

## **МОДЕЛЬ ТА МЕТОД УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ В МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ КРИТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

**Лаврут О. О., Лаврут Т. В.**

### **ВСТУП**

Глобальні зміни, що відбуваються у світі, стають джерелом виникнення все більшої кількості надзвичайних ситуацій (НС) техногенного та природного походження, зокрема збройних локальних конфліктів. Професійні оперативно-рятувальні служби цивільного захисту України і спеціальні (воєнізовані) підрозділи під час виникнення таких ситуацій є основою для термінового реагування. Для ліквідації наслідків НС можуть залучатися частини та підрозділи інших силових формувань (Національної гвардії України, поліції, Збройних Сил України), утворених відповідно до законів України. За таких умов дуже важливим є питання швидкого, узгодженого та ефективного управління всіма залученими силами в критичних умовах, що склалися.

Зв'язок є основним процесом, що забезпечує безперервне та надійне управління підрозділами критичного призначення. Процес обміну інформацією (зв'язок) між пунктами управління та різними посадовими особами підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту України та інших силових структур відбувається за допомогою засобів зв'язку та телекомунікації.

Сучасна система управління силовими структурами критичного призначення досить динамічно розвивається в Україні. Її транспортною основою є телекомунікаційні мережі (ТКМ) загального користування, які забезпечують обмін інформацією в інтересах усіх силових структур, що діють у зоні виконання завдань незалежно від їх підпорядкування та задач, що розв'язуються. Важливою умовою ефективного функціонування інформаційно-телекомунікаційної мережі критичного призначення (ІТМ КП) є максимальна погодженість у вирішенні завдань мережного рівня, зокрема маршрутизації, управління інтенсивністю трафіка.

Однак сьогодні під час вирішення маршрутних завдань правильно математично описати процеси динаміки стану, забезпечення

мультисервісу та гарантованої якості зв'язку більш ніж за двома показниками класичними методами практично неможливо. Складним залишається питання оцінювання якості управління різнорідними потоками інформації в мультисервісних мережах.

Отже, постає питання вирішення завдання управління потоками інформації в мережах зв'язку критичного призначення з гарантованим забезпеченням показників якості, особливо в умовах, які швидко змінюються.

## **1. Тенденції розвитку засобів зв'язку та телекомунікацій у силових структурах України**

Сьогодні системи зв'язку та автоматизації управління Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту України<sup>1</sup>, Збройних Сил України<sup>2</sup>, Національної гвардії України, поліції мають стійку тенденцію до всебічного розвитку та переоснащення на новітні високотехнологічні засоби зв'язку та телекомунікацій з урахуванням досвіду провідних країн світу.

Умовно розвиток системи зв'язку та автоматизації управління силових структур критичного призначення в Україні можна поділити на такі три етапи<sup>3</sup>:

1) до 2014 року включно (характеризується наявністю в силових підрозділах переважно аналогових комплексів та засобів зв'язку виробництва колишнього Радянського Союзу, які вже тоді технічно та морально застаріли);

2) 2015–2017 роки (проводяться нарощування та удосконалення системи зв'язку й автоматизованого управління силових структур; початок закупки радіостанцій військового призначення фірм “Harris”, “Aselsan”, “Elbit”);

---

<sup>1</sup> Лаврут Т.В., Ожаревський В.А. Інформаційна технологія управління інформаційним обміном в телекомунікаційній мережі критичного призначення. *Science, engineering and technology: global trends, problems and solutions* : conference proceedings, September 25–26, 2020. Prague : Baltija Publishing, 2020. P. 52–55. DOI: 10.30525/978-9934-588-79-2-1.12.

<sup>2</sup> Лаврут О.О., Климович К.О., Тарасюк М.Л., Антонюк О.Л. Стан та перспективи застосування сучасних технологій та засобів радіозв'язку в Збройних Силах України. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. Вип. 1 (49). С. 42–49.

<sup>3</sup> Лаврут О.О., Климович К.О., Тарасюк М.Л., Антонюк О.Л. Стан та перспективи застосування сучасних технологій та засобів радіозв'язку в Збройних Силах України. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. Вип. 1 (49). С. 42–49.

3) з 2018 року до сьогодні (продовжуються нарощування та удосконалення системи зв'язку й автоматизованого управління силових структур<sup>4</sup>; відбувається переоснащення радіостанціями компаній “Motorola”<sup>5</sup>, “Harris”, “Aselsan”, “Elbit”, а також обладнанням вітчизняного виробництва пунктів управління всіх рангів та техніки критичного застосування)<sup>6</sup>.

Отже, під час першого етапу, до 2014 року, силові підрозділи оснащувалися засобами зв'язку подвійного призначення, вартість яких у декілька разів нижче за військові. Досвід показав, що станом на кінець 2015 року в підрозділах силових структур України за рахунок державних закупівель, волонтерської допомоги активно використовувалися засоби зв'язку іноземного, але, як правило, цивільного виробництва, зокрема транкінгове обладнання “Motorola”, супутникові термінали “Tooway”, станції широкосмугового доступу фірм “Ubiquiti”, “Microtik”, комутатори і маршрутизатори. Це дало змогу реалізувати першочергові завдання щодо забезпечення зв'язку та створити цифрову систему захищеного зв'язку<sup>7</sup>; розгорнути систему супутникового зв'язку, систему цифрового транкінгового зв'язку; розпочати переобладнання апаратних зв'язку на цифрові засоби, маршрутизатори фірм “Cisco”, “Microtik”, обладнання мережі «Укртелекому» тощо.

З 2016 року в рамках реалізації положень Стратегічного оборонного бюлетеня України керівництвом держави ведеться робота щодо створення ефективної системи оперативного управління, зв'язку, розвідки та спостереження (C4ISR), яка б

---

<sup>4</sup> Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Климович О.К. Перспективи розвитку автоматизованих систем управління тактичної ланки управління Сухопутних військ Збройних Сил України. *Системи обробки інформації*. 2014. Вип. 5 (121). С. 116–120.

<sup>5</sup> Климович К.О., Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Івко С.О. Визначення перспективних технологій в системах радіозв'язку та транкінгового зв'язку для подальшого використання в Збройних Силах України. *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса)*. 2016. Вип. 2 (6). С. 30–35.

<sup>6</sup> Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Климович О.К., Здоренко Ю.М. Новітні технології та засоби зв'язку у Збройних Силах України: шлях трансформації та перспективи розвитку. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. Вип. 1 (34). С. 91–101. DOI: 10.30748/nips.2019.34.13.

<sup>7</sup> Пузиренко О.Г., Івко С.О., Лаврут О.О. Аналіз процесу управління ризиками інформаційної безпеки в забезпеченні живучості інформаційно-телекомунікаційних систем. *Системи обробки інформації*. 2014. Вип. 8 (124). С. 128–134.

відповідала стандартам НАТО<sup>8</sup>. В Україні С4ISR створюватиметься відповідно до прийнятої в країнах НАТО мережецентричної концепції управління<sup>9</sup>. Все це вимагає ретельного вивчення можливостей сучасних цифрових технологій та засобів зв'язку для вибору найбільш оптимального варіанта побудови системи зв'язку як транспортної основи системи управління.

*Застосування комплексів (станцій) супутникового зв'язку.* Основою польової складової частини системи зв'язку силових структур України залишається супутниковий зв'язок. Через відсутність у держави власних супутників зв'язку цю послугу орендують у оператора зв'язку ПрАТ «Датагруп» з використанням їх терміналів супутникового зв'язку компанії “Тоoway” (станцій супутникового зв'язку – ССЗ). Застосування системи “Тоoway” дає змогу забезпечити ефективні, захищені, інтерактивні лінії зв'язку високої якості за технологією “Ethernet” із сотнями і навіть десятками тисяч віддалених пунктів. Віддалені термінали “Тоoway” можуть забезпечувати двосторонній супутниковий зв'язок через мережу Інтернет.

*Застосування засобів транкінгового зв'язку.* В силових структурах широко використовуються комплекси ультракороткохвильового (УКХ) транкінгового зв'язку компанії “Motorola”, які характеризуються високою якістю і функціональними можливостями. Ефективність застосування цих засобів пов'язана насамперед з невеликими габаритами і стійкістю до перешкод, можливістю технічного маскування під час ведення радіообміну.

*Засоби радіозв'язку фірми “HARRIS”.* Крім УКХ-радіостанцій для зв'язку на далекі відстані створено КХ-радіомережі з використанням радіостанцій “Harris”. Сьогодні у Збройних Силах України, підрозділах Національної гвардії України вже протягом багатьох років успішно проходить експлуатацію чимало радіостанцій “Harris Falcon II” та “Falcon III”, які зарекомендували себе як надійні та стабільні засоби зв'язку, сумісні між собою.

---

<sup>8</sup> Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Климович О.К., Здоренко Ю.М. Новітні технології та засоби зв'язку у Збройних Силах України: шлях трансформації та перспективи розвитку. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. Вип. 1 (34). С. 91–101. DOI: 10.30748/nips.2019.34.13.

<sup>9</sup> Лаврут О.О., Климович К.О., Тарасюк М.Л., Антонюк О.Л. Стан та перспективи застосування сучасних технологій та засобів радіозв'язку в Збройних Силах України. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. Вип. 1 (49). С. 42–49.

Перевагами використання цих радіостанцій є забезпечення надійної роботи в радіонапрямку та в радіомережі як у телефонному режимі, так і в режимі передачі даних. Радіостанції мають покращену систему шифрування, забезпечують надійний зв'язок у робочому (розширеному) діапазоні частот. Режим псевдовипадкової перебудови робочої частоти (ППРЧ) забезпечує надійний захист від радіоелектронної протидії противника. Використання широко діапазону частот від 30 МГц до 512 МГц дає змогу інтегрувати в одну радіостанцію такі можливості: одноканальне тактичне радіо, вузькосмуговий та широкосмуговий режим роботи, автоматична ретрансляція та маршрутизація інформації (MANET). GPS система забезпечує визначення місцеположення та автоматичну передачу цієї інформації в межах роботи цих радіостанцій. Вони можуть використовуватися в переносному, мобільному (на автошасі) та стаціонарному варіантах.

Радіостанції "Aselsan" (Aselsan Elektronik Sanayi, Туреччина) перекривають HF/VHF/UHF-діапазони частот і виготовлені відповідно до вимог сухопутних, морських і військово-повітряних сил. Архітектура SDR дає змогу цим радіостанціям легко адаптуватися під різні тактичні задачі, змінювати частоти, модуляцію, застосовувати будь-які алгоритми шифрування, гарантувати підвищену живучість проти засобів придушення радіосигналу. Це автомобільні радіостанції VRC-9661 (50 Вт), ранцеві радіостанції PRC-9661 (10 Вт), портативні PRC-9651 (5 Вт), персональні PRC-5712 (0,125 Вт) та апаратура внутрішнього зв'язку і комутації (АВЗК) ICS-6680.

Особливості та основні тактико-технічні характеристики такі: діапазон частот становить 2–30 МГц і 30–512 МГц; Ad-Hoc-мережі; одночасна передача голосу і обмін даними в мережі; повний дуплекс; висока швидкість передачі даних (100 Кбіт у широкосмуговій мережі); 16–14 Кбіт/с становить пропускну здатність у режимі ППРЧ; низька ймовірність перехоплення та виявлення; тактичний Інтернет; потужність різних модифікацій.

Застосування радіостанції в режимі NBNR (належить до класу MANET) дає змогу проводити одночасно декілька сеансів зв'язку (передачі даних) на одному фізичному каналі. В одній фізичній мережі може бути до шести логічних мереж. Наприклад, можна планувати декілька взводних мереж в одній фізичній мережі роти.

Режим NBNR має функцію автоматичної ретрансляції, яка дає змогу двом кореспондентам зв'язатися між собою, використовуючи

інші станції як ретранслятори, якщо вони не можуть організувати канал між собою.

В режимі WBNR швидкість передачі даних зростає до 1 Мбіт/с (ППРЧ); швидкість ППРЧ перевищує 1 500 стрибків за секунду; організація в мережі досягає 150 станцій; підтримка Ad Hoc та TDMA, динамічний розподіл каналного ресурсу; до 10 стрибків для передачі даних та чотирьох стрибків для голосу в режимах як індивідуального, так і групового виклику.

*Засоби зв'язку компанії Elbit (PNR-1000 (V), VRC-950, VRC-950HDR, АВЗК VIC-500)* також використовуються в окремих силових підрозділах.

Сьогодні в силових структурах України майже не залишилося пунктів управління підрозділів та військових частин, вузлів зв'язку, в яких використовують застарілі технології та аналогові засоби зв'язку. Як первинну (транспортну) мережу передачі даних сьогодні використовують цифрові канали передачі даних, утворені за допомогою технології “Ethernet” з використанням дротових, волоконно-оптичних, супутникових ліній зв'язку. З 2018 року триває пошук нових ефективних засобів зв'язку та новітніх технологій організації зв'язку, який має функціонувати в критичних умовах. Серед них одна з ключових позицій належить радіорелейному зв'язку.

*Радіорелейні станції.* Радіорелейний зв'язок забезпечується для організації прив'язки вузлів зв'язку пунктів управління до опорної мережі зв'язку та організації ліній прямого зв'язку між пунктами управління.

Наприклад, сучасна радіорелейна станція прямої видимості сантиметрового діапазону Р-414МУ забезпечує протяжність напіввідкритого інтервалу лінії зв'язку приблизно до 40 км в діапазоні частот від одиниць до десятків ГГц. Швидкість передачі цифрової інформації досягає 40 Мбіт/с. Для організації високошвидкісних каналів зв'язку в підрозділах ЗС України використовують широкодіапазонні радіорелейні станції ТОВ «Телекарт-Прилад».

Цивільні широкодіапазонні станції також використовують для організації прив'язки вузлів зв'язку пунктів управління. Такі станції дають змогу будувати бездротові лінії зв'язку за технологією Wi-Fi та WiMax з підтримкою протоколів 802.11n, 802.11g, 802.11b. Вони забезпечують реальну швидкість передачі даних до 300 Мбіт/с. Бездротову точку застосовують для підключення до базової станції

провайдера або побудови Wi-Fi-мостів на відстань до 35 км. Пристрій швидко збирається без використання спеціальних інструментів.

Застосування новітнього високотехнологічного обладнання зв'язку дає змогу відмовитись від застарілих та малоефективних принципів організації і забезпечення зв'язку та перейти до організації надання в інтересах пунктів управління якісних інформаційно-телекомунікаційних сервісів, таких як IP-телефонія, відео- та аудіо-конференція, швидкісна передача даних, криптографічний захист інформації, обмін електронними повідомленнями.

Така тенденція розвитку засобів зв'язку та телекомунікацій у силових структурах України привела до появи в різних силових підрозділах різнорідних засобів зв'язку як військового, так і цивільного призначення, тобто засоби зв'язку та телекомунікацій, що використовуються Оперативно-рятувальною службою цивільного захисту України, Національною гвардією України, поліцією та Збройними Силами України, потребують вирішення питання їх сумісності, надійності та забезпечення гарантованої якості, а під час виконання завдань з ліквідації надзвичайних ситуацій необхідно вести пошук нових підходів до управління різнорідним трафіком у телекомунікаційній мережі критичного призначення.

## **2. Модель багатошляхової маршрутизації передачі команди управління між різними вузлами (елементами) інформаційно-телекомунікаційної мережі критичного призначення**

В сучасних телекомунікаційних мережах, які є мульти-сервісними, достатньо гостро існує проблема надання гарантій та контролю якості зв'язку *QoS (Quality of Service)* одночасно за декількома показниками. Застосування багатошляхової маршрутизації є шляхом задоволення суперечливих вимог щодо забезпечення гарантованого *QoS* та збалансованого навантаження ресурсів будь-якої телекомунікаційної мережі.

Проведений огляд математичних моделей процесів, які описують трафік<sup>10</sup> в ІТМ КП, показав, що більшість підходів у цій галузі засновано на використанні найпростіших комбінаторних або

---

<sup>10</sup> Лемешко О.В., Євдокименко М.О., Єременко О.С. Оптимізаційна модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Вип. 2 (60). С. 152–159. DOI: 10.26906/SUNZ.2020.2.152.

потоків моделей ІТМ КП, які не можуть без істотних обчислювальних витрат врахувати різноманітність інтегральних потоків даних, особливо в ситуаціях, пов'язаних з різкими змінами топології ІТМ КП, що обмежує їх застосування під час розроблення методів управління в середовищі ІТМ КП<sup>11</sup>.

Також необхідно зазначити, що в галузі управління мережними ресурсами застосовуються моделі, які орієнтовані на формалізацію й вирішення завдань забезпечення QoS під час реалізації одношляхових стратегій маршрутизації, що не сприяють збалансованому завантаженню ІТМ КП.

З точки зору багатоаспектного розгляду математично точно описати телекомунікаційну систему як цілісний об'єкт з огляду на те, що теорія дослідження ІТМ КП має бути інваріантною щодо способу опису його внутрішньої структури, можна лише за допомогою деякого каркаса, який дасть змогу стикувати моделі, отримані під час розгляду різних аспектів однієї системи, об'єднуючи різні її подання.

У зв'язку з цим одним із можливих способів вивчення мережних архітектур є тензорні моделі й методи аналізу<sup>12</sup>. У зв'язку з цим особливою актуальності набувають дослідження, що базуються на використанні інваріантних величин, а саме тензорів, які подібно каркасу зв'язують перетворення структури складних систем. Можливість сумісного дослідження структури складної системи та процесів, що в ній протікають, є головною перевагою тензорної методології досліджень<sup>13</sup>.

Під час обслуговування мережею агрегованого потоку з постійною довжиною переданих пакетів (команди управління) в основу функціонального опису ІТМ КП може бути покладено рівняння поведінки окремо взятого елемента системи, наприклад, отримане моделюванням кожної гілки мережі системою масового обслуговування типу  $M / M / 1$ , тобто одноканальною моделлю з

---

<sup>11</sup> Лаврут О.О., Блажко Л.М. Математичне моделювання процесів функціонування фрагменту мобільного компоненту системи зв'язку ЗС України. *Системи обробки інформації*. 2011. Вип. 8 (98). С. 170–174.

<sup>12</sup> Лаврут О.О., Стрюк О.Ю., Польщиков К.О. Тензор – можлива модель опису системи супутникового зв'язку як складного динамічного об'єкта. *Системи озброєння і військова техніка*. 2009. Вип. 4 (20). С. 131–134.

<sup>13</sup> Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Мартиненко А.М. Описание системы спутниковой связи как сложного динамического объекта при помощи метода Крона. *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. 2010. Вип. 7 (48). С. 251–256.



пуассоновським потоком заявок і показовим законом розподілу часу обслуговування:

$$\tau = \frac{h}{\phi - d} \quad (i = \overline{1, n}), \quad (1)$$

де  $\phi$  – пропускна здатність модельованого тракту передачі (байт/с),  $d = \lambda h$  – інтенсивність трафіку, що передається (байт/с),  $\lambda$  – пакетна інтенсивність трафіку (1/с),  $h$  – середня довжина пакета (байт),  $\tau$  – середня затримка передачі пакета (с) в цьому тракті.

Слід зазначити, що вираз (1) є сумою таких двох доданків: час передачі пакета (повідомлення, кадра тощо):

$$\tau_{прд} = \frac{h}{\phi} \quad (2)$$

і часу очікування в черзі:

$$\tau_{ож} = \frac{d h}{\phi(\phi - d)}. \quad (3)$$

Окрім цього, величина  $\phi$  може характеризувати не номінальну, а виділену (зарезервовану) пропускну здатність тракту для обслуговування конкретного трафіку або агрегованого потоку. Наприклад, у MPLS-мережах кожний клас еквівалентного пересилання FEC (Forwarding Equivalence Class) обробляється окремо від решти не тільки тому, що для кожного класу будується свій шлях LSP, але й через доступ до загальних ресурсів, тобто до смуги пропускання  $\phi$  тракту передачі і буферного простору вузлів ITM ВП. Це досягається шляхом застосування на вузлах мережі таких механізмів управління буферизацією і черговістю, як WRED, WFQ, DWFQ або CBWFQ, що дає адміністратору мережі можливість ефективно контролювати розподіл ресурсів, а також ізолювати трафік окремих користувачів.

За багатоаспектного опису системи в  $n$ -мірному дискретному просторі-структурі можуть розглядатись декілька систем координат. Основною вимогою під час вибору є інформативність цих СК, тобто в них мають бути відомі проєкції різних компонент тензора або ті, що необхідно знайти, з огляду на які можна розрахувати необхідні компоненти в тій чи іншій системі координат.

Введемо в розгляд дві координатні системи<sup>14</sup>. Першою є система координат гілок мережі, якій відповідає структура з окремими не з'єднаними між собою гілками. Другою є система координат незалежних контурів і пар вузлів (КПВ) мережі, яка відповідає реальній структурі системи, що моделюється. Подібний вибір СК обумовлений тим, що в системі координат гілок мережі необхідно розрахувати невідомі величини, такі як інформаційне завантаження й величини затримок у кожному тракті передачі системи. У системі координат незалежних контурів і пар вузлів проекції тензорів визначають вихідні дані для розв'язання розрахункових задач, наприклад довжину повідомлень і (або) затримку їх передачі.

Для опису мережі візьмемо два параметри, такі як довжини повідомлень і час їх передачі. Виконаємо тензорний опис системи за допомогою одновалентного тензора довжин повідомлень  $S$  із компонентами  $s^i$ , одновалентного тензора затримок передачі  $T$  з компонентами  $t_j$ , а також тензора другої валентності  $R$ , координати якого розраховуються згідно з виразом  $r_j^i = s^i t_j, (i, j = \overline{1, n})$ , а у прямому позначенні  $R = S \otimes T$ .

Кожній структурі мережі відповідає свій набір координат, при цьому кількість координатних шляхів завжди залишається рівною кількості гілок<sup>15</sup>.

Закони координатного перетворення мають такий вигляд:

$$S = CS' \text{ і } T = AT' \quad (4)$$

за виконання умов ортогональності:

$$C' = [A]^{-1}. \quad (5)$$

Контраваріантний характер мають параметри мережі, які під час переходу від однієї СК до іншої підпорядковуються умовам збереження потоку (наприклад, інтенсивність трафіку, довжина пакета). Коваріантний характер мають адитивні метрики, зокрема середня затримка, джитер, вартість. Прийнято коваріантні тензори позначати нижніми індексами, а контраваріантні – верхніми.

---

<sup>14</sup> Лаврут О.О., Блажко Л.М. Математичне моделювання процесів функціонування фрагменту мобільного компоненту системи зв'язку ЗС України. *Системи обробки інформації*. 2011. Вип. 8 (98). С. 170–174.

<sup>15</sup> Лаврут О.О., Блажко Л.М. Математичне моделювання процесів функціонування фрагменту мобільного компоненту системи зв'язку ЗС України. *Системи обробки інформації*. 2011. Вип. 8 (98). С. 170–174.

Взаємозв'язок коваріантних і контраваріантних компонентів тензора можна формалізувати в прямому записі таким чином:

$$T = GS; S = MT, \quad (6)$$

$$\text{де } M = [G]^{-1}. \quad (7)$$

Таким чином, тензор відображає інваріантний геометричний об'єкт, координати якого під час перетворення системи координат змінюються за лінійним законом.

Через однакову розмірність введених координатних систем існують однозначні правила перетворення координат будь-яких геометричних об'єктів з однієї системи координат в іншу. Шукана матриця контраваріантного перетворення  $S$  визначається з такого співвідношення

$$S_{\Gamma} = CS_{к.п.в.}, \quad (8)$$

де  $S_{\Gamma}$ ,  $S_{к.п.в.}$  подані у вигляді векторів розмірності  $n$ -проекції одновалентного тензора довжин повідомлень  $S$  у введених вище координатних системах окремих гілок мережі, а також незалежних контурів і пар вузлів.

Вектори  $S_{\Gamma}$  та  $S_{к.п.в.}$  мають такі складові частини:

$$S_{\Gamma} = \begin{bmatrix} s_{\Gamma}^1 \\ s_{\Gamma}^i \\ s_{\Gamma}^n \end{bmatrix}; S_{к.п.в.} = \begin{bmatrix} S_{к} \\ S_{н.в} \end{bmatrix}; S_{к} = \begin{bmatrix} s_{к}^1 \\ s_{к}^j \\ s_{к}^r \end{bmatrix}; S_{н.в} = \begin{bmatrix} s_{н.в}^1 \\ s_{н.в}^p \\ s_{н.в}^s \end{bmatrix},$$

де  $s_{\Gamma}^i$  – довжина повідомлення, що передається по  $i$ -й гілці мережі;  $S_{к}$ ,  $S_{н.в}$  – вектори довжин повідомлень, що виникають у контурах мережі і надходять на її вузли;  $s_{к}^j$  – довжина повідомлення в  $j$ -му контурі мережі;  $s_{н.в}^p$  – довжина повідомлення, що надходить у мережу (що спадає з мережі) через  $p$ -ту пару вузлів.

Проекцію тензора затримок  $T$  у системі координат гілок подано вектором  $T_{\Gamma}$ , а в координатній системі незалежних контурів і пар вузлів – вектором  $T_{к.п.в.}$ . Ці вектори мають розмірність  $n$  і таку структуру:

$$T_{\Gamma} = \begin{bmatrix} t_{\Gamma}^1 \\ t_{\Gamma}^i \\ t_{\Gamma}^n \end{bmatrix}; T_{к.п.в.} = \begin{bmatrix} T_{к} \\ T_{н.в} \end{bmatrix}; T_{к} = \begin{bmatrix} t_{к}^1 \\ t_{к}^j \\ t_{к}^r \end{bmatrix}; T_{н.в} = \begin{bmatrix} t_{н.в}^1 \\ t_{н.в}^p \\ t_{н.в}^f \end{bmatrix},$$

де  $t_i^\Gamma$ ,  $t_p^{п.в}$ ,  $t_j^к$  – затримки передачі повідомлень в  $i$ -й гілці,  $j$ -му контурі та між  $p$ -ю парою вузлів мережі.

Коваріантний характер тензора затримок  $T$  обумовлює такий закон координатного перетворення:

$$T_\Gamma = AT_{к.п.в}. \quad (9)$$

Відповідно до фізики процесів (2) інформаційного обміну, що відбуваються в мережі, компоненти  $s_\Gamma^i$  і  $t_i^\Gamma$  векторів  $S_\Gamma$  і  $T_\Gamma$  пов'язані між собою таким співвідношенням:

$$s_\Gamma^i = m_\Gamma^i t_i^\Gamma \quad (i = \overline{1, n}), \quad (10)$$

де  $m_\Gamma^i$  – частина пропускної спроможності  $i$ -ї гілки мережі.

Як функціональний інваріант запропонованої моделі виступає тензорне рівняння, що отримане шляхом узагальнення рівняння (10) та зберігає свою форму незмінною незалежно від координатної системи розгляду мережі:

$$S = MT, \quad (11)$$

де  $M$  – тензор пропускних спроможностей координатних шляхів мережі, проєкції якого в кожній частковій системі координат набувають вигляду матриці розміру  $n \times n$ .

Взявши до уваги вирази 8 (8), 9 (8) і 11 (11), можемо зробити висновок про те, що тензор  $M$  є двічі контраваріантним метричним тензором, проєкції якого під час зміни координатної системи перетворюються таким чином:

$$M_\Gamma = CM_{к.п.в}C^t \quad \text{та} \quad M_{к.п.в} = A^t M_\Gamma A, \quad (12)$$

де  $M_\Gamma$ ,  $M_{к.п.в}$  – проєкції тензора  $M$  у системах координат гілок мережі та незалежних контурів і пар вузлів відповідно.

Форма запису рівнянь поведінки мережі загалом повинна відповідати рівнянню поведінки окремих елементів, що обумовлює заміну системи скалярних рівнянь рівняннями векторно-матричного виду. Відповідно до цього, вигляд функціонального рівняння мережі (11) залишається незмінним у системі координат незалежних контурів і пар вузлів:

$$S_{к.п.в} = M_{к.п.в} T_{к.п.в}. \quad (13)$$

Щоб забезпечувалося існування шуканих розв'язків та однозначна їх інтерпретація, матричне рівняння (13) має бути системою з  $n$  скалярних рівнянь з  $n$  невідомими. Залежно від характеру розв'язуваної задачі з розрахунку шуканих параметрів  $n$

невідомих можуть довільно перерозподілятися між складовими частинами векторів  $S_{к.п.в.}$  та  $T_{к.п.в.}$ .

Таким чином, запропонована тензорна модель, яка представлена в евклідовому просторі, дає змогу однозначно враховувати як структурні, так і функціональні параметри системи, зберігаючи цілісність її розгляду.

### **3. Метод динамічного управління потоками інформації з контролем якості передачі у телекомунікаційній мережі критичного призначення**

В рамках дослідження для моделювання було взято за основу фрагмент польової складової частини ІТМ КП<sup>16</sup> і проведено його геометризацию (рис. 1). Елементами у вигляді кола В1–В6 можуть виступати командні пункти різного рангу, окремі підрозділи, окремі силовики тощо. За основу взято процес передачі повідомлення між двома вузлами цього фрагменту. Наприклад, пропонується використати тензорний підхід до розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації команди управління в запропонованій мережі для вирішення завдання розроблення динамічного методу управління потоками інформації.

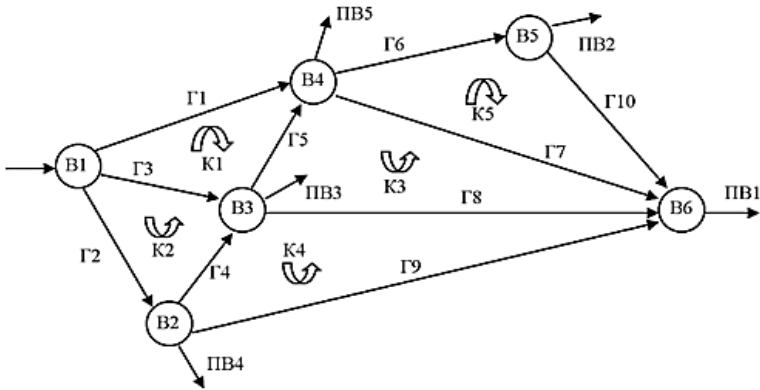
Для наочної демонстрації отриманих результатів<sup>17</sup> проведемо розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації для мережі (рис. 1) за таких вихідних даних: відправник – вузол 1, одержувач – вузол 6, відповідно  $S_{п.в.}=0$  (повідомлення не вибуває з інших вузлів); повідомлення має довжину 100 байт; затримка в контурах дорівнює нулю ( $T_k = 0$ )<sup>18</sup>.

---

<sup>16</sup> Лаврут О.О. Метод динамічного управління потоками інформації з контролем якості передачі у телекомунікаційній мережі військового призначення. *Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2015. Вип 10. С. 158–169.

<sup>17</sup> Лаврут О.О. Метод управління потоками інформації у фрагменті мобільного компоненту перспективної системи зв'язку в надзвичайних ситуаціях, що змінюються. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2012. № 1 (7). С. 94–101.

<sup>18</sup> Лаврут О.О. Динамічний метод управління потоками інформації у фрагменті мобільного компоненту перспективної системи зв'язку в критичних умовах. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2012. № 6 (58). С. 202–207.



**Рис. 1. Геометризація фрагменту польової складової частини ІТМ КП**

Для структури, що зображена на рис. 1, множину всіх безконтурних шляхів між вузлами В1 і В6, тобто шляхів, які не містять петель, можна подати у вигляді системи рівнянь.

$$\begin{cases}
 s_{\Gamma}^1 = s_{\kappa}^1; \\
 s_{\Gamma}^2 = s_{\kappa}^2 + s_{n.e}^4; \\
 s_{\Gamma}^3 = -s_{\kappa}^1 - s_{\kappa}^2 + s_{n.e}^1 + s_{n.e}^3 + s_{n.e}^5; \\
 s_{\Gamma}^4 = s_{\kappa}^2 - s_{\kappa}^4; \\
 s_{\Gamma}^5 = -s_{\kappa}^1 - s_{\kappa}^3 + s_{n.e}^1 + s_{n.e}^5; \\
 s_{\Gamma}^6 = s_{\kappa}^5 + s_{n.e}^2; \\
 s_{\Gamma}^7 = -s_{\kappa}^3 - s_{\kappa}^5 + s_{n.e}^1; \\
 s_{\Gamma}^8 = s_{\kappa}^3 - s_{\kappa}^4; \\
 s_{\Gamma}^9 = s_{\kappa}^4; \\
 s_{\Gamma}^{10} = s_{\kappa}^5;
 \end{cases}
 \quad
 \begin{cases}
 t_1^{\Gamma} = t_1^k + t_5^{n.e}; \\
 t_2^{\Gamma} = t_4^{n.e}; \\
 t_3^{\Gamma} = t_3^{n.e}; \\
 t_4^{\Gamma} = t_2^k + t_3^{n.e} - t_4^{n.e}; \\
 t_5^{\Gamma} = -t_3^{n.e} + t_5^{n.e}; \\
 t_6^{\Gamma} = t_2^{n.e}; \\
 t_7^{\Gamma} = t_1^{n.e} - t_5^{n.e}; \\
 t_8^{\Gamma} = t_3^k + t_1^{n.e} - t_3^{n.e}; \\
 t_9^{\Gamma} = t_2^k + t_3^k + t_4^k + t_1^{n.e} - t_4^{n.e}; \\
 t_{10}^{\Gamma} = t_5^k + t_1^{n.e} - t_2^{n.e} - t_5^{n.e};
 \end{cases}$$

Отже, згідно з орієнтацією гілок, базисних контурів та вузових пар, координати тензорів  $S$  і  $T$  у різних СК розгляду мережі пов'язані між собою в такий спосіб: а-матриці коваріантного і контраваріантного перетворення  $A$  та  $C$  з виконанням умови ортогональності (5) мають такий вигляд:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Під час розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації до відомих контурних компонентів вектору  $T_{к.п.в}$  додаються відомі компоненти вектору  $S_{к.п.в}$  – координати вектору  $S_{п.в}$ , що визначають довжину повідомлень, які надходять до вузлів мережі або вибувають із них<sup>19</sup>. Подібні вихідні дані виключають можливість безпосереднього розрахунку невідомих компонентів векторів  $S_{к.п.в}$  і  $T_{к.п.в}$  шляхом розв'язання функціонального рівняння, заданого у формі (13). Головною перевагою тензорного аналізу є можливість розрахунку координат тензора, що необхідно знайти, в одній системі координат за його координатами в іншій системі координат з урахуванням правил перетворення самих базисів. Відповідно, для успішного розв'язання задачі доцільно використовувати спеціальну форму векторів  $S_{к.п.в}$  і  $T_{к.п.в}$ , тобто рівняння (13) зручно подати у такому вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_k \\ S_{n.в} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{к.п.в}^{(1)} & M_{к.п.в}^{(2)} \\ M_{к.п.в}^{(3)} & M_{к.п.в}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_k \\ T_{п.в} \end{bmatrix}, \text{ де } \begin{bmatrix} M_{к.п.в}^{(1)} & M_{к.п.в}^{(2)} \\ M_{к.п.в}^{(3)} & M_{к.п.в}^{(4)} \end{bmatrix} = M_{к.п.в}, \quad (14)$$

що дає змогу через наявність відомих  $S_{п.в}$  і  $T_k$  одержати такі дві системи рівнянь:

$$T_{п.в} = [M_{к.п.в}^{(4)}]^{-1} S_{п.в} - [M_{к.п.в}^{(4)}]^{-1} M_{к.п.в}^{(3)} T_k; \quad (15)$$

$$S_k = M_{к.п.в}^{(1)} T_k + M_{к.п.в}^{(2)} T_{п.в}. \quad (16)$$

Відповідно до виразів (15) і (16) маємо такі дані:

<sup>19</sup> Лаврут О.О. Дослідження якості управління потоками інформації у моделі військової телекомунікаційної мережі, представлений в тензорному вигляді. *Військово-технічний збірник*. 2015. Вип. 12. С. 27–33.

$$T'_{n.a} = [0,979 \ 0,164 \ 0,512 \ 0,499 \ 0,568];$$

$$S'_k = [34,1 \ 24,97 \ 61,38 \ 23,99 \ 9,86].$$

Розв'язок задачі визначають з розрахунку компонентів вектору  $S'_r$ , які характеризують довжини частин повідомлення в кожній гілці мережі:

$$S'_r = [34,095 \ 24,97 \ 40,935 \ 0,984 \ 4,525 \ 9,86 \ 28,76 \ 37,394 \ 23,986 \ 9,86]$$

Отриманий розв'язок обумовило існування таких незалежних маршрутів передачі повідомлення від першого вузла до шостого, які не містять петель (циклів). Перший маршрут ( $\Gamma_1 - \Gamma_6 - \Gamma_{10}$ ) забезпечує передачу 34,095 байт; другий ( $\Gamma_3 - \Gamma_5 - \Gamma_7$ ) – 40,935 байт; третій ( $\Gamma_2 - \Gamma_4 - \Gamma_8$ ) – 0,984 байт; четвертий ( $\Gamma_2 - \Gamma_9$ ) – 23,986 байт. Незалежність маршрутів у цьому випадку інтерпретується як наявність у кожному з них гілки, що не входить до жодного іншого маршруту. Час передачі частин повідомлення уздовж кожного з розрахованих маршрутів відповідає затримці між вузлами В1 і В6 (ПВ1), тобто першій координаті вектору  $T_{п.в.}$ , і дорівнює 0,979 с.

В критичних умовах з перебігом часу структура ІТМ КП однозначно буде зазнавати змін (передислокація, фізичне знищення, нарощування), тому параметри  $n$  (кількість трактів передачі) та  $m$  (кількість вузлів) необхідно розглядати в динаміці як функцію від часу  $m=f(t)$  та  $n=f(t)$ <sup>20</sup>. Вихідний стан структури можна визначити як  $U=f(m,n,t)$ . В цьому випадку будемо розглядати  $t$  як дискретну величину з шагом 1. Через час  $t+1$  зі ймовірністю  $P_1$  структура мережі перейде з одного стану до іншого. В наступний момент часу стан мережі можна описати як  $U_1=f(m_1,n_1,t+1)$ <sup>21</sup>.

Наприклад, фрагмент ІТМ КП у момент часу  $t+1$  виглядає таким чином (виведено з ладу один з вузлів, втрачено три лінії зв'язку) (рис. 2). Алгоритм розрахунку залишається незмінним. В такому випадку координати тензорів  $S$  і  $T$  у різних системах координат розгляду мережі пов'язані між собою в такий спосіб:

<sup>20</sup> Лаврут О.О. Метод управління потоками інформації у фрагменті мобільного компоненту перспективної системи зв'язку в надзвичайних ситуаціях, що змінюються. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2012. № 1 (7). С. 94–101.

<sup>21</sup> Лаврут О.О. Метод динамічного управління потоками інформації з контролем якості передачі у телекомунікаційній мережі військового призначення. *Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2015. Вип. 10. С. 158–169.



$$\left\{ \begin{array}{l} S_{\Gamma}^1 = S_{\kappa}^1; \\ S_{\Gamma}^2 = S_{\kappa}^2; \\ S_{\Gamma}^3 = -S_{\kappa}^1 - S_{\kappa}^2 + S_{n,\epsilon}^1 + S_{n,\epsilon}^2 + S_{n,\epsilon}^3 + S_{n,\epsilon}^4; \\ S_{\Gamma}^4 = -S_{\kappa}^2 + S_{\kappa}^3 + S_{n,\epsilon}^4; \\ S_{\Gamma}^5 = -S_{\kappa}^1 - S_{\kappa}^3 + S_{n,\epsilon}^1 + S_{n,\epsilon}^3; \\ S_{\Gamma}^6 = -S_{\kappa}^3 + S_{n,\epsilon}^1; \\ S_{\Gamma}^7 = S_{\kappa}^3; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} t_1^{\Gamma} = t_1^k + t_3^{n,\epsilon}; \\ t_2^{\Gamma} = t_2^k + t_4^{n,\epsilon}; \\ t_3^{\Gamma} = t_2^{n,\epsilon}; \\ t_4^{\Gamma} = -t_2^{n,\epsilon} + t_4^{n,\epsilon}; \\ t_5^{\Gamma} = -t_2^{n,\epsilon} + t_3^{n,\epsilon}; \\ t_6^{\Gamma} = t_1^{n,\epsilon} - t_3^{n,\epsilon}; \\ t_7^{\Gamma} = t_3^k + t_1^{n,\epsilon} - t_4^{n,\epsilon}. \end{array} \right.$$

Значення компонентів вектору  $S_{\Gamma}$ , які характеризують довжини частин повідомлення в кожній гілці мережі, є такими:

$$S'_{\Gamma} = [38,273 \quad 29,163 \quad 32,564 \quad 14,097 \quad 18,467 \quad 56,74 \quad 43,26].$$

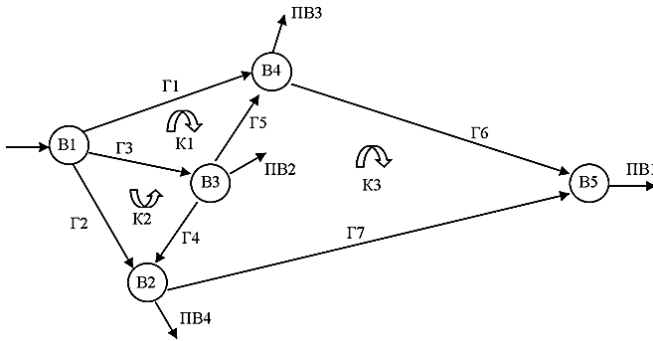
В цьому випадку перший маршрут ( $\Gamma 1 - \Gamma 6$ ) забезпечує передачу 38,273 байт; другий ( $\Gamma 3 - \Gamma 5 - \Gamma 6$ ) – 18,467 байт; третій ( $\Gamma 3 - \Gamma 4 - \Gamma 7$ ) – 14,097 байт; четвертий ( $\Gamma 2 - \Gamma 7$ ) – 29,163 байт. Час передачі частин повідомлення дорівнює 1,448 с.

Використання тензорних моделей дає змогу забезпечити насамперед надання послуг зв'язку гарантованої якості одночасно за кількома показниками  $QoS$  вздовж кожного з розрахованих шляхів.

Таким чином, можна вирішити основну проблему, а саме забезпечення мінімального часу доставки повідомлення (команди) між заданими вузлами мережі з контролем (забезпеченням) показників якості  $QoS$  вздовж кожного з розрахованих шляхів.

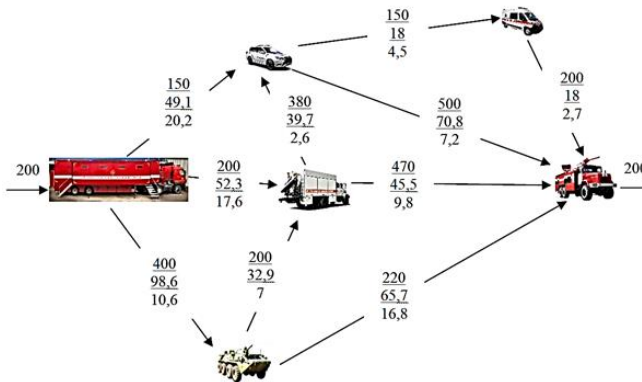
Проведемо порівняння запропонованої моделі з моделлю без фрагментації, закладеної, наприклад, у протокол IGRP, щодо забезпечення мінімальної затримки пакета.

В рамках запропонованих моделі й методу проведемо розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації з контролем показників якості для мережі (рис. 1) за таких вихідних даних: відправник – вузол 1, одержувач – вузол 6; параметри трафіка наведені величиною його бігової інтенсивності 200 1/с і заданою затримкою передачі пакета  $t_{\text{зад}} = 40$  мс. Результати розрахунку мережі наведено на рис. 3, при цьому над кожною гілкою зазначено (зверху до низу) її пропускну здатність, інтенсивність трафіка, що передається, та затримку передачі відповідно.



**Рис. 2. Геометризація фрагменту польової складової частини ІТМ КП у момент часу t+1**

У табл. 1 наведено результати розрахунків для двох основних стратегій маршрутизації, а саме одношляхової та багатошляхової. За одношляхової маршрутизації шлях обслуговування трафіка визначається як найкоротший, а результати подані вектором  $\Lambda_v^{ou}$ . Під час розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації використовувалась запропонована модель ІТМ КП, а результати розрахунку представлені вектором  $\Lambda_v^{bu}$ . Для розрахунків були використані чотири варіанти параметрів мережі та трафіків, що обслуговуються. За величиною затримки передачі пакетів трафіка  $t_{прд}$  оцінювалась якість прийнятих рішень.



**Рис. 3. Результати розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації**

Порівняльний аналіз результатів розрахунку дає змогу зробити такі висновки:

- за невисокої інтенсивності зовнішнього трафіка порівняно з доступними ресурсами мережі ( $\lambda^{звн} = 100$  1/с) реалізація багатошляхової маршрутизації дає змогу зменшити затримку в середньому на 12%;

- за співвимірних величин необхідної та доступної пропускних здатностей вираш багатошляхової маршрутизації складає від 73% ( $\lambda^{звн} = 200$  1/с) до 85% ( $\lambda^{звн} = 300$  1/с);

- під час реалізації одношляхової маршрутизації, за умови нестачі ресурсів, трафік ( $\lambda^{звн} = 500$  1/с) отримав би відмову в обслуговуванні, тобто обмеження по жодному зі шляхів від вузла В1 до В6 не виконуються; водночас багатошляхова стратегія маршрутизації дала змогу в рамках запропонованої моделі обслужити цей трафік із заданими показниками якості зв'язку ( $t_{зад} = 40$  мс);

- в результаті розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації було забезпечено виконання вимоги  $T_k = 0$ ;

- в рамках запропонованої моделі під час розв'язання маршрутної задачі середні затримки пакетів вздовж незалежних шляхів були рівні між собою; наприклад, за інтенсивності вхідного трафіка 200 1/с (рис. 3) середні затримки під час передачі від вузла 1 (відправник) до вузла 6 (отримувач) були однаковими ( $t_{прд} = 27,4$  мс);

- під час розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації з гарантованим забезпеченням якості обслуговування було одночасно враховано два основних показники, а саме інтенсивність трафіка, яка вимагається, та середня затримка пакетів; результати розрахунків показали, що завантаження окремих трактів передачі не перевищувало значень їх пропускних спроможностей, а середня затримка пакетів вздовж кожного зі шляхів не перевищувала заданого (того, що вимагалось) значення; тобто визначені критерієм<sup>22</sup> вимоги з урахуванням обмежень було виконано.

---

<sup>22</sup> Лаврут О.О. Вибір критерію оцінювання якості управління потоками інформації у телекомунікаційній мережі мобільного компоненту перспективної системи зв'язку ЗС України. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2014. Вип. 3 (16). С. 113-115.

Таблиця 1

## Результати порівняльного аналізу різних стратегій маршрутизації

	Інтенсивність $\lambda^{\text{max}}$ (1/с)											
	100			200			300			500		
	пропускна спроможність	$\Delta_{\text{в}}^{\text{бш}}$	$\Delta_{\text{в}}^{\text{ош}}$	пропускна спроможність	$\Delta_{\text{в}}^{\text{бш}}$	$\Delta_{\text{в}}^{\text{ош}}$	пропускна спроможність	$\Delta_{\text{в}}^{\text{бш}}$	$\Delta_{\text{в}}^{\text{ош}}$	пропускна спроможність	$\Delta_{\text{в}}^{\text{бш}}$	$\Delta_{\text{в}}^{\text{ош}}$
V <sub>1</sub>	130	16	-	150	49,1	-	130	55,3	-	200	115,2	-
V <sub>2</sub>	380	48,3	100	400	98,6	200	370	175,3	300	480	263,5	-
V <sub>3</sub>	230	35,7	-	200	52,3	-	190	69,4	-	210	121,3	-
V <sub>4</sub>	220	25,9	100	200	32,9	-	310	116,9	300	280	121,8	-
V <sub>5</sub>	400	33,4	100	380	39,7	-	350	73,5	-	410	113,5	-
V <sub>6</sub>	150	15,8	-	150	18	-	130	26,5	-	170	64,8	-
V <sub>7</sub>	470	33,6	100	500	70,8	-	480	102,3	-	520	163,9	-
V <sub>8</sub>	370	28,2	-	470	45,5	-	450	112,8	300	490	129,6	-
V <sub>9</sub>	200	22,4	-	220	65,7	200	190	58,4	-	320	141,7	-
V <sub>10</sub>	180	15,8	-	200	18	-	170	26,5	-	250	64,8	-
$\Sigma_{\text{суд}}$	-	12,3	14	-	27,4	101,6	-	23,9	159,4	-	37,8	-

## **ВИСНОВКИ**

Сьогодні у силових структурах України відбувається активне переоснащення підрозділів на цифрові засоби зв'язку та автоматизації, що дає змогу надавати в інтересах пунктів управління різноманітні якісні інформаційно-телекомунікаційні сервіси.

На цьому етапі наявність у різних силових підрозділах різнотипних засобів зв'язку та телекомунікацій як військового, так і цивільного призначення потребує вирішення питання їх сумісності, надійності та забезпечення гарантованої якості під час виконання завдань за призначенням. Відповідно, актуальним напрямом досліджень є пошук нових підходів до управління різноманітним трафіком в інформаційно-телекомунікаційній мережі критичного призначення.

Огляд наявних технологій і механізмів управління мережними ресурсами показав, що більшість рішень у цій галузі ґрунтується на евристичних схемах або найпростіших комбінаторних і потокових моделях ІТМ КП, які здебільшого не відповідають вимогам системного характеру. Одним зі способів вирішення цієї проблеми вибрано тензорний підхід, який найбільш повно відповідає вимогам системотехнічних принципів і постулатів.

Запропоновано модель та метод багатошляхової маршрутизації передачі команди управління між різними вузлами (елементами) інформаційно-телекомунікаційної мережі критичного призначення. Модель дає змогу одночасно враховувати як структурні, так і функціональні параметри системи, зберігаючи цілісність розгляду самої системи. Застосування запропонованого методу дало змогу надати адаптивний характер процедурам фрагментації (дефрагментації) пакетів у вузлах мережі; реалізувати багатошляховий безпечельний спосіб доставки фрагментів пакета, що передається, з контролем показників QoS вздовж кожного з розрахованих шляхів; забезпечити аналітичний розрахунок мінімального часу доставки пакета відомої довжини між заданою парою вузлів мережі та максимальної довжини пакета, який може бути переданий між заданою парою вузлів мережі за визначений час

із використанням у вузлах мережі процедур адаптивної фрагментації (дефрагментації) пакетів.

Наведені модель та метод дають змогу забезпечити більш збалансоване завантаження мережі та підвищити продуктивність ГТМ КП відносно відомих моделей розв'язання маршрутних задач; під час розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації з гарантованим забезпеченням якості обслуговування вздовж кожного з розрахованих маршрутів для різних вихідних даних забезпечити вигоду за середньою багатошляховою затримкою залежно від інтенсивності трафіку відносно одношляхових моделей маршрутизації без фрагментації.

## **АНОТАЦІЯ**

В роботі проведено аналіз тенденцій розвитку та впровадження цифрових засобів зв'язку в силових структурах України. Показано, що розвиток системи зв'язку та автоматизації управління силових структур України має стійку тенденцію до всебічного розвитку та модернізації, переоснащення новітніми засобами зв'язку та телекомунікацій, переходу на сучасні цифрові технології.

Дослідження спрямовані на вирішення проблематики підвищення ефективності функціонування різнорідних, мультисервісних інформаційно-телекомунікаційних мереж критичного призначення за рахунок розв'язання задачі управління потоками інформації з гарантованим забезпеченням показників якості, особливо в умовах, які швидко змінюються.

Розглядаються модель та метод багатошляхової маршрутизації передачі команди управління між різними вузлами (елементами) інформаційно-телекомунікаційної мережі критичного призначення. Показано, що використання запропонованого методу є можливим як під час нарощування структури (її реорганізації), так і в критичних умовах. Наведено приклад розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації команди управління із забезпеченням мінімального часу доставки повідомлення (команди управління) між заданими вузлами мережі з контролем показників якості. Проведено

порівняльний аналіз запропонованої моделі з відомою моделлю без фрагментації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Климович К.О., Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Івко С.О. Визначення перспективних технологій в системах радіозв'язку та транкінгового зв'язку для подальшого використання в Збройних Силах України. *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса)*. 2016. Вип. 2 (6). С. 30–35.

2. Лаврут О.О. Вибір критерію оцінювання якості управління потоками інформації у телекомунікаційній мережі мобільного компоненту перспективної системи зв'язку ЗС України. *Наука і техніка Повітряних сил Збройних Сил України*. 2014. Вип. 3 (16). С. 113–115.

3. Лаврут О.О. Динамічний метод управління потоками інформації у фрагменті мобільного компоненту перспективної системи зв'язку в критичних умовах. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2012. № 6 (58). С. 202–207.

4. Лаврут О.О. Дослідження якості управління потоками інформації у моделі військової телекомунікаційної мережі представленої в тензорному вигляді. *Військово-технічний збірник*. 2015. Вип. 12. С. 27–33.

5. Лаврут О.О., Блажко Л.М. Математичне моделювання процесів функціонування фрагменту мобільного компоненту системи зв'язку ЗС України. *Системи обробки інформації*. 2011. Вип. 8 (98). С. 170–174.

6. Лаврут О.О. Метод динамічного управління потоками інформації з контролем якості передачі у телекомунікаційній мережі військового призначення. *Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2015. Вип. 10. С. 158–169.

7. Лаврут О.О. Метод управління потоками інформації у фрагменті мобільного компоненту перспективної системи зв'язку в

надзвичайних ситуаціях, що змінюються. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2012. № 1 (7). С. 94–101.

8. Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Климович О.К., Здоренко Ю.М. Новітні технології та засоби зв'язку у Збройних Силах України: шлях трансформації та перспективи розвитку. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. Вип. 1 (34). С. 91–101. DOI: 10.30748/nips.2019.34.13.

9. Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Мартиненко А.М. Описание системы спутниковой связи как сложного динамического объекта при помощи метода Крона. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2010. Вип. 7 (48). С. 251–256.

10. Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Климович О.К. Перспективи розвитку автоматизованих систем управління тактичної ланки управління Сухопутних військ Збройних Сил України. *Системи обробки інформації*. 2014. Вип. 5 (121). С. 116–120.

11. Лаврут О.О., Климович К.О., Тарасюк М.Л., Антонюк О.Л. Стан та перспективи застосування сучасних технологій та засобів радіозв'язку в Збройних Силах України. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. Вип. 1 (49). С. 42–49.

12. Лаврут О.О., Стрюк О.Ю., Польщиков К.О. Тензор – можлива модель опису системи супутникового зв'язку як складного динамічного об'єкта. *Системи озброєння і військова техніка*. 2009. Вип. 4 (20). С. 131–134.

13. Лаврут Т.В., Ожаревський В.А. Інформаційна технологія управління інформаційним обміном в телекомунікаційній мережі критичного призначення. *Science, engineering and technology: global trends, problems and solutions : conference proceedings*, September 25–26, 2020. Prague : Baltija Publishing, 2020. P. 52–55. DOI: 10.30525/978-9934-588-79-2-1.12.

14. Лемешко О.В., Євдокименко М.О., Єременко О.С. Оптимізаційна модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Вип. 2 (60). С. 152–159. DOI: 10.26906/SUNZ.2020.2.152.



15. Пузиренко О.Г., Івко С.О., Лаврут О.О. Аналіз процесу управління ризиками інформаційної безпеки в забезпеченні живучості інформаційно-телекомунікаційних систем. *Системи обробки інформації*. 2014. Вип. 8 (124). С. 128–134.

**Information about authors:**

**Lavrut O. O.,**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,  
Professor at the Department of Tactics  
Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy  
32, Heroes of Maidan str., Lviv, 79026, Ukraine

**Lavrut T. V.,**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,  
Senior Research Associate at the Research Department  
of Military Command Systems  
Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy  
32, Heroes of Maidan str., Lviv, 79026, Ukraine