

УДК 621.29 (045)

**МЕТОД БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В ОПОРНІЙ МЕРЕЖІ
СТІЛЬНИКОВОГО ОПЕРАТОРА***Р. С. Одарченко*, канд.техн. наук, доц.; *А. О. Абакумова*, асп.Національний авіаційний університет
odarchenko.r.s@mail.ru

У статті проаналізовано алгоритми резервування ресурсів та методи перерозподілу потоків трафіку опорної мережі стільникового оператора зв'язку. До розгляду було взято модель мережевого трафіку на основі систем масового обслуговування М/М/1-модель. За допомогою цієї моделі було досліджено завантаженість мережі, а також розроблено метод балансування навантаження в транспортній мережі LTE, який дозволить досягнути більш збалансованого розподілу трафіку по всій мережі і відповідно більш високих показників продуктивності.

Ключові слова: алгоритм резервування, потік трафіку, балансування навантаження, транспортна мережа, LTE.

The paper analyzes resource reservation algorithms and methods of traffic flows redistribution in the backbone mobile operator network. Network traffic model was taken for consideration based on queuing system M/M/1-model. By using this model network load was investigated, and method of load balancing was developed in LTE transport network, that allows to achieve more balanced traffic distribution across the network and therefore higher performance.

Keywords: reservation algorithm, traffic flows, load balancing, transport network, LTE.

Вступ

Зростання інформатизації суспільства підвищує вимоги до надійності та продуктивності передачі даних в інформаційних телекомунікаційних мережах. Відповідно, із збільшенням кількості користувачів у мережі збільшується обсяг інформації, що передається. Це призводить до загострення проблеми пікових навантажень. У зв'язку з цим актуальним є аналіз існуючих моделей та моделювання мережевого трафіку з метою забезпечення високої якості передачі в інформаційних телекомунікаційних мережах.

Аналіз досліджень та публікацій

Даній тематиці присвячено досить багато робіт вітчизняних [1; 2] та зарубіжних учених [3; 4].

Слід відмітити праці [5; 6], у яких досліджувалися алгоритми резервування мережевих ресурсів та перерозподілу потоків трафіку.

Проте в публікаціях присвячених обраній темі не приділено достатньо уваги розробці методу розподілу трафіку по всім мережевим портам з урахуванням балансування навантаження за умови різної вартості маршрутів.

Постановка мети та задач дослідження

Метою даної роботи є розробка методу балансування навантаження в опорній мережі стільникового оператора, який дозволить підвищити інтенсивність використання мережевих сегментів, а значить і ефективну пропускну спроможність мережі в цілому. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– аналіз методів побудови та функціонування опорної мережі;

- аналіз алгоритмів резервування мережевих ресурсів;
- побудова системи масового обслуговування як прототипу системи для розвантаження мережі;
- розробка методу балансування навантаження в мережі.
- моделювання процесу розвантаження мережі.

Виклад основного матеріалу дослідження**Опорна мережа стільникового оператора**

Мережі стільникового зв'язку повинні пропускати трафік у прогнозованих обсягах і своєчасно задовольняти зростаючий споживчий попит на високошвидкісну передачу даних.

Українську важливу роль в досягненні цієї мети відіграє вибір ефективної технології [7]. Система стільникового зв'язку LTE була розроблена, для того щоб забезпечити високу пропускну спроможність і сервіс високої швидкості передачі даних для стільникових мультимедіа [8].

На відміну від більшості мереж попереднього покоління, у яких спостерігається досить висока різноманітність і ієрархічність мережевих вузлів, архітектуру мереж LTE можна назвати «плоскою», за якою базові станції (eNodeB) безпосередньо підключені до вдосконаленої пакетної опорної мережі (ЕРС) [9]. З боку користувача з'єднання встановлюється з обслуговуючим шлюзом (SGW), з керуючої сторони — з системою підтримки мобільності (ММЕ, Mobility Management Entity).

Для належної підтримки нових широкосмугових технологій радіодоступу в транс-портних мережах має бути підвищена ефективність передачі інформації при зниженні вартості доставки кожного мегабайта трафіку та забезпеченні якості обслуговування (QoS), необхідного кожному типу трафіку. Класична транспортна мережа оператора стільникового зв'язку складається з двох основних сегментів [10]:

- розподільної мережі (backhaul), що зв'язує базові станції з контролерами і центрами комутації рухомого зв'язку (Mobile Switching Center, MSC);
- магістральної мережі (backbone), що забезпечує високошвидкісний транспорт між центрами комутації.

До основних критеріїв для оцінки транспортної мережі можливо віднести [11]:

- пропускна здатність каналу зв'язку;
- максимальна довжина транспортної ділянки;
- час відновлення зв'язку;
- можливість управління навантаженням;
- підтримка;
- доступність обладнання;
- доступність фахівців;
- сумісність обладнання різних виробників.

Аналізуючи критерії, наведені вище, необхідно проводити пошук нових архітектурних рішень та підходів, що дозволять підвищити ефективність використання транспортних сегментів стільникових мереж.

У контексті цього доцільно розглянути мережі SDN. Програмно-конфігуровані мережі можуть докорінно змінити оптичні транспортні мережі. SDN дозволить застосовувати централізований контроль над мережею, забезпечить її програмованість та автоматизацію надання різних сервісів для різних QoS.

Тому, розуміючи це, організація ONF (Open Network Foundation) проводить розробку OTS (open transport switches), які працюють як посередники між контролером та оптичним комутатором. OTS взаємодіє з контролером через протокол OpenFlow, а для взаємодії з оптичним комутатором використовується специфічний командний синтаксис для конкретного комутатора. OTS нададуть змогу операторам стільникового зв'язку або великим сервіс-провайдерам розробляти та застосовувати поряд в своїх мережах нові більш досконалі алгоритми резервування мережеских ресурсів та перерозподілу потоків трафіку (балансування навантаження), що в результаті надасть змогу підвищити якість обслуговування абонентів. Тому спершу проаналізуємо сучасні

алгоритми, що широко застосовуються, потім модель обслуговування та проведемо моделювання балансування навантаження в мережі.

An Integrated Solution

Резервування відповідних мережеских ресурсів для встановлення віртуального з'єднання між парами джерело-адресат, досягається за допомогою протоколу сигналізації MPLS, що створює шлях для ресурсів по оптичним волокнам в DWDM мережі. Є дві мети використання схеми резервування ресурсів мережі:

- гарантування успішно доставлених ресурсів;
- налаштування оптичного перемикача паралельно з резервуванням ресурсів.

Подібність між резервуванням лямбда та лектронних протоколів MPLS сигналізації є те, що вони можуть виконувати мітки заміни шляхом введення лямбда перетворення в кожному O-LSR. Однак, структура резервування лямбда не може змінювати мітку укладання і злиття в ядрі DWDM мережі. Як результат даного обмеження, ця схема розроблена так, щоб дозволити резервування ресурсів тільки з лямбда-компонентом. Інакше кажучи, використовується один повний компонент лямбда на кожній ланці з комп'ютерного шляху між парою джерело – призначення.

Routing and Wavelength Assignment Algorithm

Для простоти, протокол резервування на основі паралельного резервування був реалізований для того, щоб перевірити різні схеми призначення маршрутизації і довжини хвилі, що були задіяні. Генератор посилає повідомлення «запит» для нового підключення до іншого випадково обраного вузла. У разі якщо GMPLS маршрутизатор отримує повідомлення «запит», обчислює явний маршрут до запитуваного пункту призначення і призначає довжину хвилі для зв'язку, а потім оцінює загальну залишкову дисперсію і PMD — звідси розширення часу. Якщо обидва маршрути, і довжина хвилі доступні, GMPLS маршрутизатор здійснює резервування в паралельному маршруті. Він посилає в паралельному повідомленні «резерв» у кожен вузол явного маршруту, але за винятком себе. Коли вузол отримує повідомлення «резерв», він перевіряє, чи надає запит на хвилі його попередник в явному маршруті. Потім він посилає «відповідь» повідомлення назад, щоб джерело визначило успіх попереднього замовлення. Якщо запитувана хвиля не доступна в одному або декількох вузлах на явному маршруті, джерело посилає повідомлення зняття запиту для всіх вузлів, які мають уже зарезервовані довжини хвилі від явного шляху.

MBR: A Markov-based Reservation Algorithm for Wavelength

Джерело вузла застосовує найкоротший шлях алгоритму маршрутизації і використовує зворотній протокол резервування для створення з'єднання. Вузол джерела даних посилає повідомлення «PROB» до вузла призначення. Отримав повідомлення «PROB», проміжний вузол буде оновлювати `wave_map`-поле — маркуванням зайнятих довжин хвиль на `input` волокон її позначати `output` волокна як «зайняті». Після прийому повідомлення «PROB», вузол призначення вибирає вільні довжини хвилі (First-Fit, Random, т. д.) на основі інформації в області `wave_map`, і надсилає повідомлення «ResV» вгору по шляху призначення. Всі вузли уздовж шляху блокуватимуть хвилі, зазначені у повідомленні «RESV» повідомленні.

Assignment in All-optical Networks

Коли «PROB» повідомлення запиту на з'єднання (A->E) надходить на проміжний вузол (C), перший вузол оновлює поле `wave_map` в повідомленні, відбувається маркування зайнятих довжин хвиль на вході і виході послань, такими позначками як «зайнято». Коли запит на інше з'єднання надходить в вузол C, також потрібно обчислити ці ймовірності. Розрахунок повинен бути витриманий на можливе призначення довжини хвилі на основі інформації про більш ранній запит на з'єднання. Щоб обчислення було більш простішим, використовується евристичний метод. Після обчислення ймовірності того, що з'єднання буде використовувати різні довжини хвиль, ми викликаємо функцію `wheel_of_fortune`. Вузол C потім зберігає запис про запит у поточній таблиці параметри поля `wheel_game` в результаті функції `wheel_of_fortune`. повідомлення «PROB» вирушає до вузлів, що знаходяться нижче в алгоритмі резервування. Якщо приходить запит на вузол C і знаходить запити втручання в поточній таблиці, він буде викликати функцію `solve_interference`.

Advance reservation-based co-allocation algorithm

Алгоритм виконується при кожному прибутті запиту бронювання. Етапи планування резервування ресурсів іспільного розподілу в GRC (global resource coordinator) полягають у такому:

- GRC отримує `co-allocation` запит на співпрацю від користувача;
- GRC Planner створює кілька планів на бронювання запитом.

Планувальник вибирає N `laddered` терміни від $[EST, LST + D]$. (Визначається Earliest Start Time (EST) — найшвидший час початку, Latest Start

Time (LST) — найпізніший час початку, і тривалість (D), у якому користувач хоче забронювати часовий інтервал довгими D підрозділами, що розпочнуться після EST і до LST, тобто, це обробка перед $LST + D$.) Планувальник отримує результати доступних інформаційних ресурсів на N часових рамок від RMS. Використовуючи цю наявну інформацію ресурсів, планувальник визначає N ($0 \leq N$) плани бронювання, засновані на методі спільного розподілу. Планувальник сортує N плани в довільному порядку, який залежить від `co-allocation` опції в питаннях користувача і адміністратора. Відповідно до планів бронювання, створених Planner, GRC намагається `co-allocate` обрані ресурси у співпраці з другорядними RMS (resource managers), що управляють локальними інформаційними ресурсами певної території.

GRC повертає результати спільного розподілу, чи вдалося ресурсна процедура `co-allocation` чи ні, для користувача. Якщо це не вдалося, користувач повторно подати заявку з оновленими потребами для ресурсів. Розглянуті алгоритми мають свої переваги та недоліки у використанні. Вимоги кожного сервіса до передачі даних у мережі відрізняються, тому доцільно використовувати для кожного сервісу свій алгоритм резервування ресурсів мережі.

Система масового обслуговування

Дослідження складних систем передбачає побудову абстрактних математичних моделей, представлених мовою математичних відношень у термінах певної математичної теорії, що дозволяє одержати функціональні залежності характеристик досліджуваної системи від параметрів. При цьому багато моделей реальних систем будуються на основі моделей масового обслуговування (ММО), які діляться на базові моделі у вигляді систем масового обслуговування і мережеві моделі у вигляді мереж масового обслуговування.

У роботі система масового обслуговування розглядається як прототип системи для розвантаження опорної мережі стільникового оператора.

Система масового обслуговування — математичний (абстрактний) об'єкт, що містить один або декілька засобів (каналів), що обслуговують заявки, які надходять до накопичувача, у якому знаходяться заявки, що створюють чергу і очікують обслуговування. Сукупність заявок, розподілених у часі, створюють потік заявок. Кількість місць для очікування в накопичувачі визначає ємність накопичувача.

Сукупність подій розподілених у часі називається *поток*. Для описання потоку заявок, у

загальному випадку, необхідно задати інтервали часу $\tau_k = t_k - t_{k-1}$ між сусідніми моментами t_{k-1} і t_k надходження заявок з порядковими номерами $(k-1)$ і k відповідно ($k = 1, 2, \dots$; $t_0 = 0$ — початковий момент часу).

Основною характеристикою потоку заявок є його інтенсивність λ — середнє число заявок, що проходять через деяку межу за одиницю часу. Величина $\alpha = 1/\lambda$ визначає середній інтервал часу між двома послідовними заявками.

Потік, у якому інтервали часу τ_k між сусідніми заявками приймають певні наперед відомі значення, називаються *детермінованим*.

Якщо при цьому інтервали однакові ($\tau_k = \tau$ для всіх $k = 1, 2, \dots$), то потік називається *регулярним*.

Для повного опису регулярного потоку заявок досить задати інтенсивність потоку λ або значення інтервалу $\tau = 1/\lambda$. Потік, у якому інтервали часу τ_k між сусідніми заявками являють собою випадкові величини, називається *випадковим*. Для повного опису випадкового потоку заявок необхідно задати закони розподілу $A_k(\tau_k)$ усіх інтервалів (τ_k $k = 1, 2, \dots$).

Інтервали часу τ між заявками в найпростішому потоці розподілені за експоненціальним законом з функцією розподілу $A(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}$, де $\lambda > 0$ — параметр розподілу, що являє собою інтенсивність потоку заявок.

Найпростіший потік часто називають пуассонівським, оскільки число заявок k , що надходять за певний заданий проміжок часу t , розподілено за законом Пуассона:

$$P(k, t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t},$$

де $P(k, t)$ — імовірність надходження дорівнює k заявок за деякий фіксований інтервал часу t .

Тут k — дискретна випадкова величина, що приймає цілочислові значення: $k = 1, 2, \dots$, а t і $\lambda > 0$ — параметри закону Пуассона.

Тривалість обслуговування — час знаходження заявки в приладі — у загальному випадку величина випадкова і описується функцією $B(\tau)$ або щільністю $b(\tau) = B(\tau)$ розподілу. У випадку неоднорідності навантаження тривалості обслуговування заявок різних класів можуть відрізнятися законами розподілу або тільки середніми значеннями.

Часто тривалість обслуговування заявок припускається розподіленою за експоненціальним законом, що суттєво спрощує аналітичні виклад-

ки. Це зумовлено тим, що процеси, які протікають у системах з експоненціальним розподіленням інтервалів часу, є марковськими.

Величина, зворотна середній тривалості обслуговування b , характеризує середнє число заявок, які можуть бути обслуговувані за одиницю часу, і називається інтенсивністю обслуговування: $\mu = 1/b$. Для визначення середніх значень характеристик обслуговування часто досить задати, крім математичного очікування b , другий момент розподілу (дисперсія) або коефіцієнт варіації v_b тривалості обслуговування.

Час T_0 , що залишився до завершення обслуговування заявки, яка знаходиться в приладі, від моменту надходження деякої заявки в систему, і враховуючи, що на момент надходження в системі може і не виявитися заявок, тобто враховуючи просту систему, називається часом до обслуговування.

Математичне очікування даного часу:

$$M(T_0) = \frac{\lambda b^2 (1 + v_b^2)}{2},$$

де λ — інтенсивність найпростішого потоку заявок, що надходять в систему.

Для математичного описання дисципліни обслуговування зі змішаними пріоритетами використовується матриця пріоритетів (МП), яка являє собою квадратну матрицю:

$$Q = [q_{ij} | i, j = 1, \dots, H],$$

де H — число класів заявок, що надходять в систему.

Елемент q_{ij} матриці задає пріоритет заявок класу i відносно до заявок класу j і може приймати п'ять значення:

- 0 — немає пріоритету;
- 1 — пріоритет відносний (ПВ);
- 2 — пріоритет абсолютний (АП).

Елементи МП повинні задовольняти такі вимоги:

- $q_{ij} = 0$, оскільки між заявками одного і того ж класу не можуть бути встановлені пріоритети;
- якщо $q_{ij} = 1$ або 2, то $q_{ji} = 0$, оскільки якщо заявки класу i мають пріоритет до заявок класу j , то останні не можуть мати пріоритет до заявок класу i ($i, j = \overline{1, H}$).

Залежно від можливості зміни пріоритетів у процесі функціонування системи пріоритетні дисципліни буферизації і обслуговування поділяються на два класи:

- зі статичними пріоритетами, які не змінюються з часом;
- зі динамічними пріоритетами, які можуть змінюватися в процесі функціонування системи залежно від різних факторів, наприклад, при досягненні деякого критичного значення довжини черги заявок якого-небудь класу, що володіє низьким пріоритетом, їй може бути наданий більш високий пріоритет.

Балансування навантаження в мережі

Розробка методу балансування навантаження в мережі стільникового оператора буде основана саме на застосуванні системи масового обслуговування. Балансування навантаження — здатність маршрутизатора розподіляти трафік по всім мережевим портам, які знаходяться на однаковій відстані від отримувача.

В алгоритмах розподілення навантаження використовується інформація про пропускну здатність і надійність каналів. Розподілення навантаження підвищує інтенсивність використання мережесегментів, а значить і ефективну пропускну здатність мережі в цілому. Розрізняють статичне і динамічне балансування навантаження. У випадку використання статичного балансування пропорції розподілення навантаження не змінюються під час роботи маршрутизатора. Такий підхід є досить простим, але малоефек-

тивним, доцільно використовувати динамічне балансування, яке передбачає перерозподіл навантаження під час роботи.

Основною складністю у вирішенні поставленої задачі є те, що за умови різної вартості маршрутів складно досягнути виконання вимог стосовно якості обслуговування. Також потрібно пам'ятати, що мережа являє собою складний розподілений об'єкт, передбачити поведінку якого в наступний момент часу не є можливим. У більшості випадків гарантована якість обслуговування може бути забезпечена тільки при виділенні віртуального каналу, який передбачає наявність одного маршруту з показниками продуктивності, які вимагаються.

У подібних умовах виникають ситуації, коли альтернативні маршрути будуть недовантажені, а забезпечити рівномірне завантаження мережі можливо буде лише пакетами, які не будуть чутливі до параметрів якості обслуговування.

Основними відмінностями даного методу від більшості існуючих є те, що він динамічний, а також дозволяє розподіляти навантаження в залежності від стану каналів між альтернативними маршрутами з різною вартістю.

Процес маршрутизації з врахуванням методу БН за маршрутами з різною вартістю зображений на рис. 1.

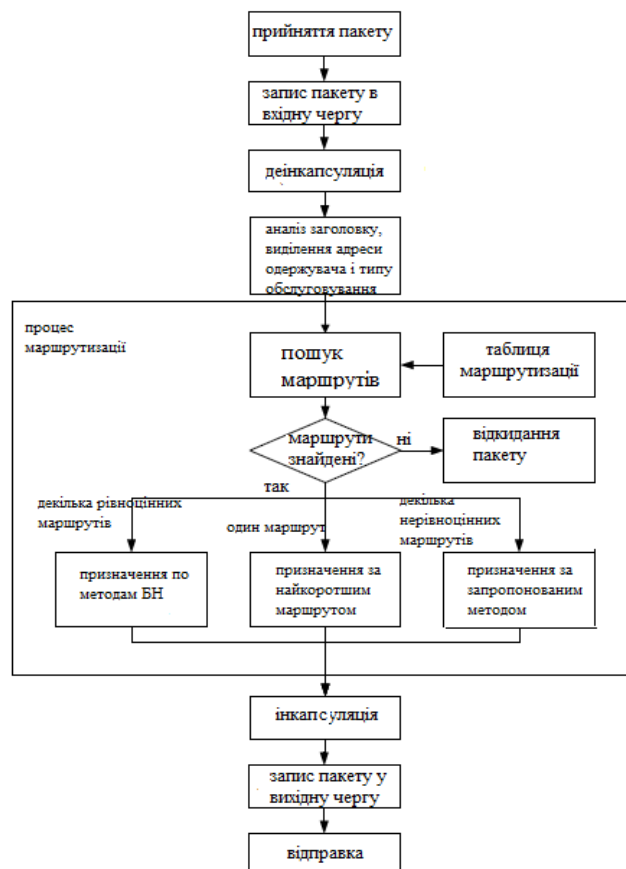


Рис. 1. Процес маршрутизації з урахуванням БН

Для ефективного дослідження і вирішення поставленого завдання розподілення (балансування) навантаження, важливо адекватно математично описати роботу маршрутизатора. Така математична модель повинна відображати функціональну сторону роботи маршрутизатора, а для прийняття рішень по управлінню має бути підкріплена інформацією про структуру і функціонування мережі.

По суті маршрутизатор представляє собою накопичувач з набором входів, через які надходить трафік, і набором виходів, через які трафік пересилається до наступних мережевих пристроїв. Тому модель маршрутизатора будемо розглядати як динамічну систему.

Моделювання процесу розвантаження мережі

Розглянемо навантаження мережі на прикладі найпростішої моделі масового обслуговування M/M/1, тобто одно каналної СМО з накопичувачем необмеженої ємності, у яку надходить неоднорідний потік заявок з експоненціальним розподіленням інтервалів часу між послідовними заявками (найпростіший потік) і експоненціальною тривалістю обслуговування заявок у пристрої. Побудуємо СМО з неоднорідним потоком заявок, у яку надходять H класів заявок з інтенсивностями $\lambda_1, \dots, \lambda_H$, графік розподілу яких зображено на рис. 2 та середніми тривалостями обслуговування b_1, \dots, b_H з урахуванням навантаження, що створюється заявками класу i : $y_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} = \lambda_i b_i$ (рис. 3).

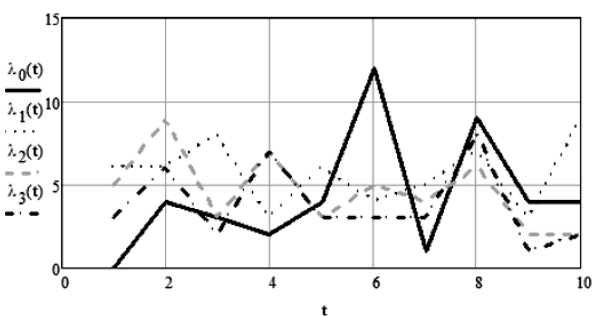


Рис. 2. Інтенсивність заявок залежно від часу

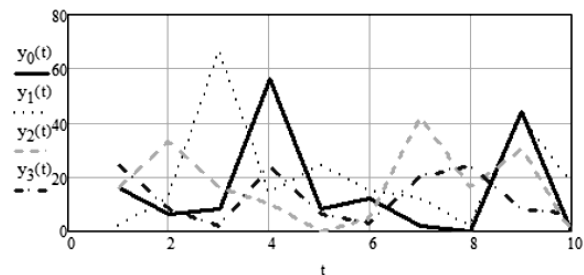


Рис. 3. Тривалість обслуговування заявок у різні проміжки часу

Ураховуючи ймовірність обслуговування заявки $\pi_{0i} = (1 - \pi_{ni})$ розраховуємо інтенсивність потоку обслужених заявок (продуктивність по i -у класу заявок): $\lambda_{0i} = \pi_{0i} \lambda_i = (1 - \pi_{ni}) \lambda_i$ (рис. 4).

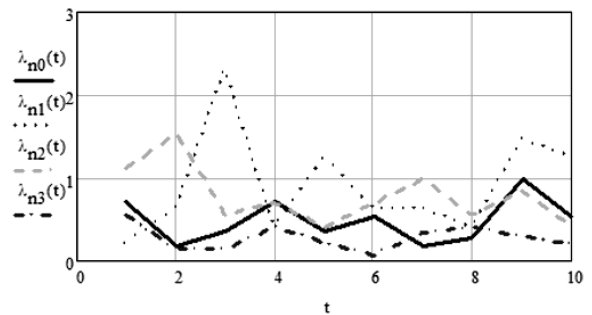


Рис. 4. Інтенсивність потоку обслуговуваних заявок

Завантаженість системи, створена заявками класу i : $\rho_i = \min\left(\frac{(1 - \pi_{ni}) y_i}{K}; 1\right)$ зображена на рис. 5

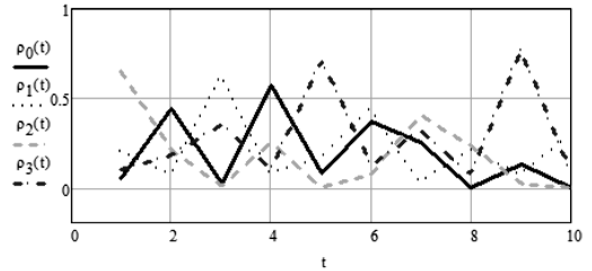


Рис. 5. Завантаженість системи

Рис. 6 демонструє завантаженість системи, створена заявками класу i : $\rho_i = \min\left(\frac{(1 - \pi_{ni}) y_i}{K}; 1\right)$ після оптимізації перерозподілу потоків трафіку.

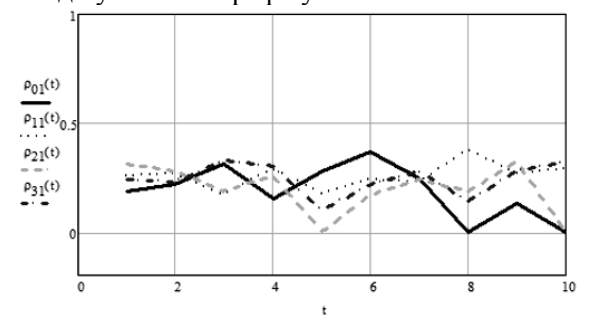


Рис. 6. Завантаженість системи після оптимізації

Висновок

Архітектура мережі LTE розроблена таким чином, щоб забезпечити підтримку пакетного трафіку з так званою «безшовною» (seamless) мобільністю, мінімальними затримками доставки пакетів і високими показниками якості обслуговування.

Тому важливим завданням було дослідити алгоритми резервування ресурсів та методи

перерозподілу потоків трафіку опорної мережі стільникового оператора.

У результаті було доведено те, що розглянуті алгоритми мають свої переваги та недоліки у використанні, а вимоги кожного сервісу до передачі даних у мережі відрізняються, тому доцільно використовувати для кожного сервісу свій алгоритм резервування ресурсів мережі.

Крім того, було досліджено завантаженість системи на основі найпростішої моделі масового обслуговування М/М/1, тобто одно каналної СМО з накопичувачем необмеженої ємності. Отримані результати показують, що застосування динамічних моделей балансування навантаження дозволяє досягнути більш збалансованого розподілу трафіку по всій мережі і відповідно більш високих показників продуктивності.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Особливості застосування генетичного алгоритму балансування навантаження в мережі* / С. Д. Погорілий, Р. В. Білоус // Проблеми програмування. — 2012. — № 2–3. — С. 85–92.
2. *Метод балансування абонентського навантаження мережі коміркового зв'язку* / Р. І. Бак, І. Б. Чайковський, Р. А. Бурачок // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. — 2013. — № 766. — С. 110–115.
3. *R. Gandhi, H. H. Liu, Y. C. Hu, G. Lu, J. Padhye, L. Yuan, and M. Zhang. Duet: Cloud scale load balancing with hardware and software.* In Proceedings of SIGCOMM, 2014.
4. *Daniel E. Eisenbud, Cheng Yi, Carlo Contavalli, Cody Smith, Roman Kononov, Eric Mann-Hielscher, Ardas Cilingiroglu, Bin Cheyney, Wentao Shang, Jinnah Dylan Hosein: Maglev: A Fast and Reliable Software Network Load Balancer.* <http://static.googleusercontent.com/media/research.google.com/ru/pubs/archive/44824.pdf>
5. *Wenhao Lin, Richard S. Wolff, Brendan Mumei: A Markov-Based Reservation Algorithm for Wavelength Assignment in All-Optical Networks.* Journal of lightwave technology, vol. 25, no. 7, July 2007, 1676-1683.
6. *A. Kalia, D. Zhou, M. Kaminsky, and D. G. Andersen. Raising the bar for using gpus in software packet processing.* In Proceedings of NSDI, 2015.
7. *V.K. Garg: Wireless Communications and Networking,* Elsevier Morgan Kaufmann, San Francisco, California, USA, 2007.
8. *В. О. Тухвинский, С. В. Терентьев, А. Б. Юрчук: сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура.* — М. : Эко-Трендз, 2010. — 284 с.
9. *3GPP TS 36.300, V8.6.0, "UTRAN and E-UTRAN overall description, stage 2"*, September 2008.
10. *Website of J'son & Partners Consulting — Backhaul networks for broadband mobile communication:* http://www.json.ru/en/poleznye_materialy/free_mark_et_watches/analytics/transportnye_seti_backhaul_dlya_setej_shirokopolosnoj_mobilnoj_svyazi_tendenci_i_ili_perspektivy_razvitiya_v_rossii_i_v_mire/, 14.10.2016.
11. *Shakil Akhtar 2G-5G Networks: Evolution of Technologies, Standards, and Deployment.* — 2010.
12. *Website of Sun microsystems — Advance Reservation:* <https://docs.oracle.com/cd/E19279-01/820-3256-12/AR.html>, 16.10.2016.
13. *Vincent Chi Chiu Wong: Lightpath Routing and Resource Resewation — An Integrated Solution for IP over DWDM Networks.* Bibliographic Services, 2001.
14. *Le Nguyen Binh: Routing and Wavelength Assignment in GMPLS-based 10 Gb/s Ethernet Long Haul Optical Networks with and without Linear Dispersion Constraints.* I. J. Communications, Network and System Sciences, 2008, 2, 105-206.
15. *Eitan Frachtenberg, Uwe Schwiegelshohn: Job Scheduling Strategies for Parallel Processing.* 15th International Workshop, JSSPP 2010, Atlanta, GA, USA, April 23, 2010, Revised Selected Papers.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2016