УДК 621.391

Д.І. Могилевич[1], С.В. Дружинін[2], О.К. Климович[2]

[1]*Військовий інститут інформатизації і телекомунікацій НТУУ «КПІ»*
[2]*Полтавський військовий інститут зв'язку, Полтава*

АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Розроблено моделі оцінки якості обслуговування в телекомунікаційній мережі військового призначення, у яких обґрунтовані показники якості обслуговування з урахуванням впливу на функціонування телекомунікаційної мережі найбільш істотних факторів, пов'язаних із пріоритетами обслуговування й обсягами передачі інформації різнорідного класу.

система технічного обслуговування, телекомунікаційні мережі

Вступ

При створенні й розвитку мереж військового зв'язку повинен бути забезпечений необхідний рівень організаційно-технічної взаємодії з розгорнутими в регіоні діючими мережами й системами різної видової і відомчої приналежності. Перспектива об'єднання мереж різного цільового призначення, надання різних послуг з відповідною якістю обслуговування, злиття комп'ютерних і телекомунікаційних технологій ні в кого не викликають сумніву. На даному етапі розвитку мережних технологій характерна інтеграція мереж не тільки різного цільового призначення (комп'ютерних, телекомунікаційних, документального електрозв'язку), але й мереж з різними принципами побудови (мережі стаціонарного й мобільного зв'язку) і методами комутації. Дана робота присвячена систематизації методів розрахунку й оцінки показників якості обслуговування телекомунікаційних мереж, розробці комплексної моделі для розрахунку параметрів телекомунікаційних мереж військового призначення. Цим визначається актуальність і практична спрямованість статті.

Постановка проблеми. У цей час для оцінки функціонування телекомунікаційних мереж існують моделі, згідно з якими вважають, що оцінку якості обслуговування в телекомунікаційних мережах можна вважати адекватною реальному процесові. Однак при більш повному врахуванні умов і факторів, що впливають на функціонування телекомунікаційної мережі, виявляється, що дані моделі не завжди дозволяють дати достовірну оцінку якості обслуговування в телекомунікаційних мережах військового призначення (ТКМВП). Незважаючи актуальність цього питання, на сьогоднішній день не створені засоби проектування й аналізу перспективних мереж військового зв'язку. Це пов'язано з тим, що телекомунікаційні мережі військового призначення з'явилися порівняно недавно й за короткий термін пройшли шлях від окремих експериментальних установок до систем загальнонаціонального масштабу. Для перспективних мереж військового зв'язку одним з актуальних завдань є розробка моделей для оцінки якості обслуговування в ТКМВП, що у свою чергу дозволить синтезувати раціональну структуру мережі військового зв'язку з дотриманням заданих вимог.

Аналіз літератури. Існуючі на цей час роботи, що розкривають принципи побудови телекомунікаційних мереж зв'язку й основи їх функціонування [1 – 5], є достатньою базою для опису й побудови таких систем. У той же час для розрахунку необхідних параметрів ТКМВП і їх оцінки (відповідно до поставлених до них вимог) цього не достатньо.

Метою статті є розробка аналітичних моделей оцінки якості обслуговування в ТКМВП, за допомогою яких можна вибирати раціональну структуру мережі військового зв'язку з дотриманням заданих вимог.

Основний матеріал

Вирішення задачі. Розробку аналітичної моделі доцільно виконувати із застосуванням таких методів дослідження: математичного апарату теорії графів, теорії масового обслуговування, теорії телетрафіка, теорії ймовірностей, а також методу експертних оцінок.

ТКМВП являє собою складну організаційно-технічну систему, що функціонує під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів. Такі впливи можуть виникати внаслідок таких причин: виходу з ладу й уведення в експлуатацію окремих гілок, комутаційних центрів або цілих ділянок мережі; різкого збільшення величини навантаження в одному або декількох напрямках зв'язку; зміни місця розташування абонентів або елементів телекомунікаційної мережі; підключення нових джерел навантаження й т.д.

З урахуванням наявності великої кількості факторів, що визначають роботу мережі (табл. 1), найбільш адекватним апаратом моделювання мережі є апарат теорії ймовірнісно-часових графів. Топологія мережі, представлена у вигляді графа, є основою для розв'язання задач аналізу ймовірнісно-часових характеристик проведення на мережі різних операцій:

© Д.І. Могилевич, С.В. Дружинін, О.К. Климович

розгортання, зміни структури, відновлення, керування ресурсами мережі.

Ймовірнісно-часовий граф задається таким математичним виразом:

$$G\{E, S, P\},$$

де E – множина вузлів у модельованій мережній структурі; S – множина ребер (гілок), що з'єднують між собою вузли графа; P – матриця вагових коефіцієнтів (імовірностей стійкої роботи вузлів і гілок графа).

Таблиця 1

Перелік основних факторів і параметрів, які необхідно враховувати під час оцінки функціонування ТКМВП

№ з/п	Найменування фактора й параметра, що впливає на ефективність функціонування ТКМВП	Вага $q_и$ фактора (параметра)
1	Кількість ліній зв'язку в напрямку зв'язку	0,06
2	Навантаження напрямку зв'язку	0,06
3	Кількість комутаційних центрів у напрямку зв'язку	0,05
4	Кількість шляхів передачі інформації в напрямку зв'язку	0,04
5	Живучість напрямку зв'язку	0,04
6	Середня затримка переданих повідомлень у напрямку зв'язку	0,025
7	Імовірність втрат переданих повідомлень у напрямку зв'язку	0,025
8	Середня затримка переданих повідомлень у лінії зв'язку	0,02
9	Імовірність втрат переданих повідомлень у лінії зв'язку	0,02
…	…	…
30	Інші фактори й параметри	0,005

Структура мережі зв'язку може бути представлена матрицею зв'язності $M_t = \{t_{ij}\}$, елементи якої у випадку відсутності зв'язку між елементами i та j набувають значення $t_{ij} = 0$ і $t_{ij} = 1$, якщо зв'язок існує. При цьому діагональні елементи з номерами $i = j$ характеризують внутрішньовузлові зв'язки, а недіагональні елементи $i \neq j$ – зв'язність між різними вузлами. Відображення шляху проходження повідомлення по елементах мережі проводиться на основі матриці тяжінь $M_t = \{t_{ij}\}$, де при проходженні повідомлення від i-го до j-го вузла елемент $t_{ij} = 1$ і в противному разі $t_{ij} = 0$. Матриця ймовірностей стійкої роботи $M_p = \{p_{ij}\}$ відбиває ступінь стійкості вузлів і ліній зв'язку мережі (живучість, надійність, завадостійкість). Графічно ймовірнісно-часовий граф представляється сукупністю станів (вузлів) і ребер (ліній зв'язку) із заданими на них показниками стійкості для кожного з перетинів часу.

Побудова сіткового графіка починається з визначення переліку подій і їх нанесення на графік відповідно до рангу. Ранг події визначається його порядковим номером у загальній послідовності подій. Так, наприклад, вихідна подія має нульовий ранг, наступна за ним – перший і т.д. Потім на графік наносяться роботи у вигляді ліній, які з'єднують вихідні й наступні події. При цьому роботи кодуються літерою латинського алфавіту й двозначним кодом, перший розряд якого означає ранг вихідної події, а другий – наступної (наприклад A_{ij}, $i \leq j$). У загальному випадку сітковий графік (рис. 1) являє собою граф, вузли якого a_i – події, а орієнтовані дуги A_{ij} – роботи. При цьому в графі будь-яка дуга відображає тільки одну роботу, а у випадку виникнення ситуації, коли дві роботи мають ті самі вихідні й вхідні вузли (події), уводять додаткову фіктивну роботу, що не пов'язана з витратами часу й інших ресурсів.

Одна з можливих послідовностей подій і робіт від вихідної події до завершальної являє собою шлях сіткового графіка. У той же час шлях, що має максимальний час виконання кожної із вхідних у нього робіт і сумарний час виконання всієї операції, є критичним шляхом.

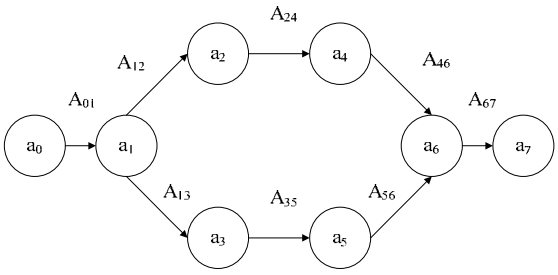

Рис. 1. Сітковий графік

Необхідно відзначити, що використання методів сіткового планування дозволяє:

– наочно представляти послідовність і строки виконання робіт кожним виконавцем при досягненні мети операції (у вигляді шляху на графіку);

– визначати вузькі місця в алгоритмі реалізації даної операції й межі часових ресурсів для ненапружених робіт на різних етапах;

– коректувати план виконання робіт кожному виконавцеві на основі перерозподілу часових і людських ресурсів з метою виконання операції в найкоротший термін та з мінімальними витратами ресурсів.

У той же час застосування теорії масового обслуговування доцільно для дослідження ситуації, коли кількість ресурсу системи загального користування, що розподіляється в інтересах користувачів (при випадковому звертанні до нього), виявляється меншим за їх загальну кількість [1]. Склад і функціональне призначення елементів системи масового обслуговування (СМО) із втратами представлені на рис. 2.

У статі пропонується підхід для вирішення задачі побудови моделі для оцінки й аналізу імовірнісно-часових характеристик (ІЧХ) багатоканальної СМО з відмовами. Припустимо, що на вхід СМО, що містить N обслуговуючих приладів, діє найпростіший потік заявок (потік, що має властивості стаці-

онарності, ординарності й відсутності післядії) з інтенсивністю λ, а обслуговування вимог кожним приладом СМО з відмовами здійснюється з інтенсивністю μ. При зайнятості всіх N приладів заявка, що знову прийшла, одержує відмову й залишає СМО.

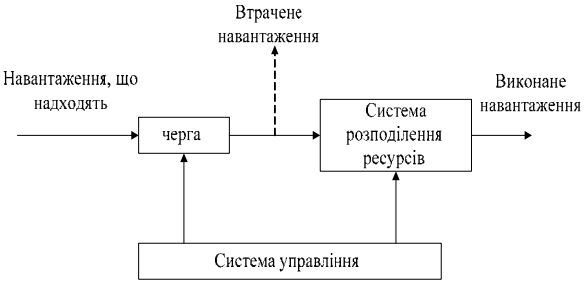

Рис. 2. Склад і функціональне призначення елементів СМО із втратами

Дана задача була розглянута Ерлангом і ним уперше визначені вирази для ймовірності відмов (обслуговування) у СМО даного класу. Розглянемо як модель процесу роботи ТКМВП модель n канальної СМО з відмовами (рис. 3) із продуктивністю кожного каналу обслуговування, рівною μ, і із вхідним потоком вимог інтенсивності λ.

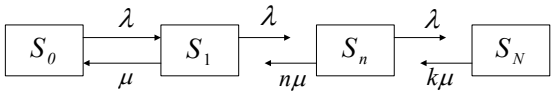

Рис. 3. Граф стану СМО M/M/n з відмовами

Як видно з рисунка, СМО вигляду M/M/n може перебувати в таких станах: всі прилади вільні, заявок на вході СМО немає; один прилад зайнятий, обслуговується одна заявка; n приладів зайнято, обслуговується k вимог; усі N приладів зайняті, обслуговується k вимог, а заявка, що прийшла знову, втрачається. Динаміка ймовірностей станів СМО може бути описана системою диференціальних рівнянь, складених за таким мнемонічним правилом: похідна $dP_n(t)/dt$ ймовірності перебування системи в стані S_n дорівнює алгебраїчній сумі членів, кількість яких дорівнює кількості стрілок на графі стану, що з'єднують стан S_n з іншими станами; якщо стрілка спрямована в стан S_n, то член береться зі знаком плюс; якщо стрілка спрямована зі стану S_n, то член береться зі знаком мінус; кожний член суми дорівнює добутку ймовірностей того стану (з якого спрямована стрілка) на інтенсивність потоку подій, що переводить систему по даній стрілці. Дана система рівнянь описує імовірнісний механізм зміни станів марківського процесу розмноження-загибелі [1]:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t);$$

$$\cdots$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -(\lambda + n\mu)P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) + (n+1)\mu P_{n+1}(t); \quad (1)$$

$$\cdots$$

$$\frac{dP_N(t)}{dt} = -N\mu P_N(t) + \lambda P_{N-1}(t),$$

де $P_n(t)$ – імовірність прийняття СМО стану n.

Для стійкого режиму роботи СМО $\frac{dP_n(t)}{dt} = 0$, $\lambda/\mu < 1$ розв'язання системи рівнянь дозволяє знайти значення фінальних ймовірностей:

$$P_1 = P_0\frac{\lambda}{\mu};\ \ldots\ P_n = P_0\frac{\rho^n}{n!};\ \ldots\ P_N = 1 - \sum_{n=0}^{N-1} P_n\ .$$

Надалі для зручності моделювання уведене поняття завантаження приладу.

Із умови нормування $\sum_{n=0}^{N} P_n = \sum_{n=0}^{N}\frac{\rho^n}{n!}P_0 = 1$ випливає вираз для оцінки ймовірності збереження незайнятого стану СМО:

$$P_0 = 1\Big/\sum_{n=0}^{N}\frac{\rho^n}{n!} \quad (2)$$

Використовуючи отримані вирази, визначимо значення ймовірностей відмови й обслуговування вимог, які надходять (1-а формула Ерланга):

$$P_{отк} = \rho^N\Big/\left(N!\sum_{n=0}^{N}\frac{\rho^n}{n!}\right),\ P_{обсл} = 1 - P_{отк}\ . \quad (3)$$

Рівняння для оцінки математичного сподівання й дисперсії кількості заявок, що перебувають у СМО в момент часу t, визначаються виразами:

$$\frac{dm_\chi(t)}{dt} = \sum_{n=0}^{N}(\lambda - n\mu)p_n = \lambda - \mu m_\chi(t);$$

$$\frac{dD_\chi(t)}{dt} = \sum_{n=0}^{N}\left(\lambda + n\mu + 2n(\lambda - n\mu) - 2m_\chi(t)(\lambda - n\mu)\right)p_n =$$

$$= \lambda + \mu m_\chi - 2\mu D_\chi(t),\ \lambda_N = \mu_0 \equiv 0\ .$$

Труднощі аналітичного розв'язання рівнянь стану для СМО великої розмірності роблять доцільним застосування для їх дослідження методів імітаційного моделювання й чисельних методів розрахунку на ПЕОМ. Особливо слід зазначити важливість постановки й розв'язання оптимізаційних задач для СМО.

Методи забезпечення якості обслуговування дозволяють мінімізувати рівень затримок для чутливого до них трафіка (наприклад, голосового) й одночасно гарантувати середню швидкість і динамічну передачу пульсацій для трафіка даних. До теперішнього часу зроблена велика робота із класифікації трафіка різних застосувань. Як основні критерії класифікації прийняті такі характеристики трафіка: відносна передбачуваність швидкості передачі даних; чутливість трафіка до затримок пакетів; чутливість трафіка до втрат і спотворень пакетів.

Трьом критеріям класифікації застосувань відповідають три групи параметрів, використовуваних при визначенні необхідної якості обслуговування: параметри пропускної здатності; параметри затримок; параметри надійності передачі.

На підставі переліку значущих факторів і параметрів (табл. 1) виконується розробка моделі для

оцінки основного показника ефективності ТКМВП - її пропускної здатності. Необхідно відзначити, що адекватність пропонованої моделі реальному процесові функціонування ТКМВП правомочна в рамках такої системи гіпотез і допущень: приймається система обслуговування із втратами; система перебуває в стані статистичної рівноваги; імовірність зайнятості каналів всіх гілок мережі взаємно не залежна [2].

Другим етапом при розробці моделей для оцінки якості ТКМВП є розрахунок значення показника, що визначає середній час затримки мовних повідомлень і пакетів даних. Для цього використовуємо метод, викладений у [7]. Суть методу, стосовно до поставленого завдання, полягає в наступному. Якщо є два потоки передачі повідомлень, і при цьому в першому потоці передачі мовних повідомлень спостережуване середнє значення затримки повідомлень дорівнює T_1, а в іншому потоці передачі повідомлень даних середнє значення затримки дорівнює T_2, то у випадку виконання нерівності $T_1 < T_2$ можна зробити порівняння кількісних значень затримок передачі двох потоків. Вихідними даними для розрахунків є: величина навантаження, що надходить на обслуговування в годину найбільшого навантаження в кожній гілці зв'язку (задається матрицею $Y = \{Y_{ij}\}$); канальна ємність гілок мережі $M = \{M_{ij}\}$; структура мережі (задається матрицею зв'язності, що описує граф $G(N, M)$); обрана модель СМО на основі моделі $M/M/1$ (апроксимація Клейнрока) [6].

При визначенні середнього часу затримки мовних повідомлень і повідомлень даних необхідно зробити висновок про те, що стратегія інтеграції навантаження в порядку надходження запитів не забезпечує прийнятного регулювання характеристик якості обслуговування [1, 10].

На наступному етапі розробляється аналітична модель оцінки живучості ТКМВП. Для цього використовуються потокова й імовірнісна моделі. Потокова модель ТКМВП характеризує здатність мережі по передачі повідомлень від джерела інформації до споживачів в умовах нормального функціонування ТКМ. Такий стан може характеризуватися імовірнісним показником стану її гілок у будь-який фіксований момент часу. При розгляді процесу функціонування мережі з погляду абонента неістотно, з якої причини він отримує відмову в обслуговуванні. Для підвищення ймовірності обслуговування абонентів у ТКМВП доцільно вибирати шляхи з мінімальною кількістю гілок і забезпечувати кілька шляхів передачі інформації в кожному напрямку зв'язку (у підході до розгляду даного напрямку дослідження дотримуються поглядів, викладених у роботах [2, 8, 9]).

Показник живучості дає можливість оцінити ймовірність збереження хоча б одного шляху передачі інформації в кожному напрямку зв'язку. У структурі реальної мережі для передачі повідомлень можуть бути використані не всі шляхи передачі інформації. Це пов'язане з обмеженнями, які накладаються функціональними можливостями використовуваних засобів зв'язку. Тому з метою зменшення кількості обмежень будемо розглядати структурну живучість. Особливістю оцінки живучості ТКМВП є те, що вона розраховується по лініях зв'язку, у кожному з яких оцінюються показники живучості, а потім перевіряється їх відповідність заданим вимогам.

Як показник кількісної оцінки живучості ТКМВП вибирається ймовірність виживання (збереження зв'язності) напрямків зв'язку. Живучість $W_{ij}^{\nu}(F)$ будь-якого шляху встановлення з'єднань визначається добутком ймовірностей виживання кожного зі складових його елементів [2]:

$$W_{ij}^{\nu} = \prod_{k=1}^{n} W_k \prod_{l=1}^{L} W_l , \qquad (4)$$

де n – кількість комутаційних центрів у шляху ν; W_k – імовірність виживання k-го комутаційного центра в заданих умовах; L – кількість гілок у шляху ν; W_i – імовірність виживання і-ої гілки в заданих умовах.

При наявності в напрямку зв'язку декількох незалежних шляхів передачі інформації його живучість зберігається за умови збереження працездатним хоча б одного зі шляхів [2]:

$$W_{\text{нс}} = 1 - \prod_{\varsigma=1}^{\iota} (1 - W_{ij}^{\nu(\varsigma)}) , \qquad (5)$$

де ι – кількість незалежних шляхів у напрямку зв'язку.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що живучість ТКМВП визначається живучістю її напрямків зв'язку, і для одержання чисельних показників живучості напрямків зв'язку доцільно їх відображення моделями у вигляді паралельно-послідовного графа. У [2] наведені результати розрахунків, які дозволяють оцінити залежність живучості напрямків зв'язку від кількості шляхів передачі інформації, їх складу й показників живучості елементів у широкому діапазоні значень. Отримані результати дозволяють спростити аналіз вимог до живучості ТКМВП і синтез мережі за заданими вимогами.

При оцінці ефективності функціонування ТКМВП виникає необхідність оцінки множини різнорідних показників, які характеризують її численні властивості. У практиці організації зв'язку часто виникає проблема контролю ефективності системи за окремими показниками під час вирішення окремих задач аналізу й синтезу. У подібних випадках оцінка ефективності системи військового призначення можлива із застосуванням методів багатокритеріального аналізу [11]. Для порівняльної оцінки існуючих варіантів ТКМВП і формування більш чіткого уявлення про вплив окремих показників на підсумкову ефективність ТКМВП використовуються методи таксономії, факторного аналізу, а також метод аналізу ієрархій. Оцінка ефективності ТКМВП може бути виконана на основі оцінки осно-

вного показника (інші вводяться в обмеження) або на основі інтегрального показника (із застосуванням таксономічного аналізу).

Комплексну, всебічну оцінку ефективності можна здійснити, використовуючи систему показників, які відображають всі істотні (в інтересах дослідника операції) властивості ТКМВП із застосуванням методів порівняльного багатовимірного аналізу. Наявність множини різнорідних показників ефективності ТКМВП породжує необхідність розв'язання багатокритеріальної задачі, основними труднощами якої є необхідність скорочення розмірності векторного критерію оптимальності (ВКО), нормалізації й наступної скаляризації (згортки) його компонентів (рис. 4).

Висновки

Розроблені моделі оцінки якості обслуговування в ТКМВП дозволяють на етапі проектування зробити науково обґрунтований вибір найбільш раціонального варіанта структури ТКМВП, що відповідає цілям і висунутим до неї вимогам. Розрахунок оптимальних кількісних значень параметрів може базуватися на основі програмного забезпечення Mathcad 2000 в операційній системі Windows XP. Кількісні значення результатів розрахунку основних показників при певних допущеннях і обмеженнях відповідають реальним значенням характеристик ТКМВП.

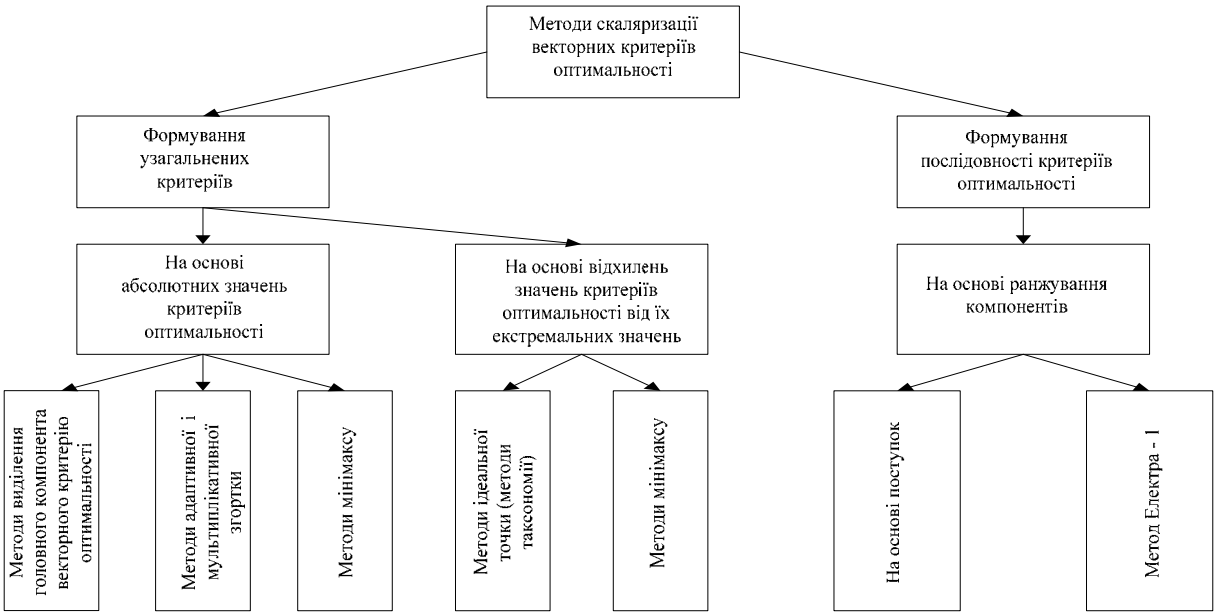

Рис. 4. Класифікація методів скаляризації векторних критеріїв

Таким чином, розроблені моделі для оцінки якості обслуговування ТКМВП дозволяють усунути недолік у прогностичних можливостях існуючих моделей при оцінці й виборі раціонального варіанта структури ТКМВП, а також виконувати розрахунки значень обраних показників з урахуванням істотних факторів і параметрів реального процесу.

Список літератури

1. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.

2. Романов А.И. Телекоммуникационные сети и управление. – К.: Издательско-полиграфический центр «Киевский университет», 2003. – 247 с.

3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 958 с.

4. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.

5. Новые сетевые технологии в системах управления военного назначения / Под ред. П.И. Буренина. – СПб.: ВУС, 2000. – 200 с.

6. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

7. Шнепс М.А. Системы распределения информации. Методы расчета: Справ. пособие. – М.: Связь, 1979. – 344 с.

8. Щербіна Л.П., Біленко А.І., Кучеренко А.Г. Розрахунок параметрів систем телекомунікації методами теорії телетрафіку. – К.: НТУУ "КПІ", 1996. – 147 с.

9. Щербина Л.П., Хилько О.Г. Надёжность и живучесть коммутируемых сетей связи. – Л.: ВАС, 1977. – 54 с.

10. Шуенкин В.А., Донченко В.С. Прикладные модели теории массового обслуживания. – К.: УМК ВО, 1992. – 398 с.

11. Плюта В. Сравнительный многомерный анализ в экономических исследованиях. Методы таксономии и факторного анализа / Пер. с пол. В.В.Иванова. – М.: Статистика, 1980. – 151 с.

Надійшла до редколегії 27.03. 2007

Рецензент: канд. фіз.-мат. наук, проф. О.С. Мельниченко, Державний педагогічний університет ім. Короленка, Полтава.