

Олександр Олександрович Лаврут (доктор технічних наук, доцент)¹

Тетяна Валеріївна Лаврут (кандидат географічних наук, доцент)¹

Юрій Миколайович Здоренко (кандидат технічних наук)²

Владислав Олександрович Колесник¹

¹Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна

²Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна

МОДЕЛЬ ТА МЕТОД УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПОТОКАМИ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ТАКТИЧНОЇ ЛАНКИ УПРАВЛІННЯ

Проводиться огляд та аналіз тенденцій розвитку і застосування новітніх технологій та засобів зв'язку в підрозділах тактичної ланки управління Збройних Сил України. Показано, що в державі ведеться робота щодо створення ефективної системи оперативного управління, зв'язку, розвідки та спостереження (C4ISR), яка б відповідала вимогам НАТО. Технологічно основою для реалізації даної системи повинна стати єдина автоматизована система Збройних Сил України. Зазначається, що проблемним питанням постає необхідність розробки нових технологічних рішень управління мережевими ресурсами із забезпеченням їх збалансованого завантаження та гарантованої якості обслуговування різномірних трафіків у такій системі. Проводиться аналіз існуючих моделей вирішення основних мережових задач. Показано, що тензорний підхід дозволяє вирішувати проблеми які з'являються під час урахування взаємопов'язаних і одночасно суперечливих вимог, які виникають під час управління різномірним трафіком у військовій телекомунікаційній мережі. Розроблено модель та метод багатошляхової маршрутизації передачі команд управління між різними вузлами (елементами) інформаційно-телекомунікаційної мережі з урахуванням потокового характеру трафіка. Наведено результати розрахунків мережі за допомогою розроблених моделі та методу. Проведена порівняльна оцінка розробленої моделі з відомими.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, інформаційний обмін, багатошляхова маршрутизація, управління трафіком, тактична ланка управління, тензорний аналіз мереж, мережецентричний принцип, єдине інформаційне поле.

Вступ

Відмінною рисою розвитку сучасної системи зв'язку і автоматизації управління Збройних Сил України є стійка тенденція до переоснащення та модернізації військ зв'язку новітніми високотехнологічними засобами зв'язку та перехід на сучасні цифрові технології. Даний напрям розвитку визначений як пріоритетний «Візією Генерального штабу ЗС України щодо розвитку Збройних Сил України на найближчі 10 років» [1]. Сьогодні керівництвом ЗС України велика увага приділяється розвитку та вдосконаленню стаціонарної та польової компоненти системи зв'язку та автоматизації управління всіх ланок управління, що відповідає реалізації положень Стратегічного оборонного бюлетеня України [2], а саме: створення ефективної системи оперативного управління, зв'язку, розвідки та спостереження (C4ISR), яка б відповідала стандартам НАТО, та забезпечення її інтеграції з Єдиною системою управління оборонними ресурсами (Defense resources management information system) [1-8].

Постановка проблеми. Виходячи з цього інформаційно-телекомунікаційна мережа військового призначення (ІТМ ВП) може розглядатись як складна організаційно-технічну

система. На сучасному етапі до числа основних факторів складності ІТМ ВП необхідно віднести: оновлення технічної оснащеності, багатоаспектність, високу розмірність системи в цілому і різномірність її окремих елементів та підсистем, збільшення динаміки виконання функціональних задач, стохастичність процесів інформаційного обміну, що протікають у ІТМ ВП, мультисервісність, зростання об'єму та різноманітності даних, які циркулюють між споживачами інформації, взаємодію ІТМ ВП з іншими складними інформаційно-аналітичними та автоматизованими системами управління, а також наявність впливу зовнішніх, як правило нестабільізуючих, факторів. В подібній організаційно-технічній системі задачі оптимізації різного рівня складності безперервно виникають і повинні оперативно вирішуватись.

В теорії управління інформаційними потоками в ІТМ ВП накопичено значний досвід. Розгляду питань управління мережами зв'язку присвячували свої наукові роботи велика кількість сучасних вітчизняних та закордонних вчених, серед яких Л. Клейнрок [9], Д. Бертсекас, Р. Галлагер [10], Г.А. Кучук [11], О.В. Лемешко [12, 13] та ін.

Однак, не дивлячись на це, підвищені вимоги

до ІТМ ВП, стрімкий ріст інфокомунікацій та розвиток технічних засобів їх забезпечення сприяють тому, що задача управління процесом інформаційного обміну у військових інформаційно-телекомунікаційних мережах постійно та суттєво видозмінюється через необхідність одночасного врахування багатьох факторів. Відповідно відкритим залишається і питання побудови адекватних математичних моделей та методів управління інформаційною взаємодією в ІТМ ВП між виділеними в ній сегментами.

Аналіз показав, що в рамках передових концепцій мережевого управління визначені лише загальні підходи до усунення обмежень існуючих протокольних рішень з управління мережевими ресурсами, пов'язані з комплексним розв'язанням задач багатошляхової маршрутизації та забезпечення якості обслуговування різнотипних трафіків користувачів одночасно за рядом швидкісних та ймовірно-часових показників QoS. Детальний огляд існуючих підходів математичного опису процесів управління мережевими ресурсами, свідчить, що під час вирішення маршрутних задач коректно математично описати процеси динаміки стану (зміни структури під час бою), врахувати мультисервісність і гарантовано забезпечити якості зв'язку класичними методами практично неможливо. Питання оцінки якості управління різнорідними потоками інформації в мультисервісних мережах також залишається складним [12-15].

З огляду на це, з точки зору практики, постає питання необхідності пошуку нових технологічних рішень управління мережевими ресурсами із забезпеченням їх збалансованого завантаження і гарантованої якості обслуговування різнорідних трафіків у мультисервісних ІТМ ВП. Такі рішення з управління інформаційним обміном в ІТМ ВП повинні базуватися на моделях і методах управління потоками даних, здатних забезпечити ефективне використання мережевого ресурсу. Це визначає необхідність удосконалення інфокомунікаційних систем в частині управління потоками даних на нових технологічних і теоретичних принципах, які використовують сучасний математичний апарат. Тобто існує потреба в розробці моделей та методів управління інформаційними потоками в ІТМ ВП.

Метою статті є розробка моделі та методу управління інформаційними потоками у телекомунікаційній мережі тактичної ланки управління за допомогою використання тензорного підходу для забезпечення вимог щодо оперативності та якості обміну інформацією в інформаційно-телекомунікаційних мережах військового призначення.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сьогодні при моделюванні ІТМ ВП і вирішенні основних мережевих задач застосовуються підходи, що базуються на використанні графових моделей і комбінаторних методів розрахунку, поточкових моделей і методів аналізу мереж, моделей конфліктних систем, нейронних мереж,

апарату продукуваних функцій, теорії масового обслуговування, моделей на основі нечіткої логіки, мереж Петрі, теоретико-ігрових моделей, а також апарату марківських керуваних випадкових процесів та інтегрально-диференціальних рівнянь стану, де задачі функціонального та структурного синтезу зазвичай вирішуються незалежно, як правило, визначаючи один для одного вихідні дані, прийняті як допущення й обмеження. Так, моделі і методи, що орієнтовані на забезпечення QoS, не дозволяють повною мірою описати процеси балансування навантаження в ІТМ ВП. І навпаки, при спробі забезпечити врахування QoS, в моделях, що адекватно описують розв'язання задач балансування навантаження, обчислювальна складність істотно підвищується. Тобто, такі моделі не дозволяють забезпечити цілісне врахування найважливіших факторів, які істотно впливають на якісне вирішення задач управління інформаційним обміном між елементами ІТМ ВП [11-18].

З точки зору багатоаспектного розгляду математично точно описати телекомунікаційну систему як цілісний об'єкт, базуючись на тому, що теорія дослідження ІТМ ВП повинна бути інваріантна до способу опису його внутрішньої структури, можливо за допомогою певного каркаса, який дозволить стикувати моделі, отримані під час розгляду різних аспектів однієї системи [12-15, 19].

Тензорний підхід до моделювання складних систем найбільш повно відповідає вимогам системотехнічних принципів та постулатів. Він дозволяє вирішувати проблеми, що стосуються урахування взаємопов'язаних і одночасно суперечливих вимог, які виникають (висуваються) під час управління інформаційним обміном в ІТМ ВП [12-15, 19, 20]. Даний підхід повинен включати комплекс моделей та методів, що забезпечать ефективне управління мережевими ресурсами.

Тензорний аналіз дозволяє забезпечити граничну цілісність під час математичного опису і дослідження ІТМ ВП, що досягається завдяки багатоаспектній природі математичних моделей, які отримуються на її основі. Системні властивості ІТМ ВП можна дослідити, спираючись на тензорну модель системи, незалежно від можливих координатних систем її розгляду. За необхідності, аналізуючи систему з різних аспектів розгляду, можна отримати необхідну інтерпретацію тензорної моделі шляхом проєкції тензорів, які утворюють дану модель, в ту чи іншу систему координат. У такому випадку, рівняння поведінки ІТМ ВП набувають векторно-матричної форми, при чому кожній частковій системі координат відповідає свій аспект розгляду.

Модель багатошляхової маршрутизації передачі команд управління між різними вузлами (елементами) інформаційно-телекомунікаційної мережі з урахуванням потокового характеру трафіка

Основною вимогою до функціонального опису ІТМ ВП є обов'язковий облік при моделюванні параметрів і характеристик, за якими оцінюється якість обслуговування того чи іншого користувача трафіку телекомунікаційної системи:

- інтенсивності трафіку;
- номінальної, середньої і максимальної довжини пакета;
- середньої затримки пакетів;
- джиттера (варіації затримки), що оцінюється через середньоквадратичне відхилення або дисперсію середньої затримки передачі пакетів;
- ймовірності правильної доставки пакетів;
- ймовірності своєчасної доставки пакетів;
- коефіцієнта готовності мережі (шляху передачі).

Під час обслуговування мережею агрегованого потоку з постійною довжиною переданих пакетів (команди управління) в основу функціонального опису ІТМ ВП може бути покладено рівняння поведінки окремо взятого елемента системи, отримане моделюванням кожної гілки мережі системою масового обслуговування типу М/М/1 – одноканальною моделлю з пуассоновським потоком заявок і показовим законом розподілу часу обслуговування [12-15]:

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

в якому φ – пропускна здатність модельованого тракту передачі, яка вимірюється в байт/с, $d = \lambda h$ – інтенсивність трафіку, що передається (байт/с), λ – пакетна інтенсивність трафіку (1/с), h – середня довжина пакета (байт) і τ – середня затримка передачі пакета (с) в цьому тракту.

Слід зазначити, що вираз (1) є сумою наступних двох доданків: часу передачі пакета (повідомлення, кадра та ін.)

$$\tau_{\text{прд}} = \frac{h}{\varphi}, \quad (2)$$

і часу очікування в черзі

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

Окрім цього, величина φ може характеризувати не номінальну, а зарезервовану пропускну здатність тракту для обслуговування конкретного трафіку або агрегованого потоку.

Під багатоаспектністю розгляду системи будемо розуміти наявність нескінченної множини її поділу на елементи, а цілісність системи – наявність між різними її поданнями певного взаємозв'язку. В якості прикладу поділу ІТМ ВП на елементи візьмемо її опис як множин вузлів і трактів передачі. При цьому декомпозицію системи можна проводити більш детально, зокрема до БМП, танка, окремого військовослужбовця або складових апаратного зв'язку. Тобто, нумерація елементів у системі відповідатиме її різним складовим [14].

Для подальшого опису структури і моделювання в рамках дослідження було взято за основу фрагмент телекомунікаційної мережі тактичної ланки управління (ТМ ТЛУ) (рис. 1) та проведено його геометризацию (рис. 2).

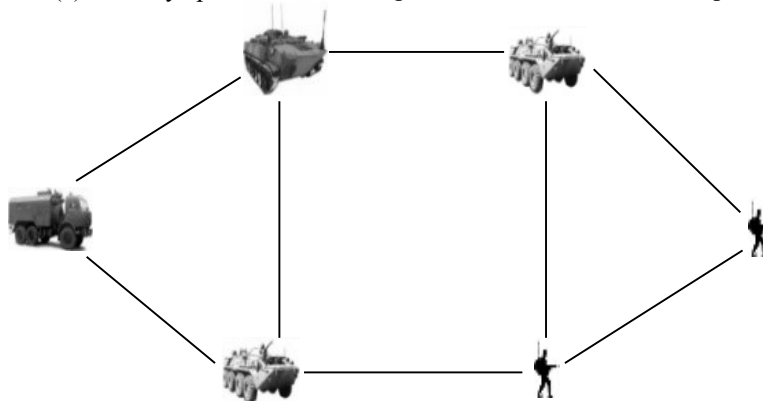


Рис. 1 Фрагмент телекомунікаційної мережі тактичної ланки управління

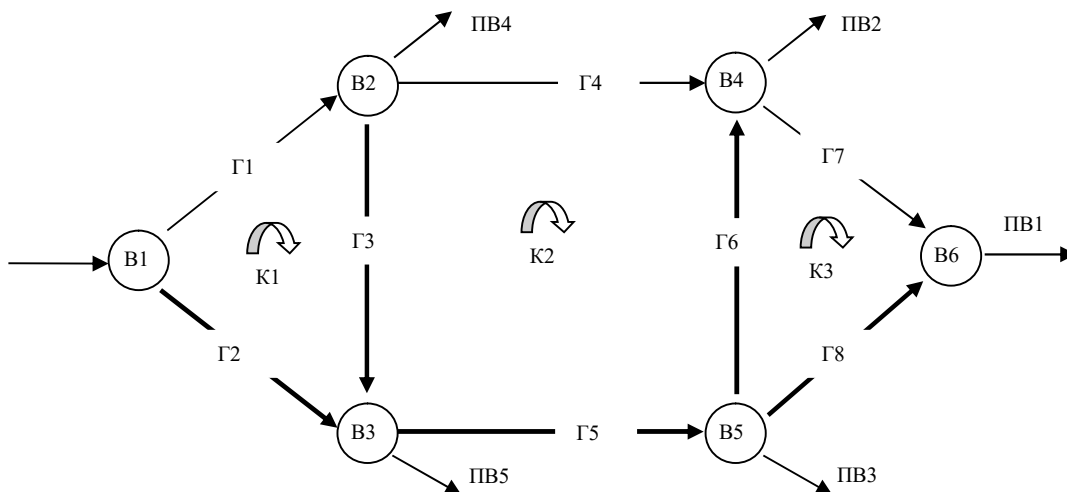


Рис. 2 Геометризація фрагменту телекомунікаційної мережі тактичної ланки управління

Топологічний опис даного фрагменту мережі здійснювався шляхом подання її структури одновимірним сімпліціальним комплексом, в якому множина нуль вимірних симплексів моделює вузли мережі, а множина одновимірних симплексів – лінії зв'язку. Елементи В1-В6 (у даному випадку) – командні пункти, окремі підрозділи, військовослужбовці.

За основу було взято процес передачі повідомлення (команди управління) між двома вузлами. В запропонованій мережі для розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації доставки команди управління пропонується тензорний підхід.

Виходячи з того, що об'єктом тензорного аналізу є дискретні простори, що складаються сукупністю розімкнених і замкнених шляхів (контурів і пар вузлів), при моделюванні будемо розглядати анізотропний простір-структуру. Припустимо, що В1-В6 – множина вузлів (рис. 2), Г1-Г8 – множина гілок, що моделює тракти передачі. Розмірність такого простору (структурний інваріант) визначається кількістю гілок (окремих трактів передачі) у мережі n . У зв'язку з цим множина структур, що відповідає окремим варіантам з'єднань n гілок, трактується як множина часткових систем координат у введеному n -мірному просторі. Перетворення ж структури мережі зі збереженням початкової кількості гілок або перехід від однієї сукупності незалежних шляхів до іншої трактується як перетворення системи координат. Тобто, кожен шлях через свою незалежність визначає в рамках розглянутого простору-структури координатну вісь. Орієнтація вузлових пар і контурів при цьому задається в загальному випадку довільно [14].

Під час багатоаспектного опису системи в n -мірному просторі-структурі можливий розгляд декількох систем координат (СК). Основною вимогою під час вибору цих СК є їх інформативність. Інакше кажучи в них мають бути відомі проекції різних компонент тензора R , чи ті, що треба знайти, базуючись на яких, можна розрахувати необхідні компоненти в тій чи іншій системі координат.

Розглянемо дві системи координат. Перша система координат – гілки мережі. В ній структура відповідає окремими не з'єднаними між собою гілками. Друга – система координат незалежних контурів і пар вузлів (КПВ) мережі, яка відповідає реальній структурі системи, що моделюється. Такий вибір системи координат зумовлений тим, що в СК гілок мережі необхідно розрахувати невідомі величини: інформаційне завантаження і 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 [14].

Шляхи ПВ1-ПВ5 і К1-К3 визначають у n -мірному просторі базис системи координат, який відповідає структурі мережі (рис. 2). Через цей

базис можна виразити будь-який інший шлях мережі, при чому алгебраїчною сумою шляхів буде шлях, який проходить вздовж всіх доданків суми відповідно до їх орієнтації. Наприклад, шлях з В1 у В2 можна подати у вигляді алгебраїчної суми шляхів К1 та ПВ4 [14].

Зміна порядку з'єднання гілок мережі (рис. 2) визначає кінцевий набір структур у загальному випадку: кожен з інваріантом є кількістю гілок, а кількість незалежних пар вузлів і контурів може змінюватися.

Структура наведеної мережі визначає простір. Його розмірність відповідає кількості гілок мережі. Системою координат при цьому є множина базисних контурів та вузлових пар мережі.

Для опису мережі візьмемо два параметри: довжини повідомлень і час їх передачі. У введеному просторі (рис. 2) проведемо тензорний опис системи за допомогою одновалентного тензора довжин повідомлень S з 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 $R = S \otimes T$ [12 - 14].

В такому випадку кожній структурі мережі відповідає своя кількість координат, при цьому набір координатних шляхів завжди дорівнює кількості гілок [12 - 14].

Скористаємось законами координатного перетворення:

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

за умови виконання ортогональності

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

Контраваріантний характер мають параметри мережі, які при переході від однієї СК до іншої підпорядковуються умовам збереження потоку, наприклад, інтенсивність трафіку, довжина пакету тощо. Коваріантний характер мають адитивні метрики, наприклад, середня затримка, джитер, вартість тощо. Прийнято коваріантні тензори позначати нижніми індексами, а контраваріантні – верхніми.

Взаємозв'язок контраваріантних і коваріантних компонентів тензора формалізуємо у прямому записі:

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

де $M = [G]^{-1}$.

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

Відповідно до фізики процесів (2) інформаційного обміну в мережі компоненти s^i_Γ і t^i_Γ векторів S_Γ і T_Γ пов'язані наступним співвідношенням:

$$s^i_\Gamma = m^{ii}_\Gamma t^i_\Gamma \quad (i = \overline{1, n}), \quad (7)$$

де m^{ii}_Γ – частина пропускнуої спроможності i -ї гілки мережі.

Функціональним інваріантом пропонованої моделі, відповідно до постулату другого узагальнення Г. Крона [19], виступає тензорне рівняння, яке одержане в результаті узагальнення рівняння (7) і зберігає свою форму незмінною незалежно від координатної системи розгляду мережі:

$$S = MT \quad (8)$$

де M – тензор пропускних спроможностей координатних шляхів мережі, проекції якого в окремій частковій системі координат має вигляд матриці розмірністю $n \times n$.

Розглянувши вираз (8), дійдемо висновку, що тензор M є двічі контраваріантним метричним тензором, а його проекції при зміні координатної системи перетворюються як:

$$M_{\Gamma} = CM_{\text{к.п.в.}}C^t \text{ та } M_{\text{к.п.в.}} = A^t M_{\Gamma} A, \quad (9)$$

де M_{Γ} , $M_{\text{к.п.в.}}$ – проекції тензора M в системах координат гілок мережі та незалежних контурів і вузлових пар.

Як зазначалося вище, форма запису рівнянь поведінки мережі в цілому повинна відповідати рівнянню поведінки окремих елементів (постулат першого узагальнення Г. Крона) [19], що обумовлює заміну системи скалярних рівнянь рівняннями векторно-матричного виду. Відповідно до цього, залишається незмінним в системі координат незалежних контурів і пар вузлів вигляд функціонального рівняння мережі:

$$S_{\text{к.п.в.}} = M_{\text{к.п.в.}} T_{\text{к.п.в.}} \quad (10)$$

Для забезпечення існування шуканих рішень та однозначної їх інтерпретації, матричне рівняння (10) повинно бути системою з n скалярних рівнянь з n невідомими. Оскільки характер розв'язуваної задачі з розрахунку шуканих параметрів має істотне значення, n невідомих можуть довільно перерозподілятися між складовими векторів $S_{\text{к.п.в.}}$ та $T_{\text{к.п.в.}}$.

Таким чином, запропонована модель дозволяє однозначно враховувати як структурні, так і функціональні параметри системи. При цьому цілісність її розгляду зберігається.

Як показує досвід, при побудові сучасних ІТМ військового призначення необхідно враховувати різні моделі трафіка. Тому, розроблена модель багатошляхової маршрутизації передачі команди управління в однопродуктивній двополосній мережі тактичної ланки управління, як поодинокого повідомлення не є достатньою.

Для формалізації потокового характеру трафіка попередня модель мережі буде доповнена. Під час розгляду функціональної сторони моделі фрагменту ТМ ТЛУ поряд із вже відомими параметрами трафіка (початковий розмір пакета (повідомлення) s і час його передачі t) будуть прийняті також до уваги ряд додаткових параметрів – бітова інтенсивність надходження пакетів z , вимірювана, наприклад, у байт/с; пакетна інтенсивність трафіка u , вимірювана в пакетах/с. Таким чином, у введеному n -мірному просторі проведемо тензорну інтерпретацію мережі за допомогою одновалентного тензора

величин бітової інтенсивності трафіка Z з компонентами z^m , одновалентного тензора величин пакетів (фрагментів) S з компонентами s^i , одновалентного тензора затримок передачі T з компонентами t_j , а також тензора третьої валентності R , двічі контраваріантного й один раз коваріантного, координати якого розраховуються, виходячи з виразу:

$$r_j^{im} = z^m s^i t_j, \quad (m, i, j = \overline{1, n}), \quad (11)$$

де z^m – бітова інтенсивність трафіка, що передається по m -му координатному шляху, вимірювана в байт/с;

s^i – величина пакета (фрагмента), переданого через i -й координатний шлях, вимірювана в байтах;

t_j – затримка передачі пакета (фрагмента) в j -му координатному шляху, вимірювана в секундах.

Кожній структурі мережі відповідає свій набір координат (11). У прямому позначенні вираз (11) приймає вигляд $R = Z \otimes S \otimes T$.

Також візьмемо до уваги наступну залежність:

$$z_{\Gamma}^i = u_{\Gamma}^i s_{\Gamma}^i \quad (i = \overline{1, n}) \quad (12)$$

де u_{Γ}^i – пакетна інтенсивність трафіка, тобто кількість пакетів за секунду, що передається по i -й гілці мережі.

Важливо зазначити, що при фрагментації пакетів у вузлі з розподілом його фрагментів по вихідних гілках пакетна інтенсивність трафіка залишається постійною, тоді як бітова інтенсивність (z_{Γ}^i) змінюється.

Як і в попередній моделі, до уваги беруться дві системи координат. Перша – система координат гілок мережі, що відповідає структурі окремих несполучених між собою трактів системи, а друга – координати пар вузлів і незалежних контурів мережі, що відповідає реальній структурі системи, яка розглядається. У системі координат незалежних контурів і пар вузлів проекції тензорів Z , S і T знаходять необхідні вихідні дані для розв'язання наступних задач, а саме: початковий розмір пакетів у трафіку, величину користувальницького трафіка та міжкінцеву затримку передачі.

Контраваріантний закон перетворення тензора Z формалізуємо за допомогою співвідношення $Z_{\Gamma} = CZ_{\text{к.п.в.}}$, де Z_{Γ} , $Z_{\text{к.п.в.}}$ – проекції одновалентного тензора інтенсивностей трафіка Z , що мають розмірності n у введених раніше координатних системах гілок мережі, а також незалежних контурів і пар вузлів [14].

У свою чергу, вектори Z_{Γ} і $Z_{\text{к.п.в.}}$ мають складові:

$$Z_{\Gamma} = \begin{bmatrix} z_{\Gamma}^1 \\ z_{\Gamma}^i \\ z_{\Gamma}^n \end{bmatrix}; \quad Z_{\text{к.п.в.}} = \begin{bmatrix} Z_{\text{к.п.в.}}^k \\ Z_{\text{к.п.в.}}^p \end{bmatrix}; \quad Z_{\text{к.}} = \begin{bmatrix} z_{\text{к.}}^1 \\ z_{\text{к.}}^j \\ z_{\text{к.}}^r \end{bmatrix}; \quad Z_{\text{п.в.}} = \begin{bmatrix} z_{\text{п.в.}}^1 \\ z_{\text{п.в.}}^p \\ z_{\text{п.в.}}^s \end{bmatrix},$$

де z_{Γ}^i – бітова інтенсивність трафіка, яка передається i -ю гілкою мережі;

$Z_{\text{к.}}$, $Z_{\text{п.в.}}$ – вектори величин трафіка, що протікає в контурах мережі і надходить на її вузли розмірностей r та s відповідно;

z_k^j – бітова інтенсивність трафіка в j -му контурі мережі;

$z_{п.в.}^p$ – бітова інтенсивність зовнішнього трафіка, що надходить у мережу та вибуває з неї через p -ту пару вузлів (поліосів) мережі.

В якості функціонального інваріанту запропонованої моделі можна розглядати тензорні рівняння, які отримані шляхом узагальнення рівняння (12) та, незалежно від координатної системи розгляду мережі, зберігають свою форму незмінною:

$$Z = U S, \quad (13)$$

де U – двовалентний змішаний тензор пакетної інтенсивності трафіка, проєкції якого у довільній системі координат мають вигляд матриці розміру $n \times n$.

Слід зазначити, що в координатній системі гілок тензор U має вигляд діагональної матриці.

Вихідними даними для синтезу методу виступають величини доступних пропускних спроможностей окремих гілок мережі, подані у вигляді діагональних елементів матриці $M_{г.}$. Необхідні параметри якості обслуговування інформаційного трафіка – задана бітова інтенсивність ($z_{зад.}$), вихідна величина пакета ($s_{вих.}$) і задана затримка передачі ($t_{зад.}$). Результатом роботи методу є розрахунок координат матриці $M_{г.}$, що визначає порядок резервування мінімально необхідної величини пропускної спроможності гілок мережі під час розподілу по них інформаційного трафіка. Тоді, відповідно до виразу:

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

де $\begin{bmatrix} M_{к.п.в.}^{(1)} & M_{к.п.в.}^{(2)} \\ M_{к.п.в.}^{(3)} & M_{к.п.в.}^{(4)} \end{bmatrix} = M_{к.п.в.}$

має місце співвідношення

$$S_{п.в.} = M_{к.п.в.}^{(3)} T_k + M_{к.п.в.}^{(4)} T_{п.в.} \quad (15)$$

Рівність нулю першого доданка через виконання умови $T_k=0$ перетворить вираз (15) до вигляду:

$$\begin{bmatrix} S_{п.в.}^{(1)} \\ S_{п.в.}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{к.п.в.}^{(4,1)} & M_{к.п.в.}^{(4,2)} \\ M_{к.п.в.}^{(4,3)} & M_{к.п.в.}^{(4,4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{п.в.}^{(1)} \\ T_{п.в.}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

де $\begin{bmatrix} S_{п.в.}^{(1)} \\ S_{п.в.}^{(2)} \end{bmatrix} = S_{п.в.}$; $\begin{bmatrix} M_{к.п.в.}^{(4,1)} & M_{к.п.в.}^{(4,2)} \\ M_{к.п.в.}^{(4,3)} & M_{к.п.в.}^{(4,4)} \end{bmatrix} = M_{к.п.в.}^{(4)}$; $\begin{bmatrix} T_{п.в.}^{(1)} \\ T_{п.в.}^{(2)} \end{bmatrix} = T_{п.в.}$.

У виразі (16) компоненти вектора $S_{п.в.}$ початково відомі, при цьому перший компонент $S_{п.в.}^{(1)}$ належить до поліосів мережі, тобто вузлів, через які трафік надходить у мережу або вибуває з неї. Другий компонент $S_{п.в.}^{(2)}$ має відношення до вузлів мережі, що залишилися. Відповідно, зовнішній трафік через ці вузли з причини

двополюсності мережі за визначенням дорівнює нулю.

Компоненти вектора $T_{п.в.}$ за умовами задачі частково відомі – вектор $T_{п.в.}^{(1)}$, що визначає вимоги до граничної затримки передачі пакета, а частково невідомі – вектор $T_{п.в.}^{(2)}$. Компоненти матриці $M_{к.п.в.}^{(4)}$ необхідно розрахувати.

Виходячи з виразу (16), можна одержати систему двох матричних рівнянь

$$S_{п.в.}^{(1)} = M_{к.п.в.}^{(4,1)} T_{п.в.}^{(1)} + M_{к.п.в.}^{(4,2)} T_{п.в.}^{(2)} \quad (17)$$

$$S_{п.в.}^{(2)} = M_{к.п.в.}^{(4,3)} T_{п.в.}^{(1)} + M_{к.п.в.}^{(4,4)} T_{п.в.}^{(2)} \quad (18)$$

Рівність нулю вектору $S_{п.в.}^{(2)}$, дозволяє з рівняння (18) одержати вираз для розрахунку вектору $T_{п.в.}^{(2)}$:

$$T_{п.в.}^{(2)} = -[M_{к.п.в.}^{(4,4)}]^{-1} M_{к.п.в.}^{(4,3)} T_{п.в.}^{(1)},$$

підставляючи який в рівняння (17), одержуємо нерівність:

$$S_{п.в.}^{(1)} \leq \left(M_{к.п.в.}^{(4,1)} - M_{к.п.в.}^{(4,2)} [M_{к.п.в.}^{(4,4)}]^{-1} M_{к.п.в.}^{(4,3)} \right) T_{п.в.}^{(1)} \quad (19)$$

Якщо в процесі розв'язання задачі на етапі побудови моделі і формування вектору $S_{п.в.}$ як опорний вузол вибрати один з поліосів мережі, то розмірність вектору $S_{п.в.}^{(1)}$, дорівнюватиме одиниці. Це дозволяє у виразі (19) визначити:

$$S_{п.в.}^{(1)} = s_{вих.} \text{ та } T_{п.в.}^{(1)} = t_{зад.}$$

Виконання умов нерівності (19) гарантує відповідність вимогам, що стосуються величини затримки передачі пакетів у мережі. На основі отриманих вище результатів можна визначити наступну послідовність для розрахунку багатошляхової маршрутизації інформаційного трафіка з підтримкою вимог щодо гарантованої якості обслуговування [14].

По-перше, здійснюється попередня оцінка можливості прийняття до обслуговування мережею інформаційного трафіка із заданими параметрами якості. Оцінка здійснюється шляхом розрахунку мінімального часу багатошляхової передачі пакета заданої довжини з використанням усіх доступних мережевих ресурсів. У рамках запропонованої тензорної моделі через відомі вектори $S_{п.в.}$ і T_k , відповідно, розраховується вектор $T_{п.в.}^n$:

$$T_{п.в.}^n = [M_{к.п.в.}^{(4)д}]^{-1} S_{п.в.} - [M_{к.п.в.}^{(4)д}]^{-1} M_{к.п.в.}^{(3)д} T_k.$$

За значеннями координат $T_{п.в.}^n$ оцінюється мінімальна затримка передачі пакета заданої довжини. Також визначаються відповідні довжини пакетів (фрагментів) у кожній гілці мережі. Крім того, проводиться розрахунок для кожної гілки мережі величини максимальної пакетної інтенсивності $u_i^г$, яку вона може обслужити за відповідних значень довжини фрагмента $s_i^г$ та максимальної бітової інтенсивності трафіка $z_i^г$, що, у свою чергу, не може перевищувати пропускну спроможність гілки $m_i^г$.

Під час розподілу трафіка, проводячи фрагментацію пакетів у вузлах, його пакетна інтенсивність залишається постійною, тобто

однаковою для всіх гілок, через які транспортується трафік мережею. Для запобігання перевантаження гілок мережі за максимально можливою пакетною інтенсивністю трафіка, що надходить у мережу, приймається мінімальне значення з множини величин пакетних інтенсивностей $u_{i_r}^1$ у гілках мережі. За розрахованою пакетною інтенсивністю визначається максимально можлива величина бітової інтенсивності z (12), з якою трафік може обслуговуватися мережею.

Якщо оцінювана величина затримки пакета і бітова інтенсивність трафіка відповідають вимозі вихідних даних, то інформаційний трафік приймається мережею до обслуговування, у протилежному випадку – отримує відмову. У випадках, коли питання перевірки наявності доступних мережевих ресурсів не є гострим, оцінка можливості прийняття трафіка до обслуговування мережею може не проводитися, тобто перший етап методу може бути опущений.

По-друге, проводиться розрахунок величин пропускних спроможностей гілок мережі, що підлягають резервуванню шляхом визначення діагональних значень матриці M_r .

Розрахунок здійснюється відповідно до умови (19), але виходячи з того, що резервування мережевих ресурсів можна зробити, у загальному випадку, багатьма способами, формалізацію процедури резервування можна здійснити, наприклад, шляхом розв'язання такої оптимізаційної задачі. Необхідно мінімізувати вартість резервування мережевих ресурсів, значення якої виражене цільовою функцією:

$$P = Q^t M_r^{(\delta)} \quad (20)$$

де Q – вектор вагових (вартісних) коефіцієнтів розмірності n , координати δ_i якого характеризують питому вартість резервування одиниці пропускної спроможності i -ї гілки мережі;

$M(\delta)_r$ – вектор величин зарезервованих пропускних спроможностей гілок мережі, n координат якого відповідають діагональним елементам матриці M_r , тобто:

$$M_r = \text{diag}(M_r^{(\delta)}) \quad (21)$$

Мінімізацію функції (20) необхідно проводити відповідно до обмежень (19), обмеженням

$$M_r \leq M_r^d \quad (22)$$

а також обмеженням

$$Z_r \leq M_r^{(\delta)} \quad (23)$$

які вводяться для запобігання перевантаження гілок мережі, тобто бітова інтенсивність трафіка в кожній з них не має перевищувати пропускної спроможності гілки, виділеної для обслуговування даного трафіка.

У системі координат гілок мережі вираз (13) набуває вигляду:

$$Z_r = U_r S_r,$$

де вектор S_r розраховується відповідно до залежності

$$S_r = C S_{k.p.v} \quad (24)$$

в якій відповідно

$$S_{k.p.v} = \begin{bmatrix} S_k \\ S_{п.в} \end{bmatrix} \text{ та } S_k = M_{k.p.v}^{(2)} [M_{k.p.v}^{(4)}]^{-1} S_{п.в} \quad (25)$$

З урахуванням (24) і (25) обмеження (23) набуває вигляду:

$$U_r C \begin{bmatrix} M_{k.p.v}^{(2)} [M_{k.p.v}^{(4)}]^{-1} S_{п.в} \\ S_{п.в} \end{bmatrix} \leq M_r^{(\delta)} \quad (26)$$

Розрахунок вектора $M_r^{(\delta)}$ у рамках розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі з цільовою функцією (20) й обмеженнями (19), (21), (22), (26) гарантує мінімальну вартість резервування необхідних мережевих ресурсів. Подібна постановка задачі характерна для задач структурного синтезу, зокрема для задачі вибору топології і пропускних спроможностей трактів мережі. У зв'язку з цим для її розв'язання можна застосовувати відомі методи: метод заміни гілок, метод усунення гілок, метод насиченого перетину, а також будь-які модифікації перерахованих методів.

У процесі розв'язання задачі також необхідно відслідковувати виконання умови:

$$s_r^i \geq s_{min}, (i = \overline{1, n}) \quad (27)$$

де s_{min} – мінімальна величина пакета, що не підлягає подальшій фрагментації при його передачі в мережі.

Таким чином, запропоновано модель багатошляхової маршрутизації команд управління із потоковою моделлю трафіка.

Метод багатошляхової маршрутизації передачі команд управління між різними вузлами (елементами) інформаційно-телекомунікаційної мережі з урахуванням потокового характеру трафіка.

На основі розробленої моделі пропонується метод вирішення задачі багатошляхової маршрутизації команд управління.

Переваги запропонованого методу демонструємо на прикладі розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації в мережі з потоковим характером трафіка та із забезпеченням наперед заданої величини затримки передачі пакетів. Для цього необхідно, по-перше, розрахувати величини пропускних спроможностей гілок, що підлягають резервуванню при обслуговуванні даного трафіка, а по-друге, визначити порядок його розподілу у вузлах мережі шляхом фрагментації (дефрагментації) пакетів.

Розглянемо метод вирішення задачі багатошляхової маршрутизації у ІТМ ВП з потоковим характером трафіку і фрагментацією пакетів у вузлах мережі. Як приклад, здійснимо розрахунок конкретної задачі багатошляхової маршрутизації ТМ ТЛУ, структура якого наведена топологічною моделлю (рис. 1).

Вихідні дані:

- структура ІТМ ВП;
- величини доступних пропускних спроможностей окремих гілок мережі, які подані у вигляді діагональних елементів матриці:

$$M_{\Gamma}^d = \begin{pmatrix} 15000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 17000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 19000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 14000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9000 \end{pmatrix};$$

- напрямок передачі із вказанням витока і стока в мережі;

- необхідні параметри якості обслуговування інформаційного трафіка – задана бітова інтенсивність $z_{зад}=15000$ байт/с, вихідна величина пакета $s_{вих.}=500$ байт і задана затримка передачі $t_{зад} = 0,1$ с.

Обмеження: характерною рисою таких задач є наявність умови $T_k=0$, що накладається на контурні компоненти вектора $T_{к.п.в.}$.

Необхідно розрахувати: порядок надання трафіка в узлах мережі з фрагментацією (дефрагментацією) пакетів з урахуванням стану ІТМ ВП, що передбачає знаходження вектора S_{Γ} .

Мінімально необхідні величини пропускної спроможності гілок мережі, які підлягають резервуванню під час розподілу по них даного у вигляді матриці M_{Γ} .

Порядок розрахунку. Структура містить вісім гілок ($\Gamma 1-\Gamma 8$, $n=8$) і шість вузлів ($B1-B6$, $m=6$). Розмірність простору-структури n , що розглядається, дорівнює восьми. В цій структурі кількість незв'язних підмереж дорівнює одиниці, кількість незалежних пар вузлів відповідає п'яти, а чисельність незалежних контурів дорівнює трем.

Координати коваріантних і контраваріантних тензорів пов'язані між собою у різних системах координат розгляду мережі в такий спосіб:

$$\begin{cases} t_{\Gamma}^1 = t_1^{к.п.в.} + t_7^{к.п.в.}; \\ t_{\Gamma}^2 = t_8^{к.п.в.}; \\ t_{\Gamma}^3 = -t_7^{к.п.в.} + t_8^{к.п.в.}; \\ t_{\Gamma}^4 = t_2^{к.п.в.} + t_5^{к.п.в.} - t_7^{к.п.в.}; \\ t_{\Gamma}^5 = t_6^{к.п.в.} - t_8^{к.п.в.}; \\ t_{\Gamma}^6 = t_5^{к.п.в.} - t_6^{к.п.в.}; \\ t_{\Gamma}^7 = t_3^{к.п.в.} + t_4^{к.п.в.} - t_5^{к.п.в.}; \\ t_{\Gamma}^8 = t_4^{к.п.в.} - t_6^{к.п.в.}; \end{cases} \begin{cases} s_{\Gamma}^1 = s_{к.п.в.}^1; \\ s_{\Gamma}^2 = s_{к.п.в.}^1 + s_{к.п.в.}^4 + s_{к.п.в.}^5 + s_{к.п.в.}^6 - s_{к.п.в.}^7 + s_{к.п.в.}^8; \\ s_{\Gamma}^3 = s_{к.п.в.}^1 - s_{к.п.в.}^2 - s_{к.п.в.}^7 + s_{к.п.в.}^8; \\ s_{\Gamma}^4 = s_{к.п.в.}^2; \\ s_{\Gamma}^5 = s_{к.п.в.}^2 + s_{к.п.в.}^4 + s_{к.п.в.}^5 + s_{к.п.в.}^6; \\ s_{\Gamma}^6 = s_{к.п.в.}^2 + s_{к.п.в.}^3 + s_{к.п.в.}^5; \\ s_{\Gamma}^7 = s_{к.п.в.}^3; \\ s_{\Gamma}^8 = -s_{к.п.в.}^3 + s_{к.п.в.}^4. \end{cases}$$

Таким чином, матриці коваріантного і контраваріантного перетворення A і C мають наступний вигляд:

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

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

Відповідно до значень матриць A і C виконання умови їх ортогональності підтверджує тензорний

характер величин Z , S та T , а також різнотипність законів їх координатного перетворення.

У рамках доступних ресурсів затримка передачі пакета вихідної довжини (500 байт) складе 0,03 с, пакетна інтенсивність трафіка в другій гілці визначить максимально можливе значення пакетної інтенсивності на вході в мережу (32 пакета/с). Відповідно до виразу (12) максимальна бітова інтенсивність трафіка, що надходить у мережу, не має перевищувати 16000 байт/с. З урахуванням отриманих результатів попередніх розрахунків трафік може бути прийнятий мережею до обслуговування.

Розв'язок задачі наведений у вигляді матриці, що відповідає умовам (19), (21) – (23), (26), (27):

$$M_z = \begin{pmatrix} 10950 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5460 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 11730 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7830 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8040 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11020 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6930 \end{pmatrix},$$

Частина каналних ресурсів ($M_{\Gamma}^t - M_{\Gamma}$), що залишилася невикористаною, може бути залучена для обслуговування інших інформаційних трафіків.

Тоді відповідно до виразів:

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

$$S_{к} = M_{к.п.в}^{(1)} T_{к} + M_{к.п.в}^{(2)} T_{п.в}$$

$$T_{п.в}^t = [0,07 \ 0,049 \ 0,047 \ 0,021 \ 0,026];$$

$$S_{к}^t = [320,553 \ 248,048 \ 291,748].$$

Остаточне розв'язання задачі визначають розраховані з виразу $S_{\Gamma} = C S_{к.п.в}$ компоненти вектора S_{Γ} , які характеризують величини фрагментів, що передаються у кожній гілці мережі:

$$S_{\Gamma}^t = [320,553 \ 179,447 \ 72,505 \ 248,048 \ 251,952 \ 43,7 \ 291,748 \ 208,252].$$

Перша координата вектора $T_{п.в}$ визначила мінімальну затримку передачі (0,07 с), з якою шляхом фрагментації (дефрагментації) пакет довжиною 500 байт буде переданий від першого вузла до шостого (рис. 3). Як перевірку виконаємо

розрахунок максимальної пакетної і бітової інтенсивності трафіка, з якими пакети можуть надходити в мережу. Відповідно до виразу (12) маємо:

$$U = \text{diag}(34,16 \ 30,43 \ 161,78 \ 31,57 \ 31,91 \ 252,17 \ 31,19 \ 33,28).$$

Таким чином, за максимально можливу пакетну інтенсивність трафіка, що надходить у мережу, приймемо величину 30 пакетів/с, що відповідає $z = 15000$ байт/с за довжини пакета 500 байт. Подібний результат розв'язання задачі визначив для зовнішнього трафіка інтенсивністю 15000 байт/с і величиною пакета 500 байт наступний порядок його розподілу і фрагментації (дефрагментації) пакетів у вузлах мережі (рис. 3), реалізуючи тим самим багатошляхову стратегію маршрутизації. В системі Mathcad була створена імітаційна модель запропонованого методу. Результати моделювання та розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації показані на рис. 3.

На рис. 3 у кожному тракті зазначено напрямок передачі трафіка, розраховані величини – величина бітової інтенсивності трафіка (байт/с), довжина переданого пакета/фрагмента (байт), пакетна інтенсивність (пакетів/с) відповідно.

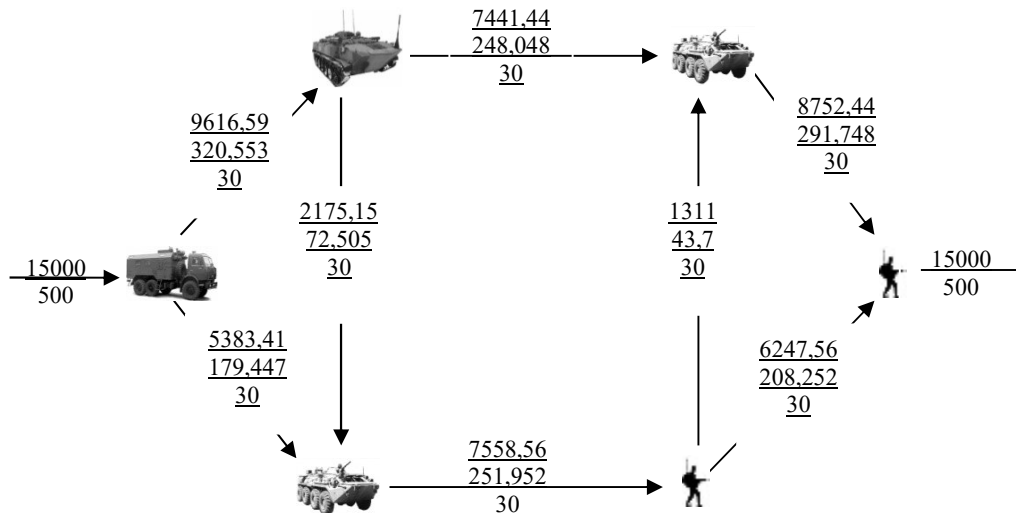


Рис. 3 Результати моделювання та розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації у фрагменті ІТМ ВП

Для транспортування пакетів трафіка в рамках отриманих розв'язань використовується чотири маршрути: перший (В1-В2-В4-В6), другий (В1-В2-В3-В5-В6), третій (В1-В2-В3-В5-В4-В6), четвертий (В1-В3-В5-В6).

Запропонований метод багатошляхової маршрутизації із потоковою моделлю трафіка, а також наведені приклади імітаційного моделювання при розв'язанні задачі багатошляхової маршрутизації команди управління на основі фрагменту ТМ ТЛУ свідчать про те, що тензорний підхід можна використовувати для розв'язання подібного роду задач з різним характером трафіка. На основі отриманих результатів можна проводити розрахунки задачі багатошляхової маршрутизації інформаційного трафіка із забезпеченням наперед

заданої величини затримки передачі пакетів, тобто з підтримкою вимог щодо гарантованої якості обслуговування. Адекватність запропонованих моделі і методу та доцільність їх реалізації доведена результатами розрахунку та імітаційного моделювання. В цілому блок-схема запропонованого методу подана на рис. 4.

Проведемо порівняння запропонованої моделі, з моделлю без фрагментації, закладеної, наприклад, у протокол IGRP, щодо забезпечення мінімальної затримки пакета. Оцінка проводилася за критерієм, який визначений у [21].

Як приклад, при оцінці запропонованої математичної моделі розв'яжемо задачу багатошляхової маршрутизації з контролем показників якості для фрагмент телекомунікаційної мережі (рис. 1).

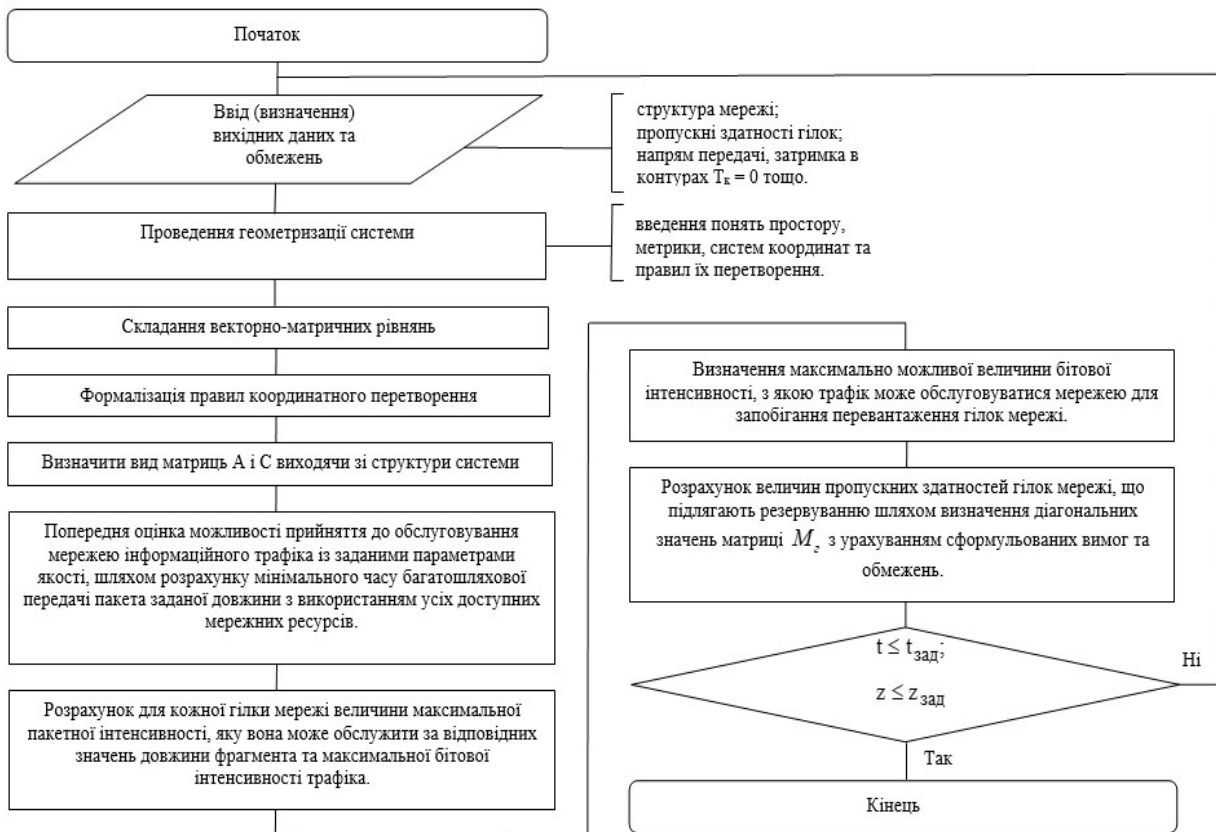


Рис. 4 Блок-схема запропонованого методу

В рамках структури представленої на рис. 1 розрахунки проводились за наступних вихідних даних: відправник – вузол 1, одержувач – вузол 6; параметри трафіка: величина бітової інтенсивності 200 1/с, а затримка передачі пакета $t_{\text{зад}}=30$ мс.

Результати розрахунку мережі наведено на рис. 5. В розривах над гілками вказано (зверху до низу) пропускну здатність, інтенсивність трафіка,

що передається, та затримка передачі відповідно.

В ході розв'язання задачі вхідний трафік розподілювався за чотирма шляхами, при цьому перший шлях забезпечив обслуговування трафіка інтенсивністю 7,4 1/с, другий шлях – 1,3 (1/с), третій шлях – 1,1 (1/с) і четвертий шлях – 8,8 (1/с). Затримка передачі пакетів при цьому складала 21,1 мс вздовж кожного з маршрутів.

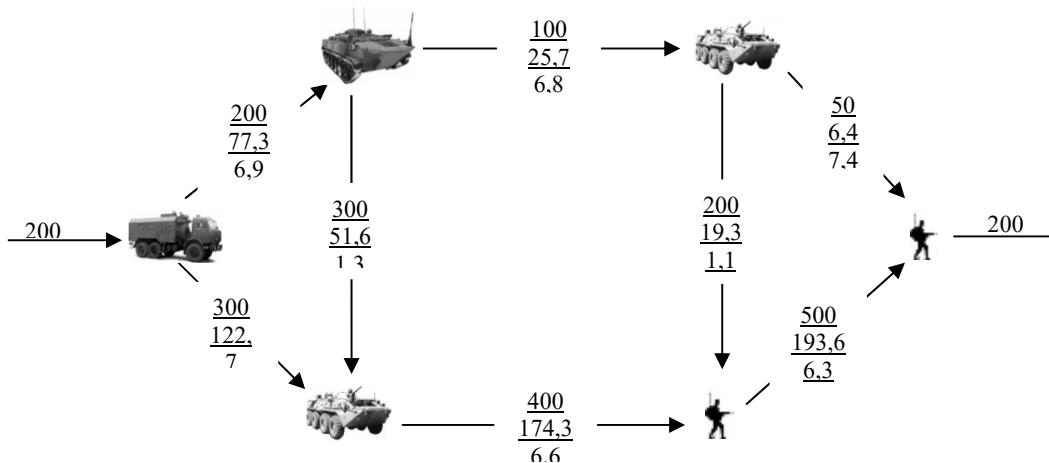


Рис. 5 Результати вирішення задачі багатопляхової маршрутизації

Результати розрахунків для двох основних стратегій маршрутизації – одношляхової та багатопляхової, наведено у таблиці 1. При одношляховій маршрутизації шлях обслуговування трафіка вибирається як найкоротший (результати подані вектором $A_v^{\text{ош}}$). Під час розв'язання задачі багатопляхової

маршрутизації використовувалась запропонована модель ІТМ ВП (результати розрахунку наведено вектором $A_v^{\text{бш}}$). Для розрахунків було обрано чотири варіанти параметрів трафіків і мережі. Якість прийнятих рішень оцінювалась за величиною затримки передачі пакетів трафіка $t_{\text{прд}}$.

Результати порівняльного аналізу різних стратегій маршрутизації

	Інтенсивність $\lambda_{звн}$ (1/с)											
	100			200			300			500		
	Проп. здатн.	$A_{\nu}^{бш}$	$A_{\nu}^{ош}$	Проп. здатн.	$A_{\nu}^{бш}$	$A_{\nu}^{ош}$	Проп. здатн.	$A_{\nu}^{бш}$	$A_{\nu}^{ош}$	Проп. здатн.	$A_{\nu}^{бш}$	$A_{\nu}^{ош}$
ν_1	198	46,9	-	200	77,3	-	279	145	-	369	298	-
ν_2	251	53,1	100	300	122,7	200	315	155	300	287	202	-
ν_3	386	26,8	-	300	51,6	-	217	67	-	331	186	-
ν_4	314	20,1	-	100	25,7	-	234	78	-	217	112	-
ν_5	412	79,9	100	400	174,3	200	385	222	300	392	388	-
ν_6	215	8,4	-	200	19,3	-	179	36	-	275	48	-
ν_7	273	11,7	-	50	6,4	-	197	42	-	353	64	-
ν_8	438	88,3	100	500	193,6	200	471	258	300	453	436	-
$t_{прд}$	-	11,2	12,7	-	21,1	78,13	-	18,4	122,6	-	27	-

Отримані результати дозволили зробити наступні висновки:

якщо інтенсивність зовнішнього трафіка невисока порівняно з пропускними здатностями мережі ($\lambda_{звн} = 100$ 1/с), то в рамках реалізації багатошляхової маршрутизації можна зменшити затримку в межах 12%;

при співмірних величинах необхідної та доступної пропускної здатності вираш багатошляхової маршрутизації складає від 73% ($\lambda_{звн} = 200$ 1/с) до 85% ($\lambda_{звн} = 300$ 1/с);

в умовах нестачі ресурсів ($\lambda_{звн} = 500$ 1/с) при реалізації одношляхової маршрутизації трафік отримав би відмову в обслуговуванні. Тобто обмеження вздовж жодного із шляхів мережі від вузла В1 до В6 не виконується. Однак, багатошляхова стратегія маршрутизації дала змогу в межах запропонованої моделі обслужити трафік із заданими показниками якості зв'язку ($t_{зад} = 27$ мс);

розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації стало можливим завдяки виконанню вимоги рівності нулю контурних затримок. За умови інтенсивності вхідного трафіка 200 (1/с) значення контурних затримок наступні:

$$t_1 = 6,9 + 1,3 - 8,2 = 0; \quad t_2 = 6,8 + 1,1 - 6,6 - 1,3 = 0;$$

$$t_3 = 1,1 + 6,3 - 7,4 = 0;$$

в межах отриманої моделі під час вирішення маршрутної задачі затримки пакетів вздовж незалежних шляхів в середньому дорівнювали між собою. Так, за інтенсивності вхідного трафіка 200 (1/с) (рис. 5) середні затримки під час передачі повідомлення від вузла 1 (відправник) до вузла 6 (отримувач) були однакові та дорівнювали $t_{прд} = 21,1$ мс;

при вирішенні задачі багатошляхової маршрутизації з гарантованим забезпеченням якості обслуговування одночасно було враховано наступні основні показники: інтенсивність трафіка та середня затримка пакетів повідомлення. Результати розрахунків дали можливість визначити, що середня затримка пакетів вздовж кожного із шляхів не перевищувала заданого значення, а завантаження окремих трактів передачі не перевищувало значень їх пропускних

спроможностей, Тобто, вимоги, визначені критерієм [21], було повністю забезпечено з урахуванням обмежень (19), (23), (26).

Висновки і перспективи подальших досліджень

Інформаційно-телекомунікаційна мережа військового призначення (ІТМ ВП) є складною організаційно-технічною системою, а процеси управління мережевими ресурсами цієї системи вимагають пошуку нових підходів. Аналіз існуючих механізмів і технологій управління мережевими ресурсами показав, що більшість рішень в цій галузі ґрунтується на евристичних схемах або найпростіших комбінаторних і потокових моделях, які переважно не відповідають вимогам системного характеру. Використання подібних моделей при формалізації системних задач маршрутизації нерідко тягне за собою прийняття неадекватних рішень, що врешті рещт істотно знижує показники продуктивності і якість обслуговування.

Виникнення подібних проблем пов'язано з недосконалістю принципів побудови та алгоритмів функціонування телекомунікаційних технологій, що використовуються сьогодні. На практиці такий аспект проявляється недостатньою якістю управління потоками даних в ІТМ ВП, що призводить до неприпустимих затримок в процесі обміну інформацією між пунктами управління різних ланок управління ІТМ ВП.

Встановлено, що тензорний підхід до системного моделювання складних систем найбільш повно відповідає вимогам системотехнічних принципів і постулатів. Він дозволяє вирішувати проблеми які з'являються під час урахування взаємопов'язаних і одночасно суперечливих вимог, які виникають (висуваються) під час управління інформаційним обміном в ТМ ТЛУ (як складової частини ІТМ ВП).

В роботі розроблено модель та метод багатошляхової маршрутизації передачі команд управління між різними вузлами (елементами) ІТМ ВП на основі тензорного підходу, з урахуванням потокового характеру трафіка, що

дозволило для різних показників якості обслуговування сформулювати QoS-обмеження.

Модель, подана в евклідовому просторі і дозволяє одночасно враховувати як структурні, так і функціональні параметри системи за допомогою об'єднання можливостей диференційної геометрії з можливостями комбінаторної топології, зберігаючи цілісність розгляду самої системи. При цьому, при виборі шуканої координатної системи додатковим джерелом інформації є топологічний опис реальної системи. Показано, що при неможливіму безпосередньому розрахунку певних величин в одній системі координат, застосовуючи запропоновані модель та метод, існує можливість розрахувати їх при переході до іншої системи координат.

Наведено приклад моделювання вирішення задачі багатошляхової маршрутизації передачі

команди управління з використанням запропонованого методу. Розрахунки показали, що, за невисокої інтенсивності зовнішнього трафіка порівняно з доступними ресурсами (пропускними здатностями) мережі, реалізація багатошляхової маршрутизації дає можливість зменшити затримку в межах 12%, а при співмірних величинах необхідної та доступної пропускної здатності отримати вигоду, що складає від 73% до 85%.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на узагальнення запропонованих моделі та методу на випадок передачі інформації циркулярно, а не лише між двома вузлами мережі. Окремим питанням залишається і забезпечення можливості одночасного розв'язання задач як розподілу ресурсів мережі між трафіками даних різних користувачів, так і розрахунку маршрутів.

Література

1. «Візія Генерального штабу ЗС України щодо розвитку Збройних Сил України на найближчі 10 років». URL: <http://www.mil.gov.ua/news/2020/01/11/viziya-generalnogo-shtabu>. 2. Указ Президента України №240/2016 Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 20 травня 2016 року "Про Стратегічний оборонний бюлетень України". URL: <http://www.president.gov.ua/documents/2402016-20137>. 3. 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. 4. 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. 5. 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. 6. Бондаренко Л.О., Плугова О.Б., Цимбал І.В., Черниш Ю.О. Основні інноваційні напрями розвитку системи зв'язку Збройних Сил України. *Збірник наукових праць ВІПІ*. 2016. Вип. 1. С. 19–24. 7. Основні тенденції та перспективи розвитку військового радіорелейного зв'язку. URL: <http://www.ukrmilitary.com/2017/10/RRZ.html>. 8. 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. 9. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979. 600 с. 10. Бертсекас Д. Сети передачи данных / Д. Бертсекас, Р. Галлагер; пер. с англ. М.: Мир, 1989. 544 с. 11. Кучук Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення: монографія. Харків: ХУПС, 2013. 264 с. 12. Лемешко А.В., Євдокименко М.О. Вдосконалення потокової моделі маршрутизації 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. 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, випуск 2(60). С. 152–159. DOI: 10.26906/SUNZ.2020.2.152. 14. Лаврут О.О. Дослідження якості управління потоками інформації у моделі військової телекомунікаційної мережі представленої в тензорному вигляді. *Військово-технічний збірник*. 2015. Вип. 12/2015. С. 27–33. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.12.2015.34-38>. 15. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Тензорная геометризация структурно-функционального представления телекоммуникационной системы в базе межполюсных путей и внутренних разрезов. *Наукові записки УНДІЗ*. № 1(13). 2010. С. 14–26. 16. Кротов В.Д., Ткаченко А.Л., Науменко О.Г. Аналіз методів управління трафіком при забезпеченні QoS в мобільних радіомережах тактичної ланки управління. *Збірник наукових праць ВІПІ*. № 1. 2019. С. 49–56. 17. Misra S., Goswami S. Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies 1st Edition. Hoboken: Wiley, 2017. 536 p. 18. Здоренко Ю.М., Фесьоха В.В., Лаврут О.О. Система виявлення аномалій трафіку в інформаційно-телекомунікаційних мережах. *International scientific and practical conference «Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine»* Wloclawek, Republic of Poland, December 21–22, 2018. Wloclawek: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2018. P. 10–12. 19. Крон Г. Тензорный анализ сетей. М.: Сов. радио, 1978. 720 с. 20. Lemeshko O., Yerenenko O., Yevdokymenko M., Hailan Ahmad M. Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network. *The Third International Conference “Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEEA 2020)”*. Kyiv, 21–22 January 2020. P. 1–12. DOI:10.1007/978-3-030-55506-1_11. 21. 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.

**МОДЕЛЬ И МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ В
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ТАКТИЧЕСКОГО ЗВЕНА УПРАВЛЕНИЯ**

Александр Александрович Лаврут (доктор технических наук, доцент)¹

Татьяна Валериевна Лаврут (кандидат географических наук, доцент)¹

Юрий Николаевич Здоренко (кандидат технических наук)²

Владислав Александрович Колесник¹

¹*Национальная академия сухопутных войск имени гетьмана Петра Сагайдачного, Львов, Украина*

²*Военный институт телекоммуникаций и информатизации имени Героев Крут, Киев, Украина*

Проводится обзор и анализ тенденций развития и применения новейших технологий и средств связи в подразделениях тактического звена управления Вооруженных Сил Украины. Показано, что в стране ведется работа по созданию эффективной системы оперативного управления, связи, разведки и наблюдения (C4ISR), которая бы соответствовала требованиям НАТО. Технологической основой для реализации данной системы должна стать единая автоматизованная система Вооруженных Сил Украины. Отмечается, что проблемным вопросом является необходимость разработки новых технологических решений управления сетевыми ресурсами с обеспечением их сбалансированной загрузки и гарантированного качества обслуживания разнородных трафиков в такой системе. Проводится анализ существующих моделей решения основных сетевых задач. Показано, что тензорный подход позволяет решать проблемы которые возникают в результате учета взаимосвязанных и одновременно противоречивых требований, которые возникают в процессе управления разнородным трафиком в военной телекоммуникационной сети. Разработано модель и метод многопутевой маршрутизации передачи команд управления между разными узлами (элементами) информационно-телекоммуникационной сети с учетом потокового характера трафика. Приведены результаты расчетов сети с помощью разработанных модели и метода. Проведена сравнительная оценка разработанной модели с известными.

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть, информационный обмен, многопутевая маршрутизация, управление трафиком, тактическое звено управления, тензорный анализ сетей, сетевый принцип, единое информационное поле.

**MODEL AND METHOD OF INFORMATION FLOW MANAGEMENT IN THE
TELECOMMUNICATIONS NETWORK OF THE TACTICAL LEVEL OF COMMAND**

Oleksandr Lavrut (Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor)¹

Tetiana Lavtut (Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor)¹

Yuriy Zdorenko (Candidate of Technical Science)²

Vladyslav Kolesnyk¹

¹*Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine*

²*Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes Krut, Kiev, Ukraine*

This article provides a review and analysis of trends in the development and application of the latest technologies and means of communication in the units of the tactical level of command of the Armed Forces of Ukraine. It is shown that the country is working on establishment of effective system of operational management, communication, intelligence and surveillance (C4ISR), which would meet NATO requirements. Technologically, as the basis for implementation of this system should be a unified automated system of the Armed Forces of Ukraine. It is noted that the problematic issue is the need to develop new technological solutions for network resources management to ensure their balanced loading and guaranteed quality of service of heterogeneous traffics in such a system. The analysis of existing models of the solving of the basic network problems is carried out. It is shown that the tensor approach allows to solve the problems which appear during taking into account the interconnected and at the same time contradictory requirements occurring during heterogeneous traffic management in the military telecommunications network. A model and method of multi-path routing of control commands transmission between different nodes (elements) of the information and telecommunication network taking into account the streaming nature of traffic have been developed. The results of network calculations using the above mentioned developed model and method are presented. A comparative assessment of the developed model with the known existing ones has been carried out.

Key words: telecommunication network, information exchange, multi-way routing, traffic management, tactical level of command, tensor analysis of networks, network-centric principle, a single information field.

References

1. «Viziia Heneralnogo shtabu Zbroinykh Syl Ukrainy shchodo rozvytku Zbroinykh Syl Ukrainy na naiblyzhchi 10 rokov». URL: <http://www.mil.gov.ua/news/2020/01/11/viziya-generalnogo-shtabu>.
2. Ukaz Prezidenta Ukrainy №240/2016 Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 20 travnia 2016 roku "Pro Stratehichniy oboronnyi biuletен Ukrainy". URL: <http://www.president.gov.ua/documents/2402016-20137>.
3. Lavrut O.O., Lavrut T.V., Klymovych O.K., Zdorenko Yu.M. Novitni tekhnologii ta zasoby zviazku u Zbroinykh Sylakh Ukrainy: shliakh transformatsii ta perspektyvy rozvytku. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 2019. Vyp. 1 (34). P. 91–101. DOI: 10.30748/nips.2019.34.13.
4. Lavrut O.O., Lavrut T.V., Klymovych O.K. Perspektyvy rozvytku avtomatyzovanykh system upravlinnia taktychnoi lanky upravlinnia Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy. *Systemy obrobky informatsii*. 2014. Vyp. 5 (121). P. 116–120.
5. Lavrut O.O., Klymovych K.O., Tarasiuk M.L., Antoniuk O.L. Stan ta perspektyvy zastosuvannia suchasnykh tekhnologii ta zasobiv radiozviazku v Zbroinykh Sylakh Ukrainy. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2017. Vyp. 1(49). P. 42–49.
6. Bondarenko L.O., Pluhova O.B., Tsymbal I.V., Chernysh Yu.O. Osnovni innovatsiini napriamky rozvytku systemy zviazku Zbroinykh Syl Ukrainy. *Zbirnyk naukovykh prats VITI*. 2016. Vyp. 1. P. 19–24.
7. Osnovni tendentsii ta perspektyvy rozvytku viiskovoho radioreleinoho zviazku. URL: <http://www.ukrmilitary.com/2017/10/RRZ.html>.
8. Puzyrenko O.H., Ivko S.O., Lavrut O.O. Analiz protsesu upravlinnia ryzykamy informatsiinoi bezpeky v zabezpechenni zhyvuchosti informatsiino-telekomunikatsiinykh system. *Systemy obrobky informatsii*. 2014. Vyp. 8 (124). P. 128–134.
9. Kleinrok L. Vyichislitelnye sistemy s ocherediamy. M.: Myr, 1979. 600 p.
10. Bertsekas D. Sety peredachy dannykh / D. Bertsekas, R. Hallaher; per. s anhl. — M.: Myr, 1989. — 544 p.
11. Kuchuk H.A. Informatsiini tekhnologii upravlinnia intehralnymy potokamy danykh v informatsiino-telekomunikatsiinykh merezhakh system krytychnoho pryznachennia: monohrafiia. Kharkiv: KhUPS, 2013. 264 p.
12. Lemeshko A.V., Yevdokymenko M.O. Vdoskonalennia potokovoi modeli marshrutzatsii v multiservisnii telekomunikatsiinii merezhi iz zabezpechenniam yakosti obsluhovuvannia. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2020. № 1(61). P. 31–43. DOI: 10.30748/soivt.2020.61.04.
13. Lemeshko O.V., Yevdokymenko M.O., Yeremenko O.S. Optyimizatsiina model marshrutzatsii chutlyvoho do zatrymok trafika v infokomunikatsiinykh merezhakh. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*. 2020. vypusk 2(60). P. 152–159. DOI: 10.26906/SUNZ.2020.2.152.
14. Lavrut O.O. Doslidzhennia yakosti upravlinnia potokamy informatsii u modeli viiskovoi telekomunikatsiinoi merezhi predstavlenii v tenzornomu vyhliadi. Viiskovo-tekhnichniy zbirnyk. 2015. Vyp. 12/2015. P. 27–33. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.12.2015.34-38>
15. Lemeshko A.V., Evseeva O.Iu. Tenzornaia heometryzatsiia strukturno-funktsionalnogo predstavlenia telekommunikatsiynoi sistemy v bazise mezhpolusnykh putey i vnutrennih razrezov. *Naukovi zapysky UNDIIZ*. № 1(13). 2010. P. 14–26.
16. Krotov V.D., Tkachenko A.L., Naumenko O.H. Analiz metodiv upravlinnia trafikom pry zabezpechenni QOS v mobilnykh radiomerezhakh taktychnoi lanky upravlinnia. *Zbirnyk naukovykh prats VITI*. № 1. 2019. P. 49–56.
17. Misra S., Goswami S. Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies 1st Edition. Hoboken: Wiley, 2017. 536 p.
18. Zdorenko Yu.M., Fesokha V.V., Lavrut O.O. Systema vyavlennia anomalii trafiku v informatsiino-telekomunikatsiinykh merezhakh. *International scientific and practical conference «Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine»* Wloclawek, Republic of Poland, December 21–22, 2018. Wloclawek: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2018. P. 10–12.
19. Kron H. Tenzornyiy analiz setei / H. Kron. — M.: Sov. radio, 1978. — 720 p.
20. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Hailan Ahmad M. Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network. *The Third International Conference “Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEEA 2020)”*. Kyiv, 21–22 January 2020. P. 1–12. DOI:10.1007/978-3-030-55506-1_11.
21. Lavrut O.O. Vybir kryteriiu otsiniuvannia yakosti upravlinnia potokamy informatsii u telekomunikatsiinii merezhi mobilnogo komponentu perspektyvnoi systemy zviazku ZS Ukrainy. *Nauka i tekhnika Povitrianykh syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 2014. Vyp. 3 (16). P. 113–115.