{необ}}^n$  – необхідна швидкість передачі даних для  $n$ -ї UE;

11)  $K$  – кількість підкадрів, що використовується для передачі інформації в низхідному каналі зв'язку. В разі використання режиму FDD кількість підкадрів низхідного каналу зв'язку дорівнює загальній кількості підкадрів у кадрі ( $K=10$ ). Якщо використовується режим TDD, кількість підкадрів низхідного каналу зв'язку треба вибирати відповідно до конфігурації кадру, що використовується (табл. 2). У табл. 2 позначення D використано для низхідного каналу зв'язку, U – для висхідного каналу і S – для службового каналу.

12)  $P$  – кількість RB, що входять до складу однієї RBG (табл. 1);

13)  $M = \max(N_{RB}^{RBG\text{subset}})$  – найбільша кількість ресурсних блоків, що входять до складу тієї або іншої підмножини.

Таблиця 2

**Конфігурація кадру технології LTE у режимі FDD і TDD**

| Режим розподілу каналів | Конфігурація кадру | Номер підкадру |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------------------|--------------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|                         |                    | 0              | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| TDD                     | 0                  | D              | S | U | U | U | D | S | U | U | U |
|                         | 1                  | D              | S | U | U | D | D | S | U | U | D |
|                         | 2                  | D              | S | U | D | D | D | S | U | D | D |
|                         | 3                  | D              | S | U | U | U | D | D | D | D | D |
|                         | 4                  | D              | S | U | U | D | D | D | D | D | D |
|                         | 5                  | D              | S | U | D | D | D | D | D | D | D |
| FDD                     | 6                  | D              | S | U | U | U | D | S | U | U | D |
|                         | 7                  | D              | D | D | D | D | D | D | D | D | D |

Відповідно до табл. 2 з метою врахування кількості підкадрів, виділених для передачі інформації в низхідному каналі зв'язку [2, 8], в математичній моделі використано поняття матриці конфігурацій низхідного каналу, введене в [3, 4]. Матриця є прямокутною з кількістю рядків, що відповідає кількості конфігурацій кадру ( $L$ ), та з кількістю стовпчиків, що відповідає кількості підкадрів ( $K$ ) у кадрі, тобто

$$H = \|h_{l,k}\|, (l = \overline{0, L-1}; k = \overline{0, K-1}), \quad (2)$$

$$\text{де } h_{l,k} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } k\text{-й підкадр в } l\text{-й конфігурації використовується} \\ & \text{для передачі інформації в низхідному каналі зв'язку;} \\ 0, & \text{в протилежному випадку.} \end{cases}$$

В результаті цього матриця конфігурацій низхідного каналу набуде вигляду

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

У ході розв'язання задачі управління пропускну здатністю низхідного каналу зв'язку в межах запропонованої моделі необхідно забезпечити розрахунок булевої управляючої змінної ( $x_n^{m,p}$ ), що визначає порядок розподілу ресурсних блоків:

$$x_n^{m,p} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } m\text{-й ресурсний блок на } p\text{-й підмножині виділений } n\text{-й UE;} \\ 0, & \text{в протилежному випадку,} \end{cases} \quad (4)$$

де  $m = \overline{0, M-1}$ ;  $p = \overline{0, P-1}$ ;  $n = \overline{1, N}$ .

Під час розрахунку шуканих змінних  $x_n^{m,p}$  необхідно виконати важливі умови обмежень:

1. Умова виділення кожного ресурсного блока тільки одній станції користувача (рис. 2):

$$\sum_{n=1}^N x_n^{m,p} \leq 1, \quad (m = \overline{0, M-1}; p = \overline{0, P-1}). \quad (5)$$

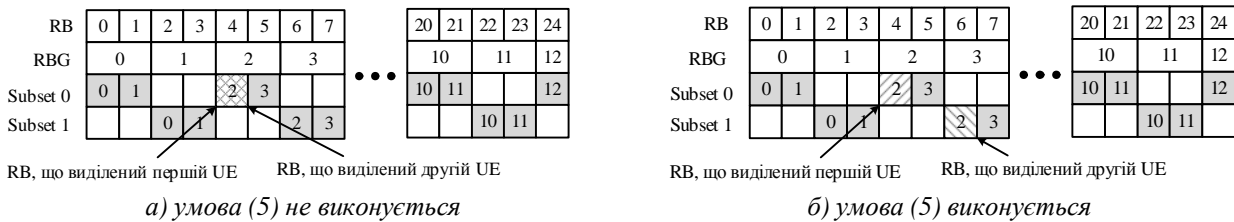


Рис. 2. Приклад перевірки умови (5)

2. Умова закріплення за  $n$ -ю станцією користувача кількості ресурсних блоків, що забезпечує необхідну пропускну здатність у низхідному каналі зв'язку за використовуваної схеми модуляції та кодування сигналу (Modulation and Coding Scheme, MCS) (рис. 3):

$$\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{p=0}^{P-1} x_n^{m,p} \frac{N_{symb}^{RB} N_{SF}^{RB} K_S R_c^n k_b^n K}{10T_{SF}} \leq R_{необ}^n, \quad (n = \overline{1, N}). \quad (6)$$

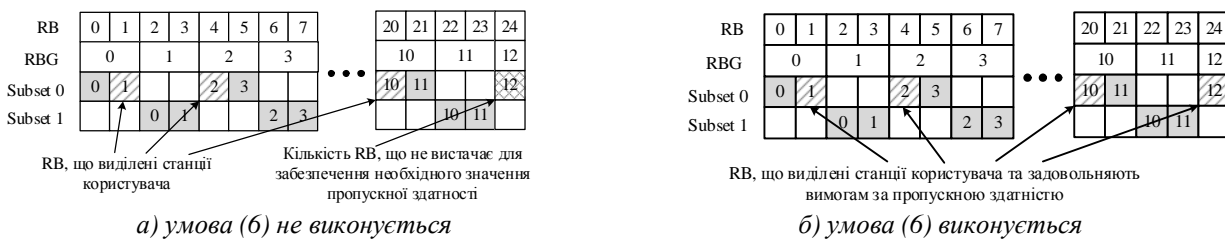


Рис. 3. Приклад перевірки умови (6)

3. Умова виділення  $n$ -ї станції користувача ресурсних блоків тільки однієї підмножини, що вводиться з метою задоволення особливостей побудови низхідного каналу зв'язку технології LTE, що використовує RAT 1 (рис. 4):

$$x_n^{m,p} M + \sum_{j=p+1}^{P-1} \sum_{t=1}^{M-1} x_n^{t,j} \leq M, \quad (n = \overline{1, N}; m = \overline{0, M-1}; p = \overline{0, P-2}). \quad (7)$$

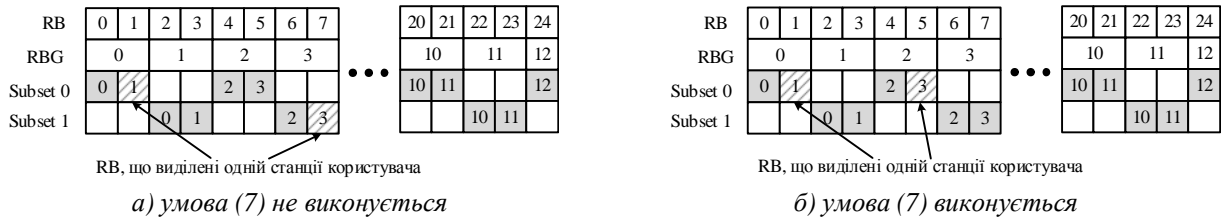


Рис. 4. Приклад перевірки умови (7)

4. Умова виділення  $n$ -ї станції користувача ресурсних блоків, що задовольняють розміри підмножин, які визначаються з використанням виразу (1) (рис. 5):

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=N_{RB}^{RBG\text{subset}}(p)}^{M-1} x_n^{m,p} = 0, \quad (p = \overline{0, P-1}; N_{RB}^{RBG\text{subset}}(p) < M). \quad (8)$$

Використання умови (8) спрямовано на виділення станціям користувачів кількості ресурсних блоків відповідної потужності  $p$ -ї підмножини, що визначаються з використанням виразу (1). Введення цієї умови в математичну модель спричинено тим, що під час розрахунку управляючих змінних (4) для врахування номера ресурсного блока використана змінна  $m$ , яка набуває значення від нуля до  $M-1$  ( $m = \overline{0, M-1}$ ). Отже, виконання умови (8) гарантує, що ресурсні блоки, які не входять до складу  $p$ -ї підмножини ( $m = \overline{N_{RB}^{RBG\text{subset}}(p), M-1}$ ), не будуть виділені станціям користувачів в умовах, коли потужність цієї підмножини менша від максимального значення ( $N_{RB}^{RBG\text{subset}}(p) < M$ ).

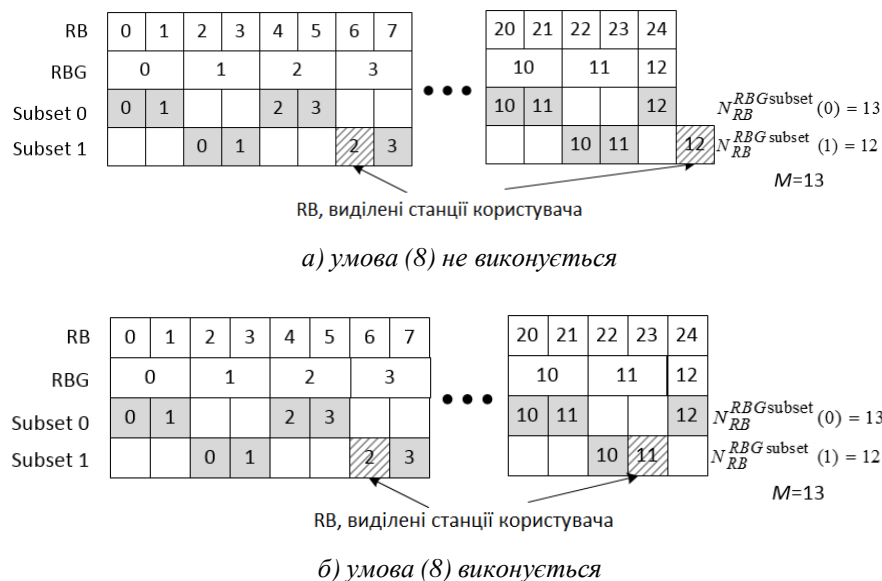


Рис. 5. Приклад перевірки умови (8)

Розрахунок шуканих змінних (4) відповідно до умов-обмежень (5)–(8) доцільно здійснювати в ході розв’язання оптимізаційної задачі з використанням критерію оптимальності, спрямованого на максимізацію загальної продуктивності низхідного каналу зв’язку:

$$\max \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{p=0}^{P-1} x_n^{m,p} \frac{N_{symp}^{RB} N_{SF}^{RB} K_S R_c^n k_b^n K}{10T_{SF}}. \quad (9)$$

Сформульована задача з математичного погляду є задачею цілочислового лінійного програмування – ІЛР (Integer Linear Programming). У моделі шукані змінні  $x_n^{m,p}$  (4) є булевими, а обмеження на шукані змінні (5)–(8) лінійними.

### Аналіз розв’язання задачі розподілу ресурсних блоків

З метою аналізу рішень щодо розв’язання ресурсних блоків у низхідному каналі зв’язку з використанням запропонованої моделі (4)–(9) розглянемо приклад, в якому вихідні дані такі:

- 1) кількість UE –  $N=3$ ;
- 2) число RB, що формуються упродовж передачі одного часового слота –  $N_{RB}^{DL}=15$ ;
- 3) кількість піднесних для передачі даних в одному RB –  $K_S=12$ ;
- 4) кількість символів, що формують один ресурсний блок –  $N_{symp}^{RB}=7$ ;
- 5) час передачі одного RB –  $T_{RB}=0,5$  мс;
- 6) час передачі одного підкадру –  $T_{SF}=1$  мс;
- 7) кількість RB, що формуються на однакових піднесних та виділяються UE упродовж передачі одного підкадру –  $N_{SF}^{RB}=2$ ;
- 8) швидкість коду, що використовується для кодування сигналу різних станцій користувачів –  $R_C^1=0,5$ ;  $R_C^2=1$ ;  $R_C^3=0,5$ ;
- 9) бітове завантаження символу, що використовується станціями користувачів –  $k_b^1=6$ ;  $k_b^2=4$ ;  $k_b^3=4$ ;
- 10) вид розподілу каналів – FDD;
- 11) кількість підкадрів, що використовуються для передачі інформації в низхідному каналі зв’язку –  $K=10$ ;
- 12) кількість RB, що входять до складу однієї RBG (кількість підмножин, що формуються) –  $P=2$ ;
- 13) необхідна швидкість передачі даних для першої станції користувача становила  $R_{необ}^1=0,5$  Мбіт/с, для другої –  $R_{необ}^2=0,5$  Мбіт/с, а для третьої змінювалась в діапазоні  $R_{необ}^3=0,1 \div 2,6$  Мбіт/с.

Як приклад отримано розв’язок сформульованої в роботі оптимізаційної задачі з використанням системи MatLab R2014a, для цього була задіяна функція `bintprog` пакета оптимізації Optimization Toolbox. На рис. 6 показано, як залежить розподіл пропускної здатності, а на рис. 7 кількості ресурсних блоків, низхідного каналу зв’язку між різними станціями користувачів від зміни необхідного значення однієї з них (третьої UE).

Як показали результати вимірювання, на інтервалі  $R_{необ}^3=0,1 \div 2$  Мбіт/с найбільше значення пропускної здатності мала друга станція користувача, яке становило 5,376 Мбіт/с (рис. 6). Це пояснюється тим, що друга UE має найвище значення MCS, в результаті чого їй виділено всі вісім ресурсних блоків нульової підмножини (рис. 7). Розподіл семи ресурсних блоків першої

підмножини на інтервалі  $R_{необ}^3 = 0,1 \div 2$  Мбіт/с виконувався між першою і третьою станціями користувачів (рис. 7). При цьому пропускна здатність третьої UE зростала відповідно до збільшення необхідного значення від 0,336 до 2,016 Мбіт/с. Пропускна здатність другої станції користувача, навпаки, зменшувалася від 3,024 до 0,504 Мбіт/с, через обмеженість частотно-часового ресурсу (ресурсних блоків), велика частина з яких виділялася третій UE зі зростанням  $R_{необ}^3$ .

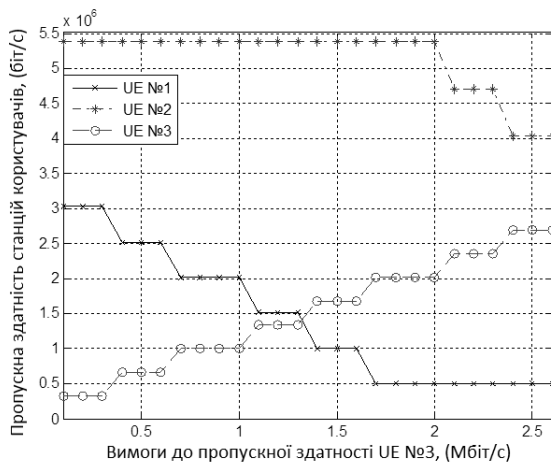


Рис. 6. Залежність пропускних здатностей, що виділяються станціям користувачів, від зміни необхідної пропускної здатності третьої UE

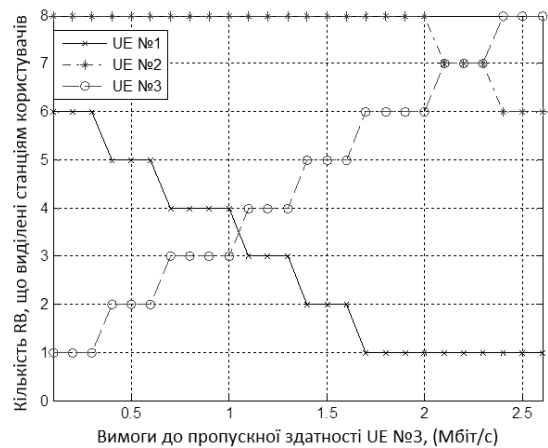


Рис. 7. Залежність кількості ресурсних блоків, що виділяються станціям користувачів, від зміни необхідного значення пропускної здатності третьої UE

На інтервалі вимірювання  $R_{необ}^3 = 2,1 \div 2,3$  Мбіт/с ресурсні блоки нульової підмножини були розподілені між першою і другою станціями користувачів. Пропускна здатність першої станції користувача становила 0,504 Мбіт/с, оскільки їй виділили тільки один RB, а другої UE – 4,704 Мбіт/с (сім RB). Всі сім ресурсних блоків першої підмножини були виділені третій станції користувача, в результаті чого її пропускна здатність досягла 2,352 Мбіт/с.

У випадку, коли  $R_{необ}^3$  набувало значення 2,4–2,6 Мбіт/с, всі вісім ресурсних блоків нульової підмножини були виділені третій станції користувача, а її пропускна здатність становила 2,688 Мбіт/с. Між першою і другою станціями користувачів були розподілені ресурсні блоки першої підмножини: за першою UE був закріплений один RB (0,504 Мбіт/с), а за другою UE – шість RB (4,032 Мбіт/с). Якщо  $R_{необ}^3 > 2,6$  Мбіт/с, сформульована задача не має розв'язку, оскільки неможливо забезпечити всім станціям користувачів необхідні значення пропускних здатностей.

### Висновки

Встановлено, що однією з основних задач у безпроводовій мережі, що функціонує з використанням технології LTE, є задача забезпечення необхідної якості обслуговування, до складу якої входить необхідність виділення станціям користувачів мережі необхідної пропускної здатності в низхідному каналі зв'язку. Забезпечити необхідну пропускну здатність можна, розв'язавши задачу розподілу частотно-часового ресурсу в низхідному каналі зв'язку, яким є ресурсні блоки. Як показав проведений аналіз, відомі рішення щодо розподілу пропускної здатності в низхідному каналі зв'язку технології LTE орієнтовані на використання нульового виду розподілу ресурсів, з невисокою гнучкістю, зважаючи на об'єднання ресурсних блоків у групи.

У результаті цього в статті запропонована математична модель розподілу пропускної здатності низхідного каналу зв'язку технології LTE, новизна якої полягає у використанні першого



виду розподілу ресурсів (Recourse Allocation Type 1). Використання запропонованої моделі дало змогу врахувати технологічні особливості низхідного каналу зв'язку технології LTE (розбиття ресурсних блоків на підмножини, закріплення за станцією користувача RB тільки однієї підмножини), а також – територіальної віддаленості станцій користувачів (виду схеми модуляції та кодування).

У ході аналізу встановлено, що використання запропонованої моделі спрямоване на забезпечення кожній станції користувача якості обслуговування за показником пропускної здатності в низхідному каналі зв'язку з можливістю доступу до додаткової (не гарантованої) смуги пропускання.

1. Iosif O., Banica I. *On the Analysis of Packet Scheduling in Downlink 3GPP LTE System. The Fourth International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service (CTRQ 2011)*. Budapest: IARIA, 2011, P. 99-102. 2. 3GPP TS 36.211. *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 11)*. – Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2012. – 108 p. 3. Гаркуша С. В. *Модель распределения блоков планирования в нисходящем канале связи технологии LTE // Грузинский электронный научный журнал: Компьютерные науки и телекоммуникации*. – 2013. – Вып. 3(39). – С. 76–94. 4. Гаркуша С. В., Василенко Ю. А. *Модель планирования частотно-временного ресурса в нисходящем канале связи технологии LTE // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2013. – Вып. 3(85). – С. 92–98. 5. Garkusha S. V. *The Model of Time and Frequency Resource Scheduling in Downlink LTE / S. V. Garkusha // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) : proceedings, Krasnoyarsk, Russia. September 12–13, 2013*. – Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2013. – P. 1–4. 6. Garkusha S. *Result Research Model of Scheduling Block Allocation in Downlink LTE / S. Garkusha, A. Al-Dulaimi, H. Al-Janabi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science : proceedings of the XII International Conference (TCSET'2014), Slavske, Ukraine. February 25 – March 1, 2014*. – Lviv, 2014. – P. 498–500. 7. 3GPP TS 36.213. *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 11)*. – Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2012. – 104 p. 8. Ghosh A., Zhang J., Muhamed R., Andrews J. Cr. *Fundamentals of LTE*. – Prentice Hall, USA, 2010. – 464 p.