

СПРОЩЕНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ НАВАНТАЖЕННЯ В ЗАМКНЕНІЙ МЕРЕЖІ КОМУТАЦІЇ ПАКЕТІВ

Анотація. Розвинуто підхід до спрощеного імітаційного моделювання навантаження мережі комутації пакетів. В основі імітаційного представлення мережних процесів спрощена математична модель мережі комутації пакетів, яка заснована на дискретизованому опису станів завантаження вузлів мережі і відповідає представленню поточного стану мережі в задачах управління її навантаженням. Зміни стану заповнення вузла моделюється як процес розмноження і загибелі і в повній моделі навантаження враховує два фактори змін: обмін вузла навантаженням з користувачами мережі і проходження через нього потоку транзитного навантаження. Для вивчення штучно виділена «частина процесу функціонування мережі» – запропоновано підхід до моделювання транзитного навантаження у замкненій за навантаженням мережі. Підхід дозволяє здійснювати суттєві спрощення і забезпечує нівелювання негативного впливу спрощень на «замкненість навантаження» (забезпечує правило незмінної кількості навантаження в замкненій мережі). Розроблена імітаційна модель, по перше, створює підґрунтя до вдосконалення повної моделі, а по друге, зручна для відпрацювання алгоритмів маршрутизації при аналізі їх з точки зору показників здатності «впливати» на навантаження у мережі. Отримані результати узагальнені, але увага акцентована на прикладі супутникових мережах комутації пакетів.

Ключові слова: навантаження мережі комутації пакетів, вузол мережі зв'язку, потоки навантаження, потік подій, імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Сучасний світ покривають мережі зв'язку з технічною комутації пакетів: вони розміщені у середині технічних об'єктів, реалізованих в єдиному конструктивному виконанні; забезпечують комунікації множини технічних пристроїв в невеликих просторових об'ємах; вони розповсюджені на відстані в декілька кілометрів, у сотні і тисячі кілометрів, огортають Землю, будучи розташовані по її поверхні і на навколоземних орбітах [1-4]. Одна з задач забезпечення ефективного функціонування мереж комутації пакетів – керування її навантаженням. Частина цієї задачі пов'язана з керуванням проходженням навантаження через вузол мережі (з керуванням порядком

обробки навантаження вузлом мережі), яке може враховувати мережний рівень пріоритету навантаження, локальний рівень його пріоритету щодо порядку обробки у вузлі (який вузол може адаптивно змінювати) [5,6]. Друга частина цієї задачі пов'язана з керуванням даних, що передаються у мережі) [7,8].

В цій роботі зосередимо увагу на задачі маршрутизації даних. Ця задача вирішується вже багато десятків років, спирається на класичні методи і алгоритми маршрутизації [9], розвивається з врахуванням рівнів пріоритетності навантаження [10,11], забезпечує доповнення «простих» алгоритмів (можна говорити – класичних) застосуванням алгоритмів штучного інтелекту [12-14]. На сьогодні багато мереж зв'язку з технікою комутації пакетів можна розглядати як великі, розподілені системи зі складними процесами функціонування. Зараз (і, здається, на далі) ефективне і, головне, високо надійне функціонування великих складних систем можна уявляти собі на основі множини «простих» протоколів функціонування, які складуть остов функціонування таких систем. Штучний інтелект займе в таких системах своє місце, стане відігравати вагому роль в задачах управління процесами функціонування, але буде ефективним доповненням (вагомою частиною), що забезпечує «тонке налаштування» системи на «індивідуальні» особливості кожного з її елементів і до ситуацій, які в ній створюються. Застосування алгоритмів штучного інтелекту дозволить підвищити ефективність «простих» алгоритмів, вдосконалить застосування «звичайних» протоколів. Але розвиток підходів, методів, алгоритмів, які лежать в основі «простого протокольного» управління мережними процесами залишається актуальним.

Сучасне керування процесами маршрутизації даних здебільшого засновано на застосуванні маршрутних таблиць і алгоритмів вибору шляху найменшої вартості, на основі яких ці таблиці побудовані. Таким чином, в реалізації задачі маршрутизації можна побачити дві складові [7-9]. Перша складова – це застосування алгоритмів вибору шляху найменшої вартості, які реалізуються при визначеному за прийнятими правилами стану мережі (зокрема, при визначених вартостях елементарних ліній зв'язку, які поєднують суміжні вузли мережі). Друга складова керування маршрутизацією даних у мережі полягає у реалізації правил представлення спрощеного дискретизованого визначення стану мережі у числових значеннях, які виражають опосередковану оцінку тих факторів, які потребують зміни впливом керування (зокрема – правил призначення вартостей елементарним лініям зв'язку). Цей комплекс правил часто може передбачати його адаптацію до поточного стану мережі. У глибинній, фунда-

ментальній основі керування навантаженням мережі лежить саме такий комплекс правил. Серед методів управління навантаженням у мережі комутації пакетів може бути виділення груп вузлів, для яких при побудові ними їх маршрутних таблиць правила призначення вартостей елементарних ліній зв'язку відрізняються від правил, які застосовують для цього інші вузли [6,15,16]. Також існують і інші підходи.

Враховуючи, відзначену вище необхідність здійснювати розвиток «простих» алгоритмів керування мережними процесами, розвивати їх як базову основну частину керування навантаженням мережі, повернемося до розгляду невивчених аспектів маршрутизації в найпростішому варіанті представлення в мережі комутації пакетів. Розглянемо однорангову мережу навантаження без розділення навантаження за класами пріоритетів. Всі вузли цієї мережі, вирішуючи задачу маршрутизації, «бачать» єдину мережу (використовують при маршрутизації одні й ті самі правила призначення вартості). Відзначимо, що правила призначення вартостей елементарним лініям зв'язку мають спільні риса, але й завжди налаштовані на тип конкретної мережі. Тому, розглядаючи узагальнені, глобальні аспекти, все ж таки виділимо клас мереж, яким приділяється увага. Це мережі, розповсюджені великою територією, представлені вузлами, які вирішують задачу передачі даних і є одночасно маршрутизаторами. У загальному випадку вузли рухомі, довжина кожного елементарного відрізка шляху у мережі (довжина лінії зв'язку між суміжними вузлами) – динамічна величина. Також приймемо, що передача між суміжними вузлами дуплексна, тому між парою вузлів фактично існує дві лінії зв'язку, за якими передача даних ведеться у протилежному напрямку (рис. 1а). І в цьому випадку кожній з протилежно спрямованих ліній може бути призначена своя вартість. Типовим представником такої мережі є супутникові мереж комутації пакетів, в яких космічний апарат (він являє собою вузол мережі), встановлює зв'язки з декількома космічними апаратами в його оточенні (зокрема, як показано на рис. 1б, такі: з декількома космічними апаратами в одному з ним угрупованні, які розташовані на одній з ним номінальній орбіті попереду і позаду нього; в сусідніх орбітальних площинах ліворуч і праворуч від його орбітальної площини; з космічними апаратами більш високих і більш низьких угруповань) [8,17,18]. Мережа наземна і на декількох орбітальних угрупованнях в космосі показана на рис. 2в.

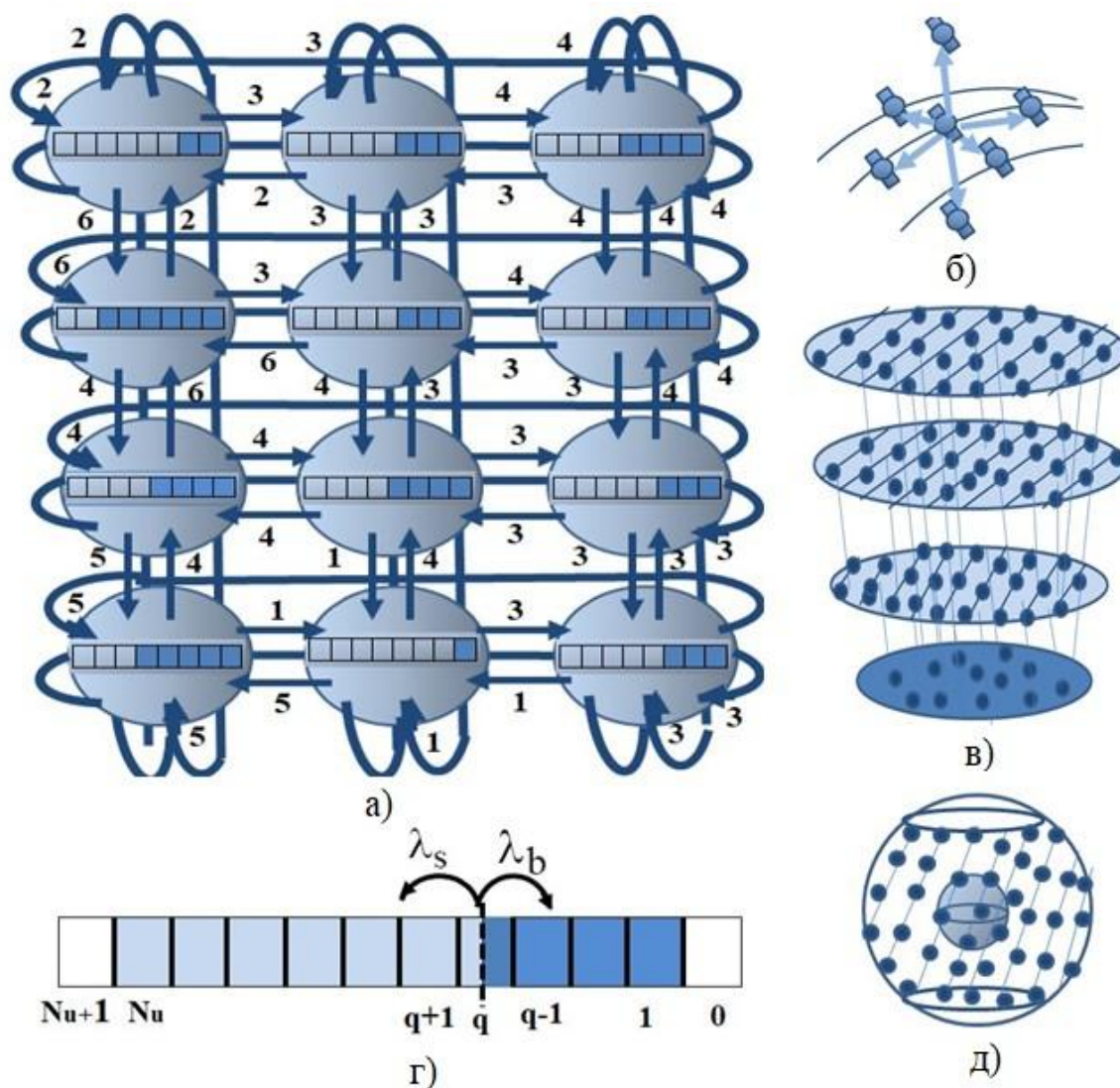


Рисунок 1 – До представлення мережі комутації пакетів (на прикладі супутникової мережі): навантаження у вузлах топологічно замкненої мережі (а); побудова мережі на основі зв'язків між космічними апаратами (б); схематичне представлення мережі на основі наземної складової і декількох різновисоких орбітальних угруповань космічної складової (в); схематичне представлення стану заповнення накопичувача вузла мереж (г); супутникова мережа на основі угруповання космічних апаратів на одній висоті (д)

Багато підходів до управління навантаженням у мережі засновані на формуванні формули вартості елементарної лінії зв'язку. В багатьох випадках саме ці формули являються важелем керування навантаженням. Здебільшого ці формули засновані на врахуванні часу, який інформація витрачає на рух між відправником і одержувачем. При цьому (напрямую або опосередковано) враховують фактори які впливають на цей час. Цими факторами є відстань між вузла-

ми та час, який блок інформації витрачає на проходження вузла мережі (цей час складається з часу проходження пустого вузла і часу затримки у очікуванні відправлення з вузла). Також в формулі вартості лінії можуть бути складові, які введені на основі врахування визначених перевантажених груп вузлів, або враховують розділення мережі за явно виділені частини (наприклад, такими частинами для супутникових мереж комутації пакетів можуть бути різновисокі угруповання – різновисокі сегменти мережі), та інші.

У формулі вартості елементарної лінії можуть бути враховані фактори, які не стосуються прямо часу, що витрачається на передачу. Такими факторами можуть бути рівень безпеки, рівень завадостійкості, тощо. Але найбільш вагомими в цілому залишаються динамічна відстань між вузлами мережі і динамічна характеристика часу проходження вузла мережі.

На сьогодні залишається актуальним питання визначення простих (базових) правил побудови формули, що враховує названі вище фактори. Розробка цих правил пов'язана з підходом до дискретизації величин, на яких будується формула, та визначення підходу до числового еквівалентного врахування поточних значень цих величин. Кінцевій кількості дискретних станів елементів системи, визначеній в результаті дискретизації, відповідає велика множина станів самої системи, які створюються на множини комбінацій станів елементів [8]. Керування, прив'язане до правил врахування поточних станів елементів, має ефективно впливати на оптимізацію процесів функціонування системи. Вирішення цієї задачі потребує моделей високого рівня спрощення, які зводять опис системи до застосування дискретизованих характеристик, яким відповідає множина її дискретизованих станів. Сфера застосування таких моделей охоплює як безпосередньо задачі управління, так і задачі проектного і дослідницького аналізу. В задачах проектного аналізу ці моделі безпосередньо використовуються або на початкових етапах, або входять як складова до моделей «комбінованої точності» [18]. Розвитку моделей навантаження мережі комутації описаного вище рівню спрощення присвячена ця робота. Зокрема, вдосконалюється модель, представлена в роботах [8,18]. З двох названих найважливіших складових в управлінні потоками навантаження в мережі приділимо увагу тій, що пов'язана з часом проходження інформацією через вузли мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні моделі, які описують навантаження мережі комутації пакетів можна розділити на два великих класи [9,18]. В моделях першого класу (моделях «високої точності») моделювання здійснюється «з точністю до блоку даних» (пакету): моделюється

входження кожного пакету у мережу, його розмір, адресація і поточний шлях. Моделі другого класу в базовій основі мають запропоноване Л. Клейнроком спрощення про зміну розміру пакету в кожному вузлі на його шляху (за правилами, визначеними відповідною статистичною моделлю) [9]. При такому спрощенні можливий перехід до моделювання потоків навантаження (перехід до потокових моделей). Потокових моделей багато, їх також можна класифікувати, вони активно розвиваються [11].

В багатьох випадках можна говорити, що в потоковій моделі реалізується «наскрізне представлення» потоків через мережу та враховуються їх суперпозиції. Але можливий підхід максимального рівня спрощення, коли у кожному j -у вузлі в простіший спосіб моделюються дві складових навантаження: потоки обміну навантаженням з користувачами та потоки обміну транзитним навантаженням. Вводиться припущення, що всі потоки пуассонівські. Для кожного з вузлів j можна говорити про потоки вхідного і вихідного навантаження взаємодії з користувачами (з параметрами Λ_{cbj} і Λ_{csj} відповідно) і про потоки вхідного і вихідного транзитного навантаження (з параметрами Λ_{tbj} і Λ_{tsj} відповідно).

При моделюванні потоків навантаження взаємодії з користувачами максимально спрощений підхід не враховує проходження цього навантаження через мережу [8]. Вважається, що все, що увійшло до мережі, виходить з неї. Враховується розділення території, від якої іде навантаження користувачів, на фрагменти (тут будемо враховувати тільки земних користувачів, тобто наземних і авіаційних, які знаходяться на якійсь території або, відповідно, над нею). Від кожного фрагменту (в багатьох випадках підходить визначення «стілнику») надходить відповідне навантаження з інтенсивністю Λ_{bk} . Задані незмінні на час моделювання ймовірності p_{kl} адресації навантаження від фрагменту території k до фрагменту території l . Режим функціонування мережі – установлений. Тому інтенсивність сумарного потоку, що увійшла до мережі з k -о фрагменту території, надає до сумарного потоку навантаження до l -о фрагменту території потік з параметром $p_{kl} \Lambda_{bk}$ (тобто параметр потоку вихідного навантаження на l -й території Λ_{ls} визначається формулою $\Lambda_{ls} = \sum_{k=1}^{N_g} p_{kl} \Lambda_{bk}$, де N_g –

кількість фрагментів території). В залежності від того, на якій території (а для супутникових мереж – над якою територією) знаходиться вузол (група вузлів), моделюється вхідне навантаження з цієї території до цього вузла (вузлів). Мо-

делювання транзитного навантаження може бути засновано на прийнятті припущення, що всі вузли настільки заповнені, що з вузла постійно виходить навантаження з параметром $\Lambda_b = \text{const}$, тобто $\Lambda_{tsj} = \Lambda_b$. Враховуючи розподіл транзитного вихідного навантаження на напрямки, для кожного j -о вузла знаходиться транзитне вхідне навантаження Λ_{tbj} .

При описаному підході до моделювання навантаження з виділенням навантаження взаємодії з користувачами і транзитного навантаження маємо дві частини, дві складових моделі, які доволі відокремлені одна від одної (і можуть на початку аналізу розглядатися окремо одна від одної, забезпечуючи можливість «розшарування задачі»). Але ці дві частини при їх спільному врахуванні при моделюванні мережі тісно пов'язані між собою через стани завантаження вузлів, які враховуються при моделюванні розподілу транзитного навантаження [8]. В даній роботі буде розглянута тільки складова, що стосується моделювання транзитного навантаження. Зокрема, приділяється увага усуненню проблеми, яка виникає при моделюванні транзитного навантаження на основі описаного вище підходу.

Проблема в тому, що при невеликому заповненні мережі на деяких інтервалах часу вузол буває пустим, або заповненим настільки мало, що вихід з нього навантаження відбувається з параметром $\Lambda_{tsj} < \Lambda_b$. Тоді описаний підхід до моделювання призводить до «утікання» навантаження з мережі (до втрати «модельного» навантаження), викликає в моделі порушення правила збереження навантаження, яке має бути на рівні кожного з вузлів (скільки навантаження увійшло до вузла, стільки й має вийти, якщо модель не відтворює втрат, які виникають з технічних проблем функціонування мережі). Цю неточність моделювання можна більш явно бачити, якщо у повній моделі мережі «виділена частина», що представлена тільки рухом транзитного навантаження у замкненій мережі (відбувається зменшення повного навантаження в мережі внаслідок неточності моделі). Це відома проблема відомого підходу до моделювання транзитного навантаження. Вирішення цієї проблеми пропонується з врахуванням підходу до виразу параметрів потоків вхідного і вихідного навантаження через стан вузлів мережі, описаний в роботах [8,18] та інших.

Мета дослідження. Розвиток максимально спрощених моделей мереж комутації пакетів, які засновані на дискретизованому опису станів завантаження вузлів мережі і відповідають представленню стану мережі в задачах управління її навантаженням в процесі функціонування. Задача вирішується в

узагальненій постановці, але увага акцентована на випадку використанні цієї моделі при створенні і експлуатації супутникової мережі комутації пакетів.

Викладення основного матеріалу.

1. Постановка задачі. Розглядається мережа, в якій n вузлів (тут вважаємо, що вузли однотипні, але задача може бути розвинута і для наявності у мережі груп вузлів, для яких низка характеристик буде відмінною. Відстані між вузлами мережі (тобто, час на передачу інформації між вузлами) тут враховувати не будемо. Станемо враховувати тільки навантаження у вузлах мережі. Візьмемо за основу моделювання мережі підхід, заснований на виділенні дискретних станів заповнення накопичувача вузла мережі і трактування їх як станів, в якому знаходиться вузол [8]. Обсяг накопичувача кожного j -го вузла розділений на N_u рівні. Номер рівню q_j , що заповнюється в накопичувачі j -го вузла, назовемо станом вузла. Таким чином, кількісне значення q (q_j для j -го вузла) може бути в діапазоні від 0 (повністю пустий вузол), до $(N_u + 1)$ (вузол у стані блокування), таким чином $q = \overline{0, (N_u + 1)}$. Згідно [8] вважаємо, що моделюється зміна стану вузла, яка відбувається як процес розмноження і загибелі (перехід зі стану q можливий тільки до сусідніх станів $(q - 1)$ і $(q + 1)$ в межах діапазону значень $q = \overline{0, (N_u + 1)}$, інтервал часу між переходами між сусідніми станами має експоненціальний закон розподілу з параметром λ). Схематично стан вузла і схема переходів у сусідні стани його завантаження показана на рис. 2г. Тобто послідовність моментів часу зміни станів j -го вузла будемо розглядати як пуассонівський потік подій з параметром λ_j . Цей пуассонівський потік можна розкласти на чотири складові (чотири пуассонівських потоки подій): перші дві – це потоки змін завантаження вузла у більший і менший бік, що викликані взаємодією з користувачами (параметри цих потоків λ_{cbj} і λ_{csj} відповідно); другі два – це потоки змін завантаження вузла у більший і менший бік, спричинені рухом через вузол транзитного навантаження (параметри цих потоків λ_{tbj} і λ_{tsj} відповідно).

Параметри названих потоків ($\lambda_j, \lambda_{cbj}, \lambda_{csj}, \lambda_{tbj}, \lambda_{tsj}$) будемо виражати в кількості змін станів заповнення накопичувача вузла на одиницю часу. Можна, підібравши правильний еквівалент, виразити параметри навантаження, що входить і виходить з вузла, в кількостях змін на одиницю часу числа заповнених рівнів накопичувача вузла, яке спричинено потоками цього навантаження. Зокрема – можна виразити у кількості змін стану заповнення накопичувача

(кількості змін стану заповнення вузла) на одинцю часу параметри Λ_{cbj} і Λ_{csj} , яке відповідно надходить і виходить з вузла внаслідок взаємодії з користувачами, і параметри Λ_{tbj} і Λ_{tsj} транзитного навантаження, яке відповідно входить і виходить з вузла. В цьому випадку параметри Λ_{cubj} , Λ_{csj} , Λ_{tbj} , Λ_{tsj} будуть аналогами параметрів λ_{cbj} , λ_{csj} , λ_{tbj} , λ_{tsj} . Як було запропоновано вище, станемо розглядати одну складову процесу зміни стану завантаження вузла мережі – зміни стану вузла, спричинені транзитним навантаженням (тобто, пуассонівські потоки з параметрами λ_{tbj} , λ_{tsj}). Вважатиме, що при значеннях стану завантаження вузла $q = \overline{q_m, (N_u + 1)}$ транзитне навантаження виходить з j -го вузла з незмінною максимальною інтенсивністю (параметр потоку навантаження, яке виходить з вузла, $\lambda_{tsj} = \lambda_b$, $\lambda_b = \text{const}$). Якщо стан вузла $q < q_m$ (підхід до визначення q_m буде сформульований далі), то значення параметра вихідного навантаження λ_{tsj} буде у межах $0 \leq \lambda_{tsj} < \lambda_b$.

Прийнято, що правила призначення вартості елементарної лінії зв'язку враховують навантаження вузла, до якого вони ведуть, зокрема – дорівнюють кількості заповнених рівнів накопичувача (можуть також розраховуватися як пропорційна величина, прив'язана до цієї кількості за введеною формулою). Зв'язок дуплексний, і лінії зв'язку між суміжними вузлами, протилежно спрямовані, у загальному випадку мають різні вартості (рис. 2а). Маршрутизація таблична. В основі розрахунку маршрутних таблиць алгоритм вибору шляху най меншої вартості.

Будемо вважати, що мережа замкнена з точки зору відсутності обміну навантаженням з користувачами (навантаження не входить до мережі і не виходить з неї). Станемо розглядати окремий випадок мережі, яка топологічно замкнена (рис. 1а). Вибір для розгляду топологічно замкненої мережі на глобальний результат не вплине. Вибір цього окремого випадку продиктований тим, що топологічно замкнена мережа (тільки у іншому просторовому розташуванні її форми) зустрічається, наприклад, побудованою на угрупованні супутників на колових орбітах одної висоти (рис. 1д). В такій мережі наявні замкнені «кільця з ланцюжків вузлів» – пов'язані міжсупутниковими зв'язками космічні апарати на одній орбіті, а також встановлюються зв'язки між близькими вузлами в сусідніх ланцюжках вузлів – між космічними апаратами в сусідніх орбітальних площинах.

2.°Запропонований підхід до моделювання.

Моделювання події в системі. Згідно прийнятої математичної моделі мережі комутації пакетів при моделюванні відтворюються $2N$ потоків подій: для кожного j -го вузла з N вузлів мережі моделюється потік подій, які є послідовністю моментів часу переходів до сусідніх станів більшого заповнення його накопичувача, а також потік подій, що є послідовністю моментів часу переходів до сусідніх станів менших станів його заповнення. Ці потоки подій зв'язані між собою через параметри їх потоків, які визначаються на поточний момент часу через стан системи. Опис моделювання елементарної події приведено нижче.

Для кожного j -го вузла n -й момент зміни його стану у бік збільшення (момент t_{tbnj}), генерований після чергового відбуття цієї події на основі формули

$$t_{tbnj} = t_{tb(n-1)j} + \tau_{tbnj}, \quad (1)$$

а m -й момент зміни стану j -го вузла у бік зменшення (момент t_{tsmj}) генерований на основі формули

$$t_{tsmj} = t_{ts(m-1)j} + \tau_{tsmj}, \quad (2)$$

де $t_{tb(n-1)j}$ і $t_{ts(m-1)j}$ – попередні моменти відбуття відповідних подій, а τ_{tbnj} і τ_{tsmj} – генеровані тривалості інтервалів часу між відбуттям n -ї і $(n-1)$ -ї подій або m -ї і $(m-1)$ -ї подій відповідно. Тривалості інтервалів часу τ_{tbnj} і τ_{tsmj} генеруються як величини з експоненціальним законом розподілу з параметрами λ_{tbj} , λ_{tsj} відповідно. Далі поточний час t змінюється з невеликим кроком Δt (величина Δt не менш ніж на декілька порядків менша ніж величини τ_{tbnj} і τ_{tsmj}). Виконання умови $t \geq t_{tbnj}$ одзначає відбуття n -ї події, яка є збільшенням рівню завантаження вузла на одиницю (переходом зі стану q_j до стану $(q_j + 1)$), а виконання умови $t \geq t_{tsmj}$ одзначає відбуття події, яка є зменшенням рівню завантаження вузла на одиницю (переходом зі стану q_j до стану $(q_j - 1)$).

Моделювання реакції на подію в системі. Після відбуття будь якої з описаних подій моделюється «реакція» системи на подію, яка описана далі. Лінії, яка веде до вузла, що змінив стан, призначається нова відповідна вартість за правилом призначення вартостей лініям зв'язку. Після зміни вартості хоч одної

лінії у мережі здійснюється розрахунок нових значень маршрутних таблиць. Після розрахунку нових значень маршрутних таблиць для кожного вузла визначаються поточні значення параметрів потоків переходів стану завантаження вузла у більший, або менший бік – параметрів потоків λ_{tbj} , λ_{tsj} відповідно. І саме тут застосовуємо підхід, який надасть можливість уникнути «утікання навантаження».

Як зазначалося, при високому рівні заповнення мережі (випадки порожнього вузла, або частково заповненого першого рівня накопичувача зустрічаються з ймовірністю майже наближеною до нуля) можна вважати, що вузол віддає навантаження з незмінною максимальною інтенсивністю λ_b ($\lambda_{tsj} = \lambda_b$, де значення λ_b також виражено в кількості змін рівнів накопичувача на одиницю часу). Для забезпечення замкненості навантаження в моделі при різних рівнях завантаження мережі можна використати дуже грубий підхід, який для низки ситуацій є прийнятним і дасть просте вирішення проблеми. Вважатиме, що в мережі, замкненій з точки зору навантаження, на кожний момент розгляду сумарно виходить стільки навантаження, скільки сумарно входить. Так як розглядаються потоки транзитного навантаження, на будь який момент часу має

бути рівність $\sum_{j=1}^N \lambda_{tbj} = \sum_{j=1}^N \lambda_{tsj}$. При моделюванні забезпечимо це так.

На момент часу t (який вважається моментом відбуття події) знаходиться сума параметрів потоків S_{tb} , значення яких відповідали входженню навантаження у вузли мережі до моменту t (можна для визначеності записати – в момент $(t - \Delta t)$)

$$S_{tb} = \sum_{j=1}^N \lambda_{tbj}, \quad (3)$$

Знаходиться сума параметрів потоків максимального виходу з заповненого вузла $S_{t \max s}$

$$S_{t \max s} = N \lambda_b. \quad (4)$$

Визначається надлишковий вихід R як різниця значень S_{tb} і $S_{t \max s}$

$$R = S_{tb} - S_{t \max s}. \quad (5)$$

Ця різниця має бути розділена на кількість N_e вузлів ($N_e \leq N$), з яких виходить потік навантаження з параметром, меншим за λ_b . Вузли, які належать до названої групи з N_e вузлів, легко знайти, коли параметр потоку виражений

у кількості змін рівнів заповнення накопичувача. З j -го вузла буде виходити потік навантаження, менший за максимальний, якщо кількість q_j заповнених рівнів його накопичувача менша, ніж виходить з вузла у одиницю часу, тобто менша за значення λ_b ($q_j < \lambda_b$). Досить грубо будемо вважати, що корегування надлишкового виходу навантаження буде однаковим для всіх недовантажених вузлів. Для корегування будемо вважати, що з i -го недовантаженого вузла виходить навантаження з параметром λ_{tsi}

$$\lambda_{tsi} = \lambda_b - R / N_e \quad (6)$$

Узагальнено розрахунок параметрів вихідного навантаження можна представити так

$$\lambda_{tsj} = \begin{cases} \lambda_b, & \text{якщо } q_j > \lambda_b \\ \lambda_b - R / N_e, & \text{якщо } q_j \leq \lambda_b \end{cases} \quad (7)$$

Такий підхід забезпечує моделювання з невисокою адекватністю (моделювання тим грубіше, чим більша кількість вузлів N_e), але замкненість навантаження (коректність моделі) буде забезпечена.

Далі розглянемо підхід до розрахунку на момент t параметрів потоків навантаження λ_{tbj} . Вважатиме, що параметр потоку навантаження, яке входить до i -го вузла від j -го вузла можна записати так:

$$\lambda_{tbij} = k_{ji} \lambda_{tsj}, \quad (8)$$

де k_{ji} – частка найкоротших шляхів від j -го вузла у множині всіх інших найкоротших шляхах за всіма вихідними напрямками з цього вузла. Розраховується значення k_{ji} за формулою

$$k_{ji} = \frac{n_{ji}}{(N - 1)} \quad (9)$$

де $(N - 1)$ – кількість вузлів, до яких прокладені найкоротші шляхи (тут вважатиме, що це всі вузли мережі, відмінні від j -го вузла), а n_{ji} – кількість найкоротших шляхів через напрямок від j -го до i -го вузла.

Після визначення значень параметрів вхідних і вихідних потоків здійснюється моделювання моменту відбуття наступної події за формулою (1), або за формулою (2).

3.°Розрахунки і аналіз результатів

Деякі з розрахункових результатів, отриманих із застосуванням запропонованого підходу до збереження замкненості навантаження при введених

спрощення приведені далі. Розрахунки проводилися для відносно невеликої мережі (у порівняння із сучасними супутниковими мережами комутації пакетів), яка містить 400 вузлів. Вважалося, що мережа топологічно замкнена (як показано на рис. 1а), а також замкнена за навантаженням (на початок моделювання генерується навантаження у вузлах; вважається, що вхідне і вихідне навантаження відсутні; навантаження постійно «циркулює» в мережі, так як вузол має не затримувати його в собі, а передавати далі за прийнятими правилами його передачі). Кількість рівнів, на які розділений накопичувач вузла, – 25. Максимальна інтенсивність, з якою виходило б навантаження з вузла, якщо б вузол був постійно достатньо заповненим, – 1 зміна кількості заповнених рівнів накопичувача у одиницю часу (одиницю часу тут не виділяємо, параметри потоків виражені на одиницю часу). На рис. 2 показані результати моделювання мережі з високим рівномірним заповнення вузлів.

Зокрема, на початковий час моделювання генерація заповнення мереже здійснена на основі генерування кількості заповнених рівнів накопичувача як дискретної випадкової величини у діапазоні від 5 до 25 (мережа рівномірно заповнена, без перекосів флуктуацій навантаження). На кожному кроці моделювання розраховувалася середня навантаження в вузлах (середня кількість заповнених рівнів у вузлах мережі u_m), на графіку на рис. 2а за віссю абсцис приведений час t (одиниця часу не конкретизована, значення параметри потоків задаються у кількості змін на одиницю часу).

Вочевидь, для замкненою за навантаженням мережі це значення не має змінюватися. Але тут при прийнятому підході до моделювання можливі невеличкі відхилення навколо сталого значення. Особливість моделі в тому, що тут не моделюються «напрямку» переходи рівнів заповнення від одного вузла до інших по вихідним напрямкам (в цьому випадку сумарний і середній рівень заповнення вузлів мали би зберігатися незмінними протягом часу моделювання). В моделі забезпечена незмінність навантаження на рівні параметрів потоків (сума параметрів потоків вхідного навантаження дорівнює сумі вихідного навантаження і ці значення не змінюються). Але в кожному вузлі відповідно до поточних значень параметрів потоків моделюється випадковий процес зміни його стану (це дає невеличкі коливання навколо більш точного «каркасу», який задають значення параметрів потоків).

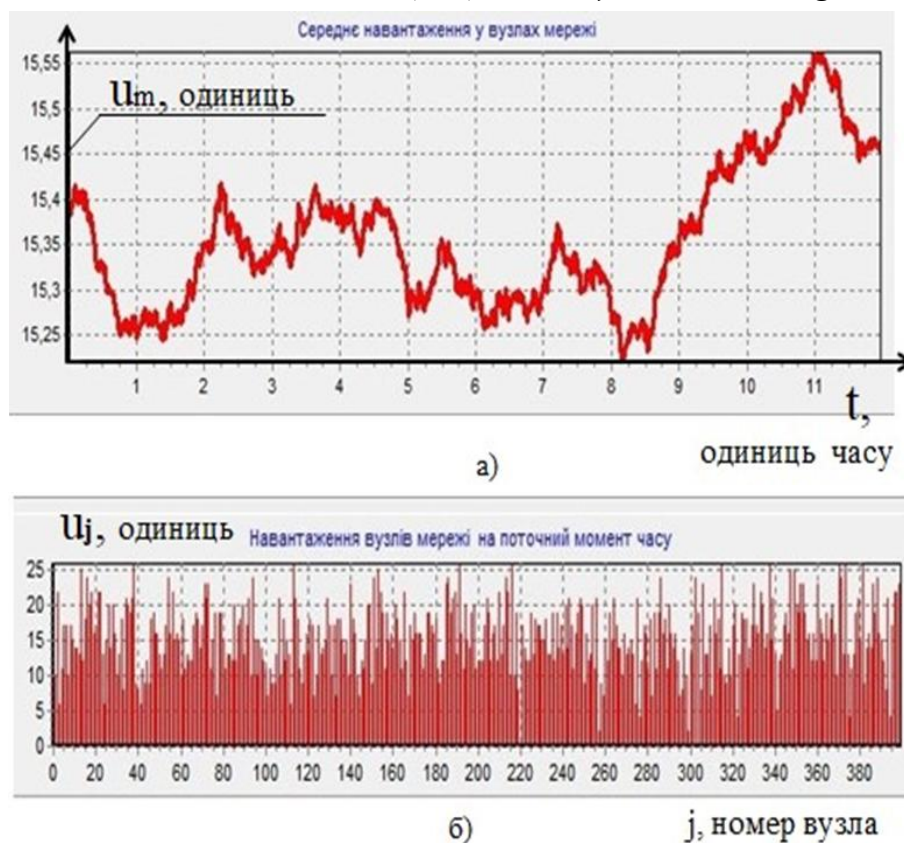


Рисунок 2 – Результати моделювання мережі з високим навантаженням: графік зміни середнього (модельного) навантаження у мережі (а); розподіл навантаження у мережі на кінець інтервалу моделювання

Саме випадковість цього процесу і дискретність зміни станів дає те, що графік не є гладким, присутність дрібних ривків. А більш розтягнуті у часі зміни, показані на графіку рис. 2а, пов'язані із випадковим процесом функціонування вузлів в купі з відбитком на цьому процесі дії «формули керування» навантаженням, яка обрана для завдання вартості лінії навантаження. Результати моделювання (для прикладу приведені на графіку рис. 2а для 12 годин моделювання) показують відсутність трендових змін середнього навантаження, коливання навколо середнього значення. Представлені результати показують зміни в межах 0,25 від одного рівня заповнення накопичувача. В цілому відхилення можуть бути в межах значення параметру потоку, заданого у кількості змін станів накопичувача у одиницю часу. Напис 2б приведений стан заповнення вузлів мережі на один з останніх моментів інтервалу моделювання,

На рис. 3 представлені результати моделювання мало заповненої навантаженням мережі, яке розподілено в мережі рівномірно (рис. 3а). Зокрема, стани заповнення накопичувачів вузлів мережі генеровані як дискретні випадкові

величини у діапазоні від 0 до 5. У цьому випадку також маємо збереження середнього навантаження (на графіку на рис. 3б).

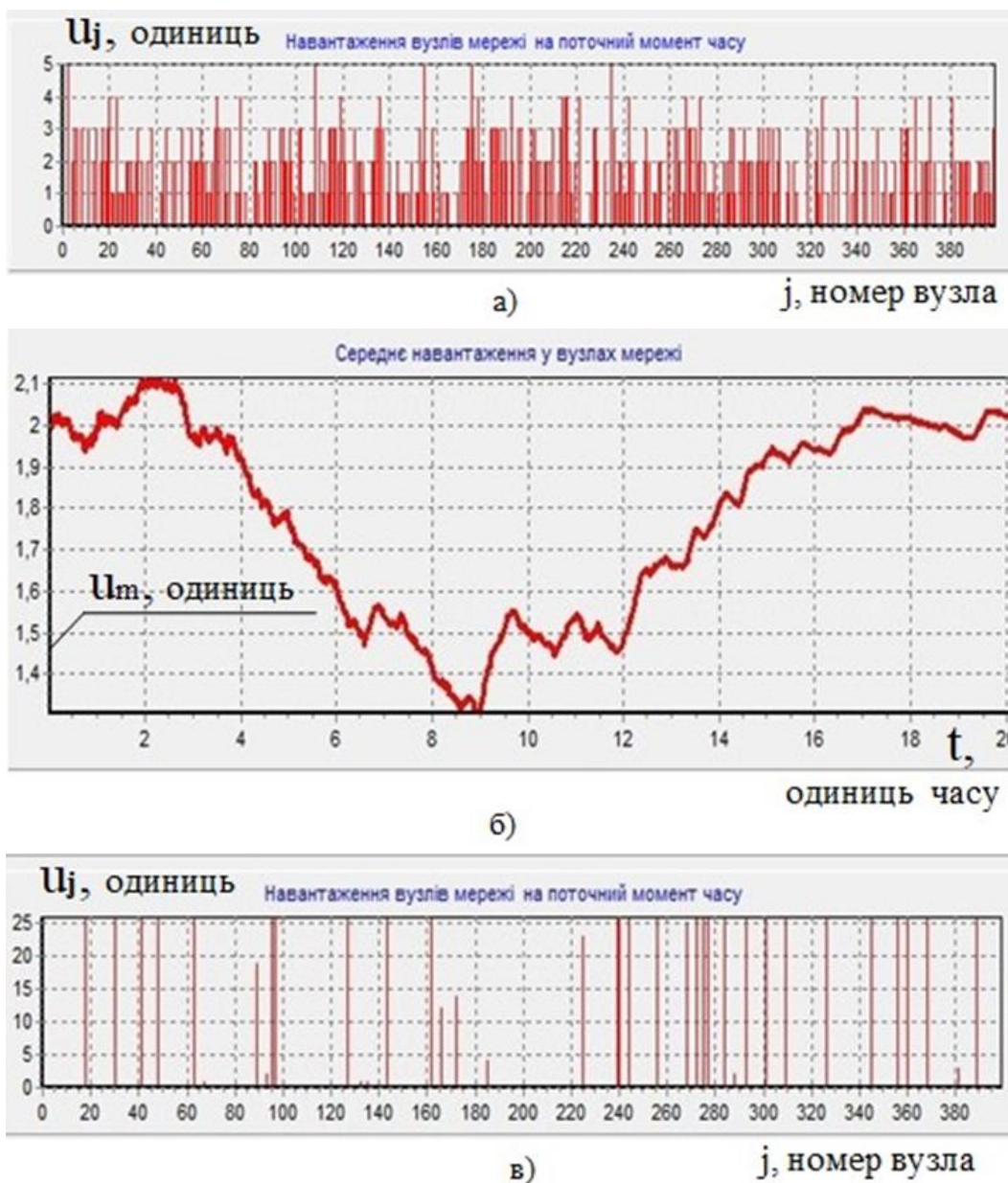


Рисунок 3 – Результати моделювання мало навантаженої мережі: розподіл навантаження у мережі на початок моделювання (а); графік зміни середнього (модельного) навантаження у мережі (б); розподіл навантаження у мережі на кінець інтервалу моделювання (в)

На рис. 3в показаний стан навантаження мережі на 20 годину моделювання. Це типова ситуація для випадку моделювання замкнутої мало заповненої мережі при застосуванні правил управління навантаження, які спрямовані тільки на заохочення обирати рух навантаження через менш заповнені вузли. Як можна бачити, алгоритм керування «обрав» за своїми правилами оптима-

льний стан мережі. За для досягнення «свого» оптимуму він просто «розклав» невеличке навантаження у невеликій групі вузлів, максимально заповнивши їх (вивів ці вузли зі складу мережі), а інші вузли залишилися майже пустими для руху ними навантаження. Але це в штучній ситуації замкненої мережі невеликого рівномірного заповнення, в якій за правилами мережі циркулює навантаження. Крім того, формули управління навантаженням у ідеально рівномірно заповненій мережі бажано не застосувати. В реальній мережі буде свій вхід і вихід навантаження, буде істотна нерівномірність навантаження і застосування правил керування навантаженням стане доцільним.

Дію правил керування навантаженням варто дивитися в замкненій мережі саме для вивчення здатності алгоритму долати суттєві нерівномірності (флуктуації, переколи навантаження). В даному випадку розрахунки приводилися лише з метою вивчення у штучно створеній ситуації замкненої мережі підходу до реалізації спрощеного моделювання без втрати цілісності навантаження.

Висновки. В роботі вдосконалена спрощена імітаційна модель мережі, яка заснована на дискретизованому опису станів навантаження вузлів мережі і відповідає представленню поточного стану мережі в задачах управління її навантаженням. Зокрема, штучно виділена «частина процесу функціонування мережі» – запропоновано підхід до моделювання транзитного навантаження у замкненій за навантаженням мережі. Запропонований підхід до моделювання дозволяє здійснювати суттєві спрощення і забезпечує нівелювання негативного впливу спрощень на «замкненість навантаження». Розвиток цього дослідження передбачає введення (не пряме, а з відповідними змінами) запропонованого підходу до збереження навантаження у повну спрощену модель мережі комутацій пакетів, яка враховує також обмін навантаженням з користувачами мережі. Крім того повна модель передбачає врахування відстані між вузлами мережі у формулі вартості елементарної лінії зв'язку. На сьогодні управління мережними процесами в системах, що створені на основі космічних апаратів, стає все більш актуальними. А також розвиваються потужні, оригінальні проекти (у тому числі, у нас в Україні [19]), які стосуються не тільки передачі даних із застосуванням супутникових систем, а перенесення обчислювальних операцій на орбіти. Реалізація цих проектів вже потребує управління навантаженням, які створюють обчислювальні задачі. Але задача керування навантаженням зв'язку залишається актуальною, так як в основі функціонування сучасних супутникових систем, в основі розвитку інтернет-технологій на Землі і

в космосі лежить застосування передачі інформації на основі техніки комутації пакетів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Barghash A., Hammad L., Gharaibeh A., Traditional vs. Modern Data Paths: A Comprehensive Survey / Ahmad Barghash, Lina Hammad, Ammar Gharaibeh // Computers 2022, 11(9), 132. <https://doi.org/10.3390/computers11090132>
2. Chiesa M., Kamisinski A., Rak J., Member S. A Survey of Fast-Recovery Mechanisms in Packet-Switched Networks / Marco Chiesa, Andrzej Kamisinski, Jacek Rak, Senior Member // IEEE Communication Surveys & Tutorials, vol. 23 Issue 2, second quarter 2021. DOI: 10.1109/COMST.2021.3063980
3. Weiwei Jang, Yafeng Zhan, Xiaolong Xiao, Guanglin Sha, Network Simulators for Satellite-Terrestrial Integrated Networks: A Survey // IEEE Xplore, Volume 11, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3313229
4. Лабуткина Т.В. Концепция спутниковой сети коммутации пакетов с наземным, авиационным и космическим пользовательскими сегментами. / Т.В. Лабуткина, А.В. Бабанина, Н.М. Сотничек, И.А. Саенко, А.В. Дымченко // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – 2017. – Т. XXII. – С. 66-84.
5. https://www.dnu.dp.ua/docs/zbirniki/ftf/program_5e47c02a5163b.pdf
6. Kozlovskiy V., Yakymchuk N., Selepyna Y., Moroz S., & Tkachuk A. Development of a modified method of network traffic forming. Informatyka, automatyka, pomiary w gospodarce i ochronie środowiska, 13(1), 2023, P. 50-53. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3452>
7. Лабуткина Т.В. Имитационная модель спутниковой сети коммутации пакетов кластерного типа. / Т.В. Лабуткина, И.А. Саенко // Матеріали Тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції Перспективи телекомунікацій, 15-19 квітня, 2019, Київ, Україна. – С. 33-35.
8. Албул А.С. Обоснование модели маршрутизации для многоспутниковых LEO систем высокоскоростной передачи данных. / А.С. Албул, М.Ф. Бабаков // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2016, № 6 (80). – С. 181-187.
9. Лабуткина Т.В. Имитационная модель спутниковой сети коммутации пакетов с разновысотными орбитальными сегментами / Т.В. Лабуткина, В.А. Ларин, В.В. Беликов, А.В. Борщева, А.А. Тихонова, Д.И. Деревяшкин. // Наукотехнічний журнал «Радіоелектронні і комп'ютерні системи». № 1 (75), 2016. С. 66-83.
10. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ в 2 томах. – 1992. – 608 с.

11. Guo Y., Hu G. & Shao D. QOGMP: QoS-oriented global multi-path traffic scheduling algorithm in software defined network / Scientific reports // Sci Rep 12, 14600 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18919-w>
12. О.В. Лемешко, М.О. Євдокименко. Вдосконалення потокової моделі в мультисервісній телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування. // Системи озброєння і військова техніка. – 2020. – № 1(61). – С. 31-43. DOI: 10.30748/soivt.2020.61.04.
13. Sahar Faezi, Alireza Shirmarz, A Comprehensive Survey on Machine Learning using in Software Defned Networks (SDN). / Human-Centric Intelligent Systems (2023) 3:312–343 Pp 312-343. <https://doi.org/10.1007/s44230-023-00025-3>
<https://link.springer.com/article/10.1007/s44230-023-00025-3>
14. Rashid Amin, Elisa Rojas, Aqsa Aqduş, Sadia Ramzan, David Cassilas-Perez, Jose M. Arco. A survey on Machine Learning Techniques for Routing Optimization in SDN // IEEE Access. DOI 10.1109/ACCESS.2017.
15. Бондаренко О.В., Устиненко О.В., Протасов О.В., Клочков І. Є., Воронцов Б.С., Матюшенко М.В., Калінін П. М. Огляд сучасного використання генетичних та еволюційних алгоритмів. Стратегії, можливості (оглядова стаття) / О.В. Бондаренко, О.В. Устиненко, Р.В. Протасов, І. Є. Клочков, Б. С. Воронцов, М. В. Матюшенко, П. М. Калінін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Машинознавство та САПР. – № 2. – 2022. – С. 6-16.
16. Лабуткина Т.В. Характеристики топологии фрагментированной на кластеры спутниковой сети / Т.В. Лабуткина, А.Д. Легенков // Scientific achievements of modern society. Abstracts of the 8th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom. 2020. Pp. 495-504. URL: <https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-01/SCIENTIFIC-ACHIEVEMENTS-OF-MODERN-SOCIETY-1-3.04.2020.pdf>
17. Лабуткина Т.В. «Комбинированное» управление сетевой нагрузкой в сети коммутации пакетов // Т.В. Лабуткина, Д.И. Шабазов // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції Інформаційні технології у металургії і машинобудуванні, 26-29 березня 2019, Дніпро, Україна. – С. 122.
18. Борщёва А.В. Моделирование кинематики составной линии связи между космическими аппаратами спутниковой сети с разновысотными орбитальными группировками / О.В. Борщёва, Т.В. Лабуткина // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: Збірник наукових праць. – 2015. – Т. XVII. – С. 9-25.
https://www.dnu.dp.ua/docs/zbirniki/ftf/program_5e3339a088c08.pdf
19. Лабуткина Т.В. Имитационные модели спутниковой сети коммутации пакетов на основе комбинирования моделей разной точности. / Т.В. Лабуткина, А.А. Тихонова, А.В. Борщёва, Р.С. Косий, А.И. Лукашевич // Системне проекту-

вання та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. Збірник наукових праць. Том XIX 2015 С. 98-113.

20. Низькоорбітальна супутникова система інтернету речей на базі розподіленого супутника / М. Ю. Ільченко, Т. М. Наритник, В. І. Присяжний, С. В. Капштик, С. А. Матвієнко // Космічна наука і технологія. – 2020. – Т. 26, № 4 (125). – С. 57–85. DOI: 10.15407/knit2020.04.057

REFERENCES

1. Barghash A., Hammad L., Gharaibeh A., Traditional vs. Modern Data Paths: A Comprehensive Survey / Ahmad Barghash, Lina Hammad, Ammar Gharaibeh // Computers 2022, 11(9), 132. <https://doi.org/10.3390/computers11090132>
2. Chiesa M., Kamisinski A., Rak J., Member S. A Survey of Fast-Recovery Mechanisms in Packet-Switched Networks / Marco Chiesa, Andrzej Kamisinski, Jacek Rak, Senior Member // IEEE Communication Surveys & Tutorials, vol. 23 Issue 2, second quarter 2021. DOI: 10.1109/COMST.2021.3063980
3. Weiwei Jang, Yafeng Zhan, Xiaolong Xiao, Guanglin Sha, Network Simulators for Satellite-Terrestrial Integrated Networks: A Survey // IEEE Xplore, Volume 11, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3313229
4. Labutina T.V. Kontsepsiya sputnikovoy seti kommutatsii paketov s nazemnyim, aviatsionnyim i kosmicheskim polzovatelskimisegmentami. / T.V. Labutina, A.V. Babanina, N.M. Sotnichek, I.A. Saenko, A.V. Dyimchenko // Systemne proektuvannia ta analiz kharakterystyk aerokosmichnoi tekhniki. – 2017. – Т. XXII. – С. 66-84.
5. Kozlovskiy V., Yakymchuk N., Selepyna Y., Moroz S., & Tkachuk A. Development of a modified method of network traffic forming. Informatyka, automatyka, pomiary w gospodarce i ochronie środowiska, 13(1), 2023, P. 50-53. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3452>
6. Labutkina T.V. Imitatsionnaya model sputnikovoy seti kommutatsii paketov klasternogo tipa. / T.V. Labutkina, I.A. Saenko // Materialy Trynadtsiatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii Perspektivy telekommunikatsyi, 15-19 kvitnia, 2019, Kyiv, Ukraina. – S. 33-35.
7. Albul A.S. Obosnovanie modeli marshrutizatsii dlya mnogosputnikovyih LEO sistem vyisokoskorostnoy peredachi dannyih. / A.C. Albul, M.F. Babakov // Radioelektronni i kompiuterni systemy. – 2016, № 6 (80). – S. 181-187.
9. Labutkina T.V. Imitatsionnaya model sputnikovoy seti kommutatsii paketov s raznovyisotnyimi orbitalnyimi segmentami / T.V. Labutkina, V.A. Larin, V.V. Belikov, A.V. Borscheva, A.A. Tihonova, D.I. Derevyashkin. // Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Radioelektronni i kompiuterni systemy». № 1 (75), 2016. S. 66-83.
10. Shvarts M. Seti svyazi: protokolyi, modelirovanie i analiz v 2 tomah. – 1992. – 608 s.

11. Guo Y., Hu G. & Shao D. QOGMP: QoS-oriented global multi-path traffic scheduling algorithm in software defined network / Scientific reports // Sci Rep 12, 14600 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18919-w>
12. O.V. Lemeshko, M.O. Yevdokymenko. Vdoskonalennia potokovoi modeli v multyservisnii telekomunikatsiinii merezhi iz zabezpechenniam yakosti obsluhovuvannia. // Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. – 2020. – № 1(61). – S. 31-43. DOI: 10.30748/soivt.2020.61.04.
8. Guo Y., Hu G. & Shao D. QOGMP: QoS-oriented global multi-path traffic scheduling algorithm in software defined network / Scientific reports // Sci Rep 12, 14600 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18919-w>
9. Rashid Amin, Elisa Rojas, Aqsa Aqduş, Sadia Ramzan, David Cassilas-Perez, Jose M. Arco. A survey on Machine Learning Techniques for Routing Optimization in SDN // IEEE Access. DOI 10.1109/ACCESS.2017.DOI
15. Bondarenko O.V., Ustynenko O.V., Protasov O.V., Klochkov I. Ye., Vorontsov B.S., Matiushenko M.V., Kalinin P. M. Ohliad suchasnoho vykorystannia henetychnykh ta evoliutsiinykh alhorytmiv. Stratehii, mozhlyvosti (ohliadova stattia) / O.V. Bondarenko, O.V. Ustynenko, R.B. Protasov, I. Ye. Klochkov, B. S. Vorontsov, M. V. Matiushenko, P. M. Kalinin // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» Serii: Mashynoznavstvo ta SAPR. – № 2. – 2022. – S. 6-16.
16. Labutkina T.V. Charakteristiki topologii fragmentirovannoy na klasteriyi sputnikovoy seti / T.V. Labutkina, A.D. Legenkov // Scientific achievements of modern society. Abstracts of the 8th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom. 2020. Pp. 495-504. URL: <https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-01/SCIENTIFIC-ACHIEVEMENTS-OF-MODERN-SOCIETY-1-3.04.2020.pdf>
17. Labutkina T.V. «Kombinirovannoe» upravlenie setevoy nagruzkoy v seti kommutatsii paketov // T.V. Labutkina, D.I. Shabazov // Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii Informatsiini tekhnologii u metalurhii i mashynobuduvanni, 26-29 bereznia 2019, Dnipro, Ukraina.– S. 122.
18. BorschYova A.V. Modelirovanie kinematiki sostavnoy linii svyazi mezhdu kosmicheskimi apparatami sputnikovoy seti s raznovyisotnyimi orbitalnyimi gruppirovkami / O.V. BorschYova, T.V. Labutkina // // Systemne proektuvannia ta analiz kharakterystyk aerokosmichnoi tekhniki : Zbirnyk naukovykh prats. – 2015. – T. XVII. – S. 9-25.
19. Labutkina T.V. Imitatsionnyie modeli sputnikovoy seti kommutatsii paketov na osnove kombinirovaniya modeley raznoy tochnosti. / T.V. Labutkina, A.A. Tihonova, A.V. BorschYova, R.S. Kosiy, A.I. Lukashevich // /Systemne proektuvannia ta analiz kharakterystyk aerokosmichnoi tekhniki. Zbirnyk naukovykh prats. Tom XIX 2015 S. 98-113.

20. Nyzkoorbitalna suputnykova systema internetu rechei na bazi rozpodilenoho suputnyka / М. Yu. Ilchenko, Т. М. Narytnyk, V. I. Prysiazhnyi, S. V. Kapshtyk, S. A. Matviienko // Kosmichna nauka i tekhnolohiia. – 2020. – Т. 26, № 4 (125). – S. 57–85. DOI: 10.15407/knit2020.04.057

Received 02.05.2024.

Accepted 03.05.2024.

Simplified simulation model of load in a closed packet switching network

An approach to simplified simulation modeling of packet switching network load has been developed. The simulated representation of network processes is based on a simplified mathematical model of the packet switching network, which is based on a discretized description of the load states of the network nodes and corresponds to the representation of the current state of the network in the tasks of managing its load. Changes in the node's filling state are modeled as a process of reproduction and death, and in the full load model, two factors of change are taken into account: the node's exchange of load with network users and transit load flow passing through it. To study an artificially selected "part of the network functioning process" - an approach to transit load modeling in a load-locked network is proposed. The approach allows for significant simplifications and ensures the leveling of the negative impact of simplifications on "load closure" (ensures the rule of constant amount of load in a closed network). The developed simulation model, firstly, creates the basis for the improvement of the complete model, and secondly, it is convenient for working out routing algorithms when analyzing them from the point of view of indicators of the ability to "influence" the load in the network. The obtained results are generalized, but attention is focused on the example of satellite packet switching networks.

Лабуткіна Тетяна Вікторівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Tetyana Viktorivna Labutkina - Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Cyber Security and Computer-Integrated Technologies of the Faculty of Physics and Technology of Oles Honchar Dnipro National University.