

УДК 621.391

Демидов І. В., канд. техн. наук, доц. (Тел. +380 (99) 371 58 54. E-mail: demydov@lp.edu.ua)

Климаш М. М., докт. техн. наук, проф. (Тел. +380 (50) 431 98 07. E-mail: mklimash@lp.edu.ua)

Гуськов П. О., аспірант (Тел.: +380 (98) 902 84 72. E-mail: p.huskov@gmail.com)

Мухамед Мехді Ель Хатрі, аспірант (Тел.: +380 (93) 438 14 01. E-mail: lviv.polytechnique@hotmail.fr)  
(Національний університет «Львівська політехніка»)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ ОПОРНО-ТРАНСПОРТНОЇ ПІДСИСТЕМИ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

**Demydov I. V., Klymash M. M., Guskov P. O., Mohamed Mehdi El Hatri. The investigation of traffic probabilistic characteristics at mobile network's backhaul.** In the research work the stochastic characteristics of blocking workload traffic in a distributed service network system were investigated. For a detailed study there was transport subsystem architecture of RAN selected in the mobile network (backhaul of future generation net). There were method and an algorithm described that allows calculating the probability of workload traffic blocking in a distributed service network system using the aids of queuing systems and stochastic processes theories. Software is created, that calculate these probabilities. There was investigational efficiency of application of maintenance disciplines of queries streams at the terms of backuping and at the terms of absence of backuping channel resources in the distributed service network systems.

**Ключевые слова:** service network systems, network architecture, workload traffic, transport subsystem, stochastic processes, probability-time characteristics, the mobile network

**Демидов І. В., Климаш М. М., Гуськов П. О., Мухамед Мехді Ель Хатрі. Дослідження імовірнісних характеристик трафіку опорно-транспортної підсистеми мережі мобільного зв'язку.** В роботі виконано дослідження імовірнісних характеристик блокування трафіку запитів у розподіленій сервісній мережній системі. Для докладного розгляду обрано архітектуру транспортної підсистеми RAN у мережі мобільного зв'язку наступного покоління. Розроблено метод та описано алгоритм, який дозволяє обчислювати імовірності блокування трафіку запитів у розподіленій сервісній мережній системі з використанням математичного апарату теорії систем масового обслуговування та випадкових процесів.

**Ключові слова:** сервісні мережні системи, мережна архітектура, трафік запитів, транспортна підсистема, випадкові процеси, мережа мобільного зв'язку

**Демидов И. В., Климаш М. Н., Гуськов П. А., Мухаммед Мехди Эль Хатри. Исследование вероятностных характеристик трафика опорно-транспортной подсистемы сети мобильной связи.** В работе выполнено исследование вероятностных характеристик блокировки трафика запросов в распределенной сервисной сетевой системе. Для рассматривания избрана архитектура транспортной подсистемы RAN в сети мобильной связи следующего поколения. Разработан метод и описан алгоритм, который позволяет вычислять вероятности блокировки трафика запросов в распределенной сервисной сетевой системе с использованием математического аппарата теории систем массового обслуживания и случайных процессов.

**Ключевые слова:** сервисные сетевые системы, сетевая архитектура, трафик запросов, транспортная подсистема, случайные процессы, сеть мобильной связи

**1. Вступ.** Тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку в сукупності з новими якісними та кількісними вимогами користувачів обумовлюють зростаючу роль транспортної підсистеми (ВН - backhaul) на рівні радіодоступу (RAN – Radio Access Network) [1, 2]. Вже сьогодні такі провідні компанії як Alcatel Lucent, NSN, Huawei, Ericsson та Cisco розробляють нові стандарти оптичного та безпроводного зв'язку для ВН [3], що покликані підвищити ємність, масштабованість та доступність транспортних каналів, зберігаючи низький рівень затримки, підтримку мультисервісного трафіку та розподілу по QoS. У той же час, відкритими залишаються питання дослідження імовірнісних характеристик трафіку та маршрутизації в RAN.

На Рис. 1. зображена архітектура RAN, що складається з опорних станцій та точок доступу. Опорні станції формують макрокоміркове покриття, за їх допомогою забезпечується під'єднання точок доступу до ядра мережі. За необхідності, вони виконують ряд функцій управління, залежно від ступеня централізованості RAN [4]. Точки доступу

приєднуються до опорних станцій та, разом з абонентами, які обслуговуються безпосередньо, формують вхідне навантаження, рівень якого може суттєво варіюватись впродовж доби.

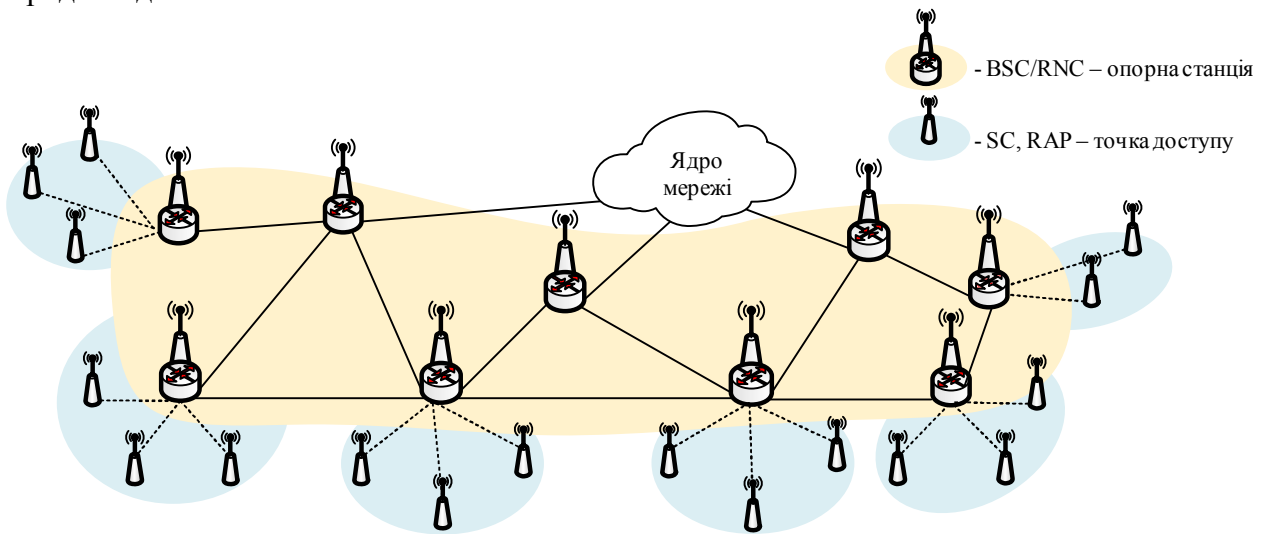


Рис. 1. Архітектура RAN

Транспортна підсистема повинна ефективно адаптуватись до змін навантаження, розподіляючи каналні ресурси на кожному з маршрутів у відповідності до вимог рівня агрегації та поточних характеристик ВН.

**Метою роботи** є розроблення структурно-математичної моделі обслуговування потоків запитів у сегменті сервісної мережної системи на прикладі транспортної підсистеми RAN у мережі мобільного зв'язку наступного покоління.

**2. Постановка задачі.** В роботі [5] було побудовано математичну модель обслуговування трафіку запитів в розподіленій сервісній мережній системі, яка утворює собою об'єднання декількох СМО. Також наведений опис функціональної відповідності між структурно-функціональною (Рис. 2) і структурно-математичною [5] моделями розглянутого сегменту розподіленої сервісної мережної системи [9].

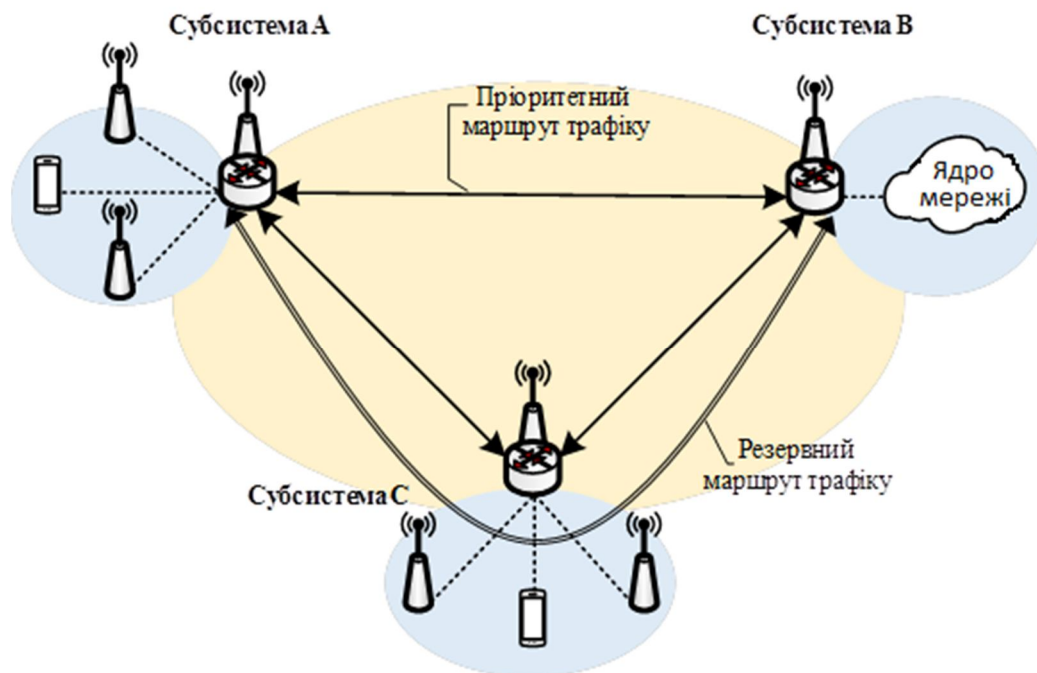


Рис. 2. Блок-схема сегменту розподіленої мережної підсистеми RAN з двома можливими маршрутами пересилання трафіку запитів

Для спрощення математичної моделі розглянемо транспортну підсистему RAN на прикладі трьох субсистем, одна з яких (В) має пряме під'єднання до ядра мережі, а інші виконують функції агрегування та ретрансляції трафіку.

У роботі [5] був докладно описаний процес обслуговування та маршрутизації трафіку запитів від субсистем сервісної мережної системи при надходженні до змодельованої СМО.

Були запропоновані та описані основні параметри розглянутої СМО, оцінку яких необхідно отримати при розробленні алгоритму обчислення ймовірності блокування трафіку запитів в досліджуваній СМО, зокрема в умовах відмови від попереднього резервування каналної ємності між сервісними підсистемами.

Виконаємо дослідження ймовірності блокування трафіку запитів у розподіленій сервісній мережній системі, що досліджується.

Прийmemo такі основні позначення:

$\lambda_1$  – інтенсивність вхідного потоку запитів від субсистеми А;

$\lambda_2$  – інтенсивність вхідного потоку запитів від субсистеми С;

$\mu$  – інтенсивність обслуговування запитів від субсистем А і С на пріоритетному та резервному маршрутах в сервісній мережній системі;

$q$  – ймовірність того, що запит від субсистеми А або С не буде оброблений субсистемою В (не утворить результуючого потоку трафіку в мережній системі);

$\pi_{11}$  – ймовірність того, що потік трафіку за запитом від субсистеми А буде блокований на пріоритетному маршруті;

$\pi_{12}$  – ймовірність того, що потік трафіку за запитом від субсистеми А буде блокований на пріоритетному маршруті після того, як буде згенерований субсистемою В внаслідок обслуговування запиту ядром мережі;

$\pi_2$  – ймовірність того, що потік трафіку за запитом від субсистеми А буде блокований на першій частині резервного маршруту трафіку (А-С);

$\pi_3$  – ймовірність того, що потік трафіку за запитом від субсистеми А буде блокований на другій частині резервного маршруту трафіку (С-В);

$\frac{1}{\mu_0}$  – середній час очікування обслуговування в субсистемі В запитами від субсистем А і С ;

$\mu_0$  – параметр експоненційної функції розподілу  $F(x) = 1 - e^{-\mu_0 x}$ ,  $x > 0$ , за допомогою якої моделюється час очікування обслуговування субсистемою В (ядром системи мобільного зв'язку) запитів від субсистем А і С.

Необхідно звернути увагу на те, що визначення величин каналних ресурсів ( $N, M, K, L_1, L_2$ ) у [5] передбачає їх дискретний характер, зокрема з технологічних міркувань – при резервуванні й утворенні відповідних інформаційних потоків (віртуальних каналів) на практичному мережному обладнанні (раутери, серверні платформи), а також з математичних, оскільки до складу більшості класичних розрахункових співвідношень теорії СМО входить поняття факторіалу. Розрахункову величину окремих потоків користувачів необхідно оцінювати, виходячи із прогнозованого набору послуг системи та конкретного типу мережного обладнання телекомунікаційної платформи.

Отже, потрібно побудувати математичну модель описаної СМО і за допомогою дослідження цієї моделі визначити оптимальні значення для її структурних параметрів (обсяг каналних ресурсів на кожному з маршрутів; поріг гарантованого ресурсу каналної ємності, його співвідношення з каналною ємністю  $N$  на пріоритетному маршруті трафіку, при якому ймовірність відмови у обслуговуванні запиту буде мінімальною (тобто слід підібрати оптимальне значення каналного ресурсу  $M$ ); ймовірність відмови у обслуговуванні запиту, якщо в момент його приходу на пріоритетний маршрут трафіку було зарезервовано каналну ємність  $K$ , а за час оброблення її витратили інші запити відповідними інформаційними потоками і початковий запит отримає відмову.

Слід врахувати, що, використовуючи каналний ресурс першої частини резервного маршруту А-С ( $L_1$ ), може не виявитись достатнього каналного ресурсу ( $L_2$ ) в його другій частині, оскільки на

маршрут С-В також надходять запити від підсистеми В. У результаті також може виникати відмова у обслуговуванні запиту.

Реалізуємо нашу математичну модель наступним чином.

1. Обчислимо ймовірність блокування трафіку запиту від підсистеми А на пріоритетному маршруті А-В до ядра мережі за формулою:

$$\pi_{11} = E_{\rho=\frac{\lambda_1}{\mu}}^{\rho^M} (M) = \frac{M!}{\sum_{i=0}^M \frac{\rho^i}{i!}}. \quad (1)$$

2. Обчислимо ймовірність блокування трафіку запиту від підсистеми А на пріоритетному маршруті А-В після того, як він отримає підтвердження обслуговування від мережного ядра підсистеми В за формулою:

$$\pi_{12} = E_{\rho=\frac{\lambda_1(1-\pi_{11})(1-q)}{\mu}}^{\rho^N} (N) = \frac{N!}{\sum_{i=0}^N \frac{\rho^i}{i!}}. \quad (2)$$

Для обчислення ймовірності блокування трафіку запиту від підсистеми А на першій частині резервного маршруту трафіку (А-С) (ймовірності  $\pi_2$ ) і на другій частині резервного маршруту трафіку (С-В) (ймовірності  $\pi_3$ ) проведено розрахунок параметрів СМО, до якої входять два потоки викликів і яка володіє каналними ресурсами  $L_1$  і  $L_2$ , відповідно.

Для обчислення ймовірностей  $\pi_2$  і  $\pi_3$  введемо двовимірний випадковий процес  $(\xi(t), \eta(t))$ , де  $\xi(t)$  – кількість запитів від підсистеми А (назвемо їх запитами першого типу), що знаходяться на обслуговуванні в СМО в момент часу  $t$ , а  $\eta(t)$  – кількість запитів від підсистеми С (назвемо їх запитами другого типу), що також знаходяться на обслуговуванні в СМО в момент часу  $t$ . Загальне число запитів, що знаходяться на обслуговуванні в СМО в будь-який момент часу  $t$ , дорівнюватиме сумі числа запитів першого і другого типів, тобто  $\zeta(t) = \xi(t) + \eta(t)$ . Простір станів цього процесу записується таким чином:

$$S = \{(i, j) \mid i = \overline{0, L_2}, j = \overline{0, L_1}, i + j \leq L_2\}, L_2 < L_1. \quad (3)$$

Граф інтенсивностей переходів описаного випадкового процесу подано на Рис. 3. При цьому, стаціонарна ймовірність перебування випадкового процесу в стані  $(i, j)$  може бути подана, як:

$$p_{(i,j)} = P\{\xi(t) = i, \eta(t) = j\}. \quad (4)$$

Відповідні ймовірності визначаються за допомогою сформованої системи рівнянь глобального балансу для випадкового процесу  $(\xi(t), \eta(t))$  (див. Рис. 3), яка записується наступним чином:

$$\begin{cases} p_{(0,0)}(\lambda_1 + \lambda_2) = \mu p_{(1,0)} + \mu p_{(0,1)}, i = 0, j = 0; \\ p_{(0,j)}(j\mu + \lambda_1 + \lambda_2) = \lambda_2 p_{(0,j-1)} + \mu p_{(1,j)} + (j+1)\mu p_{(0,j+1)}, i = 0, j \neq 0, j \neq L_1; \\ p_{(0,L_1)}(\lambda_1 + L_1\mu) = \lambda_2 p_{(0,L_1-1)} + \mu p_{(1,L_1)}, i = 0, j = L_1; \\ L_2\mu p_{(L_2,0)} = \lambda_1 p_{(L_2-1,0)}, j = 0, i = L_2; \\ p_{(i,0)}(i\mu + \lambda_1 + \lambda_2) = (i+1)\mu p_{(i+1,0)} + \mu p_{(i,1)} + \lambda_1 p_{(i-1,0)}, j = 0, i \neq L_2, i \neq 0; \\ p_{(L_2-j,j)}(j\mu + (L_2-j)\mu) = \lambda_2 p_{(L_2-j,j-1)} + \lambda_1 p_{(L_2-j-1,j)}, j > 0, i + j = L_2. \end{cases} \quad (5)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (5) і використовуючи умову нормування

$$\sum_{(i,j) \in S} p_{(i,j)} = 1, \quad (6)$$

отримуємо шукані значення ймовірностей  $p_{(i,j)}$ . За їх допомогою та за наступними формулами (7) і (8) визначаються шукані ймовірності. Таким чином:

$$\pi_2 = \sum_{(t,L_1) \in S, t=0, L_2-L_1} P_{(t,L_1)}, \quad (7)$$

$$\pi_3 = \sum_{(t,L_1) \in S, i+j=L_2} P_{(i,j)} \quad (8)$$

Розв'язання системи рівнянь (5) реалізовано програмно методами Гаусса та Крамера [6]. Причому, в результаті експериментів було встановлено, що використання методу Гауса для вирішення системи рівнянь (5) є більш ефективним, у порівнянні з методом Крамера за часом обчислень приблизно на 12%.

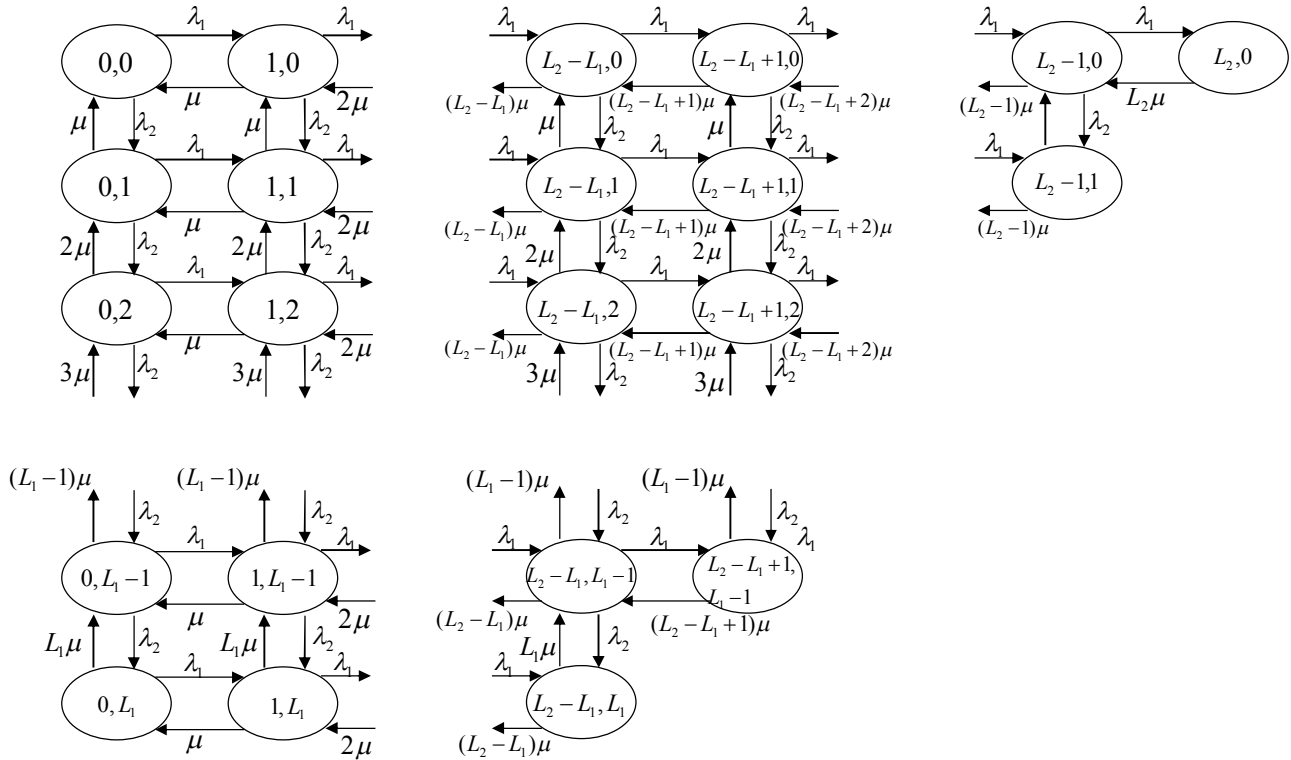


Рис. 3. Граф інтенсивностей переходів випадкового процесу  $(\xi(t), \eta(t))$

Отриманий в результаті роботи програми масив розв'язків системи (5), тобто значень  $p_{(i,j)}, (i,j) \in S$  був використаний для обчислення ймовірностей блокування трафіку запитів  $\pi_2$  і  $\pi_3$  за формулами (7) і (8) відповідно.

Величина  $\pi_2$  – імовірність блокування трафіку запиту від підсистеми А на першій частині резервного маршруту трафіку (А-С). Отож, число запитів на обслуговування (з'єднання) першого типу від підсистеми А має використати каналний ресурс  $L_1$  (відповідний буфер СМО заповнений), а імовірність такої події –  $p_{(1,L_1)}$ . Оскільки число запитів першого типу на обслуговуванні може бути будь-яким у межах каналного ресурсу від 0 до  $L_2-L_1$  (більше бути не може, оскільки каналний ресурс рівний  $L_2$ , а величина ресурсу  $L_1$  вже зайнята обслуговуванням запитів від підсистеми А), то при обчисленні ймовірності блокування викликів  $\pi_2$  підсумовування за  $i$  ведеться у межах, вказаних у формулі (7).

Величина  $\pi_3$  – імовірність блокування трафіку запиту від підсистеми А на другій частині резервного маршруту трафіку (С-В). Запити на обслуговування першого і другого типів зможуть використовувати каналний ресурс з величиною  $L_2$  (величина доступного каналного ресурсу другої частини резервного маршруту), отже, будь-який новий запит, що

входить в СМО буде блокований. Тому ймовірність  $\pi_3$  є сумою всіх ймовірностей  $P_{(i,j)}$  для станів процесу  $(\xi(t), \eta(t))$ , коли  $\zeta(t) = i+j = L_2$ .

Таким чином, в даній роботі розроблено метод та описано алгоритм, який дозволяє обчислювати ймовірності блокування трафіку запитів у розподіленій сервісній мережній системі з використанням математичного апарату теорії систем масового обслуговування та випадкових процесів. Отримані результати дозволили розробити програму мовою програмування C++, яка дозволяє автоматизувати проведення розрахунків досліджуваної системи масового обслуговування.

Розроблена математична модель обслуговування запитів у розподіленій сервісній мережній системі максимально наближена до реальних умов і максимально повно відображає всі аспекти її роботи. При цьому, природно, не вдалося уникнути деяких спрощень для того, щоб розроблена математична модель піддавалася простому аналітичному дослідженню, а процеси, що відбуваються в ній логічно пов'язувалися між собою.

**3. Дослідження процесів резервування потоків у розподіленій сервісній мережній архітектурі шляхом моделювання процесів обслуговування запитів до RAN.** Відповідно до рекомендації МСЕ-T Q.764 [7], при передаванні через мережу сигналізації ЗКС № 7 початкового адресного повідомлення (IAM) в системі рухомого зв'язку 4G LTE, одночасно відбувається резервування каналів зв'язку в інформаційній мережі транспортної підсистеми. Те саме стосується оброблення потоків трафіку запитів, які, для прикладу, стосуються отримання та оброблення контенту в сервісних мережних системах.

Результати досліджень, що подані нижче були виконані на основі комп'ютерного моделювання [8] та із застосуванням алгоритмів, що викладені у даній роботі та [5]. Було досліджено ефективність застосування дисциплін обслуговування потоків запитів за умов резервування та за умов відсутності резервування каналних ресурсів в розподілених сервісних мережних системах. Дослідження проводилися в кілька етапів.

На етапі 1 було досліджено залежність показника відмов в сервісній мережній підсистемі RAN від інтенсивності запитів, що до неї надходять для випадків попереднього резервування та відмови від резервування каналних ресурсів розподіленої телекомунікаційної платформи. Результати проведених досліджень представлені на Рис. 4 [9, 10].

Таким чином, за умови відмови від резервування каналних ресурсів, виграш за продуктивністю обслуженого сервісною мережною системою навантаження у 16-22% спостерігається вже при 17-20 тис. зап./с.

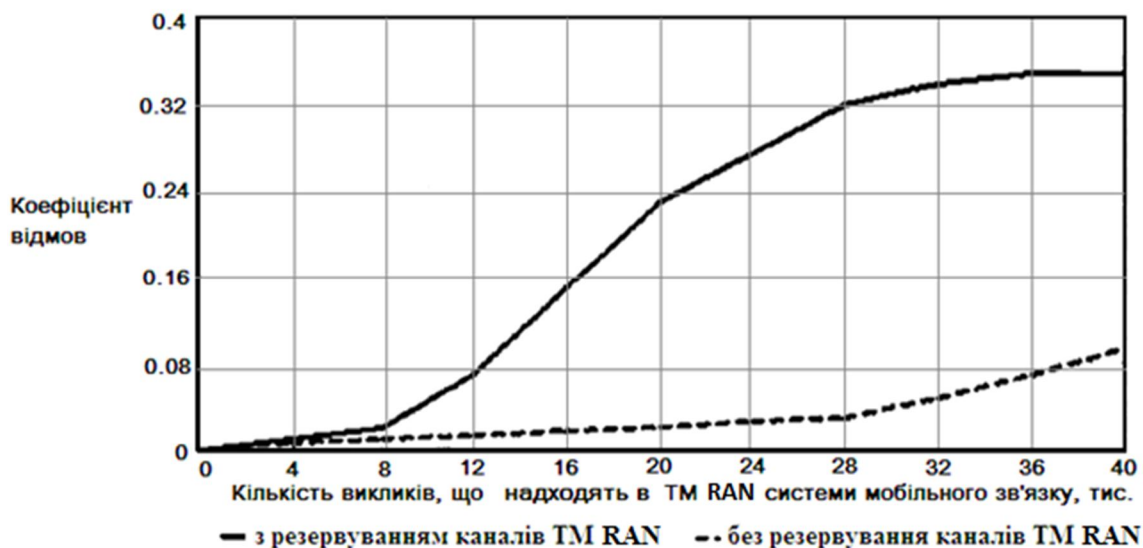


Рис. 4. Залежність показника відмов в сервісній мережній підсистемі RAN, що моделюється від інтенсивності запитів, які до неї надходять (зап./с.)

**Етап 2.** За умов резервування каналних ресурсів телекомунікаційної підсистеми при зростанні інтенсивності запитів середня тривалість сесій при використанні клієнтами сервісної мережної підсистеми RAN починала зменшуватися (внаслідок великої кількості відмов) (див. Рис. 5), а за відсутності резервування ця тривалість продовжувала збільшуватися, вказуючи на потенціал до збільшення системної продуктивності.

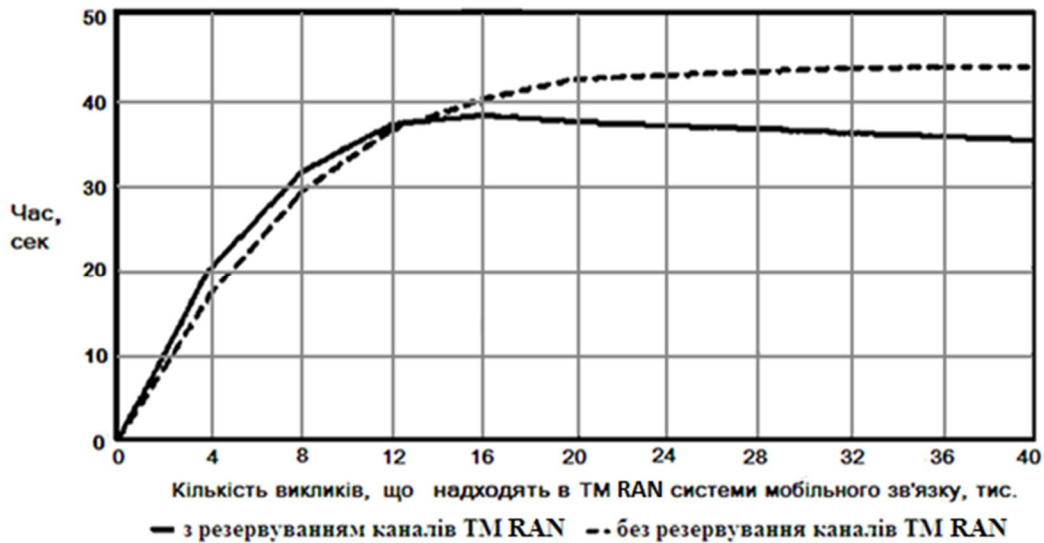


Рис. 5. Залежність середньої тривалості сесій клієнтів у сервісній мережній підсистемі RAN, що моделюється від інтенсивності запитів, які до неї надходять (зап./с.)

**На етапі 3** досліджувалася тривалість обслуговування запитів для випадків попереднього резервування та відмови від резервування каналних ресурсів розподіленої телекомунікаційної платформи сервісної мережної підсистеми RAN. Результати проведених досліджень представлені на Рис. 6 [8, 9].

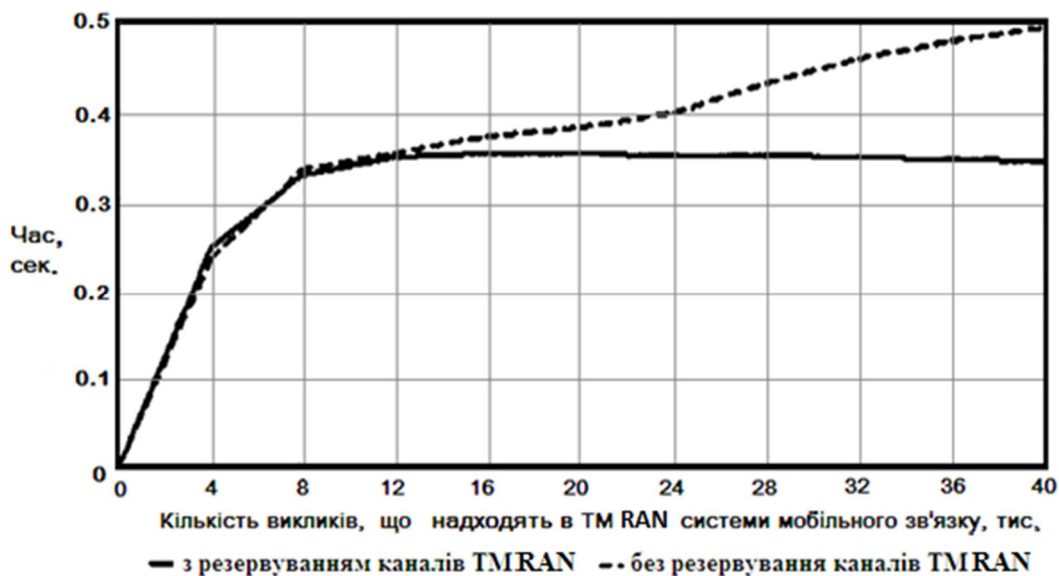


Рис. 6. Залежність середньої тривалості обслуговування запитів, які надходять у сервісну мережну підсистему RAN, що моделюється від інтенсивності запитів, які до неї надходять (зап./с.)

При попередньому резервуванні каналних ресурсів розподіленої телекомунікаційної платформи сервісної мережної підсистеми RAN, середня тривалість обслуговування запитів, які надходять у сервісну мережну систему залишалася приблизно постійною. Спочатку даний показник незначно збільшився, внаслідок зростання навантаження, а потім зменшився, внаслідок зростання показника втрат (відмов у обслуговуванні запитів), які з'явилися при обмеженні навантаження на сервісну мережну систему.

#### **4. Висновки**

1. У роботі розроблено алгоритм обчислення імовірностей блокування запитів при використанні багатопляхової маршрутизації потокового трафіку запитів, що може бути застосований при моделюванні транспортної підсистеми мобільних мереж четвертого та п'ятого покоління. Створено програмне забезпечення, що дозволяє проводити обчислення цих імовірностей.

2. Відмова від попереднього резервування каналних ресурсів в телекомунікаційній платформі сервісної мережної системи дозволяє обслуговувати більшу кількість запитів, ніж у випадку виконання такого резервування. Якість обслуговування таких запитів, зокрема тривалість їх оброблення при цьому змінюється незначно.

3. Відтак, за результатами моделювання спостерігається підвищення продуктивності сервісної мережної системи за обслугованим навантаженням трафіку запитів. Зокрема, при інтенсивності вхідного навантаження на сервісну мережну систему 17-20 тис. зап./с. відповідний виграш становить 16-22%, при цьому середній час тривалості сесій клієнтів у сервісній мережній системі збільшується в середньому на 5 с. при інтенсивності навантаження більше 20 тис. зап./с.

#### **Література**

1. Xiaohu Ge. 5G Wireless Backhaul Networks: Challenges and Research Advances / Xiaohu Ge, Hui Cheng, Mohsen Guizani, Tao Han // IEEE Network Magazine. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2014. – Vol. 28, no. 6. – P. 6-11.

2. Климаш М. М. Дослідження особливостей розвитку архітектури та технологій WiMAX-орієнтованих інтегрованих радіомереж доступу 4G / М. М. Климаш, І. В. Демидов, Самер Аввад // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2008. – №4 (6). – С.37-47.

3. Monica Paolini. Small-cell backhaul: Industry trends and market overview / Monica Paolini, Lance Hiley, Frank Rayal Senza Fili. – Senza Fili Consulting, 2013.

4. Гуськов П. О. Метод динамічного формування структури рівня радіодоступу для мереж 5G / П. О. Гуськов, Т. А. Максимюк, М. М. Климаш // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2015. – №818: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 220–230.

5. Демидов І. В. Моделювання процесів обслуговування потоків запитів у розподілених сервісних мережних архітектурах / І. В. Демидов, П. О. Гуськов, Мухамед Мехді Ель Хатрі // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2015. – №5(39). – С. 44-51.

6. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ: в 2 - х частях. Ч.2 / М. Шварц. – М.: Наука, 1992. – 276 с.

7. Q.764: Specifications of Signalling System No. 7 – ISDN user part // Series Q: switching and signaling. – Geneva: ITU-T, 1999. – 110 p.

8. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей / А. Д. Мышкис. – 3-е изд., – Москва : КомКнига, 2007. – 192 с.

9. Самер Аввад. Дослідження обслуговування трафіку на транзитній мережі оператора мобільного зв'язку / Самер Аввад, М. М. Климаш, І. В. Демидов, Б. В. Коваль // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2011. – №1(17). – С. 51-55.

10. Samer Awwad. Traffic Design in 4G Broadband Backbone Nets / Samer Awwad, Mykhailo Klyumash, Ivan Demydov // Матеріали 11-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці». – Львів – Поляна, Україна, 2011. – P. 145 – 146.

Дата надходження в редакцію: 14.08.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Ю. Г. Савченко