

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ЛАДИГІНА Ольга Анатоліївна**



**УДК 004.738 (043.3)**

**МЕТОДИ СТАТИСТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ОБСЛУГОВУВАННЯ  
НЕСТАЦІОНАРНОГО ТРАФІКУ В ГЕТЕРОГЕННИХ  
КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** Заслужений діяч науки й техніки України,  
Лауреат державної премії України,  
доктор технічних наук, професор,  
**Ігнатов Володимир Олексійович**,  
Національний авіаційний університет,  
професор кафедри телекомунікаційних систем.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Мухін Вадим Євгенійович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
ім. І. Сікорського», професор кафедри  
математичних методів системного аналізу;

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
**Гільгурт Сергій Якович**,  
Інститут проблем моделювання в енергетиці  
ім. Г.Є. Пухова НАН України, старший  
науковий співробітник відділу математичного  
та економетричного моделювання.

Захист відбудеться “25” листопада 2020 р. о 13:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.07 у Національному авіаційному університеті (НАУ) за адресою: м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1, корп. 6, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці НАУ за адресою: 03680, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий “24” жовтня 2020 р.

**Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради**



**О.В. Толстікова**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В світлі сучасних досягнень в області комп'ютерних систем, мереж та компонентів особливої актуальності набувають проблеми обслуговування комп'ютерних мереж, зокрема аналізу і оптимізації неоднорідного трафіка, до якого пред'являють вимоги по забезпеченню високого рівня якості обслуговування трафіку (QoS).

Основними напрямками сучасних наукових досліджень трафіка є побудова математичних моделей трафіка з використанням методів моделювання часових послідовностей, самоподібних фрактальних моделей.

Побудова математичної моделі, що адекватно відображає нестационарний трафік довільного характеру і структури, у багатьох випадках є нетривіальною проблемою. Від адекватного вибору моделі в остаточному підсумку залежить рішення всього комплексу задач аналізу, синтезу і оптимізації функціонування гетерогенної мережі відносно заданої якості і послуг, що надаються.

При розгляді коротких часових періодів використовуються моделі пуассонівських процесів, однак на довгих часових відрізках подібні моделі неадекватні в силу квазіперіодичності і суттєвої автокореляційної залежності трафіка. Моделі самоподібних процесів також не цілком правдоподібно відтворюють складний двічі квазіперіодичний характер нестационарного трафіка.

Дослідженнями проблем аналізу, синтезу і оптимізації функціонування телекомунікаційних та комп'ютерних мереж прив'язані роботи відомих вітчизняних та зарубіжних вчених, таких як Ігнатов В.О., Мельник А.О., Харченко В.С., Мухін В.Є., Кулаков Ю.О., Азаров О.Д., Конахович Г.Ф., Вишневський В.М., Городецький А.Я., D.Hutchison, A. K. Marnierides, W.E.Leland, M.S.Taqqu, W.Willinger, T. Gneiting, D.P. Pezaros та багатьох інших.

Науковою школою професора В.О. Ігнатова сформульована постановка проблеми оцінювання трафіка як випадкового процесу, що потребує подальшого розвитку для нестационарних і періодичних режимів.

При використанні технології пакетної передачі даних особливу важливість відіграють моделі пропускної здатності багатоканальних ліній зв'язку з урахуванням характеристик трафіка (час передачі даних, надійність передачі, ширина смуги пропускання каналу, завантаження мережевого буферу). Тому у сукупності з елементами управління потоками даних моделі пропускної здатності повинні адаптуватися до зміни характеристик якості обслуговування мережевого трафіку, що неминуче виникає як наслідок стохастичного і пульсуючого характеру нестационарного трафіка комп'ютерної мережі.

Специфічні особливості гетерогенної мережі збільшують проблему розроблення універсальних методів обслуговування трафіку. Мережа

працює ефективно, коли кожен її ресурс істотно завантажений, але не перевантажений. Отже, необхідно прагнути до поліпшення *QoS*, понизити затримки пакетів, зменшити втрати пакетів і збільшити інтенсивність трафіка, а також максимально збільшити завантаження всіх ресурсів мережі з метою підвищення якості обслуговування нестационарного трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах.

Враховуючи викладене, **тема досліджень**, яка полягає у розробці методів статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах з урахуванням неоднорідності систем, а також обмежень, як основи оптимального розподілу пропускних здатностей інформаційно-комунікаційних систем є **актуальною**.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем Інституту аеронавігації Національного авіаційного університету. Автор брав участь як співвиконавець у виконанні НДР № 36Б11 «Розробка методів підвищення оперативності передачі та захисту інформації у телекомунікаційних системах» (№ ДР 0113U003086) Центральноукраїнського національного технічного університету та НДР №863-ДБ13 «Розроблення теорії, методів та технологій оптимального управління гарантоздатною комп'ютерною мережею» (ДР №0113U000082) у Національному авіаційному університеті.

**Мета і задачі дослідження.** **Мета дисертаційної роботи** полягає у підвищенні ефективності обслуговування нестационарного трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах за рахунок статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіку з урахуванням існуючих обмежень шляхом вдосконалення моделей нестационарного трафіка для підвищення їх адекватності реальним умовам.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення наступних **завдань**:

- аналітичний огляд відомих методів, моделей і алгоритмів аналізу, вимірювання, оцінювання і управління трафіком;
- розробка методу верифікації та удосконалення логіко-математичних моделей динаміки нестационарного трафіка;
- розробка методу виявлення періодичності та спектру нестационарного трафіка на фоні завад;
- удосконалення методів статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіку в гетерогенних мережних системах;
- проведення імітаційних експериментів з метою підтвердження теоретичних положень, а також дослідження властивостей нестационарного трафіка, запропонованих методів, логіко-математичних моделей.

**Об'єктом дослідження** є процес обслуговування нестационарного трафіку в комп'ютерних системах та мережах.

*Предметом дослідження* є методи статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах.

**Методи дослідження:** метод лінеаризації і гаусовської апроксимації розподілу нелінійних функцій випадкових аргументів, метод невизначених множників Лагранжа для врахування обмежень реального характеру, методи системного аналізу, методи теорії ймовірностей і математичної статистики, імітаційне комп'ютерне моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в подальшому удосконаленні та розробці нових теоретичних та прикладних методів статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах по критерію мінімуму середнього ризику обслуговування трафіку з урахуванням існуючих обмежень оптимального розподілу пропускних здатностей.

Автором одержані наступні основні *нові наукові результати*:

1. Удосконалено метод виявлення періодичності та спектру нестационарного трафіка на фоні завад, що дозволяє дослідити вплив основних параметрів завади на обсяг інформації, яка передається мережею.

2. Набув подальшого розвитку метод статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіку в симплексних і дуплексних лініях зв'язку в багатоканальних системах та гетерогенних комп'ютерних мережах. Удосконалений метод дозволяє оцінити втрати, що виникають через неоптимальність режиму, визначити відповідні керуючі впливи для наближення режиму до оптимального.

3. Вперше розроблено метод верифікації логіко-математичних моделей динаміки нестационарного трафіка, який враховує параметр розмірності моделей з різним числом станів трафіку для перевірки адекватності моделей, а також виконує оцінку впливу некерованих змінних на оптимальні рішення.

**Практичне значення одержаних результатів** дисертаційної роботи полягає у тому, що на підставі виконаних досліджень вирішено актуальну задачу визначення реалізацій оптимального розподілу пропускних здатностей телекомунікаційних та комп'ютерних мереж з урахуванням неоднорідності мереж, а також обмежень, що мають місце на практиці.

Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів підтверджено обчислювальними експериментами з початковими даними реальних комп'ютерних мереж, що дозволили виявити закономірності, корисні властивості, особливості й можливості практичного використання запропонованих методів.

Результати дисертаційного дослідження використані при виконанні НДР №36Б115 у КНТУ (№ДР 0115U003193), ДКР у ТОВ «Елан», а також у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету (кафедра кібербезпеки та програмного забезпечення) та

Національного авіаційного університету (кафедра комп'ютерних систем та мереж) і показали їх досить високу техніко-економічну і соціальну ефективність.

Запропоновані математичні моделі і методи доведені до практичної реалізації у вигляді програмних продуктів для експериментального дослідження нестационарного трафіка і можуть бути застосовані для дослідження закономірностей моніторингу трафіка з урахуванням основних параметрів корисного сигналу і завади, виконувати верифікацію нестационарного трафіка з обраною системою показників адекватності.

Розроблені практичні рекомендації і організаційно-технічні заходи по впровадженню результатів дослідження.

**Особистий внесок здобувача** полягає в теоретичному обґрунтуванні одержаних результатів, їх експериментальній перевірці та дослідженні, а також створенні програмних продуктів для практичного використання цих результатів. Усі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором особисто.

У роботах, написаних у співавторстві, авторові належать: метод удосконалення оптимальних моделей нестационарного поліноміального трафіка в гетерогенних комп'ютерних мережах [2], метод статистичної оптимізації обслуговування нестационарним трафіком в комп'ютерних мережах [3], метод визначення спектру періодичного трафіка [5], метод верифікації моделей нестационарного трафіка в комп'ютерних мережах [9], програми в системі Mathcad для імітаційного комп'ютерного моделювання нестационарного трафіка.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати проведених досліджень доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на наукових конференціях, серед яких: V Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології» (Київ, 2013 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційна безпека та комп'ютерні технології» (Кіровоград, 2016 р.); XIV International Scientific Conference «AVIA-2019».

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 12 наукових робіт, серед яких 9 статей у науково-технічних журналах (з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 3 тези доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура і обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (139 найменування), 4 додатка. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 258 сторінок, у тому числі 152 сторінки основного тексту, 4 додатки на 92 сторінках, 26 рисунків, 5 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовується актуальність напряду дисертаційного дослідження, сформульовано основну мету та задачі дослідження, положення, що визначають наукову новизну та практичну цінність виконаних досліджень. Наведені відомості про зв'язки наукового напрямку досліджень із планами організації, де виконано роботу, апробацію і впровадження результатів, особистий внесок здобувача.

У першому розділі виконано огляд методів, засобів аналізу, оцінювання, обслуговування трафіку в комп'ютерних мережах з метою виявлення факторів, що впливають на розподіл пропускних здатностей гетерогенних комп'ютерних мереж.

Системний аналіз стану проблеми та огляд робіт у області дослідження комп'ютерних систем та мереж показує, що дослідження процесів управління неоднорідним трафіком вимагає комплексного підходу, заснованого на застосуванні багаторівневої технології, що поєднує аналітичні і статистичні методи. На основі аналізу результатів сучасних досліджень сформульована та обґрунтована актуальність вирішення наукової задачі визначення реалізації оптимального розподілу пропускних здатностей систем в гетерогенних комп'ютерних мережах з урахуванням неоднорідності систем, а також і обмежень, що мають місце на практиці. Обґрунтована необхідність розробки нових методів оптимізації обслуговування нестаціонарного трафіку в гетерогенних мережах, заснованих на моделях пропускної здатності та моделях нестаціонарного трафіка, які відображають основні особливості нестаціонарних і періодичних режимів для підвищення якості обслуговування, забезпечення ефективного контролю і управління інформаційними потоками. Визначені мета та задачі дослідження, які потрібно вирішити для її досягнення.

Другий розділ присвячено удосконаленню логіко-математичних моделей динаміки нестаціонарного трафіка в гетерогенних комп'ютерних мережах та розробці методів виявлення періодичності трафіка на фоні завад, визначення структури і параметрів періодичності трафіка.

Для розробки удосконалених моделей нестаціонарного поліноміального трафіка поставлені та розв'язані задачі вибору еталонної поліноміальної моделі випадкового нестаціонарного трафіка, визначені інтенсивності зміни станів трафіку для випадків числа станів трафіку  $n=2,3,4$ . Отримані інтенсивності відіграють роль коефіцієнтів диференційних рівнянь, що описують динаміку трафіка. Через ці інтенсивності визначаються ймовірності станів трафіку, які, в свою чергу, є початковими даними для оптимізації математичних сподівань і дисперсій квантованих значень трафіка. В якості критерію оптимізації для неперервного та дискретного процесів вибрано квадрат відстані між числовими характеристиками

(математичного сподівання та дисперсії) еталонного і модельного нестационарного трафіка.

Критерій оптимізації математичного сподівання (1) та дисперсії (2) в дискретному випадку:

$$\varepsilon^2(Z_1, Z_n) = \sum_{t_k=0}^N \left[ t_k (m_1 - m_2 t_k) - \sum_{i=1}^n Z_i \cdot P_i(t_k) \right]^2, \quad (1)$$

$$\varepsilon 1^2(d_1, d_n) = \sum_{t_k}^N \left[ D_2 t_k^4 + D_1 t_k^2 - \sum_{i=1}^n d_i P_i^2(t_k) \right]^2, \quad (2)$$

де  $m_1 = 2$  – математичне сподівання випадкового параметру  $a_1$  еталону,  $t_k$  –  $k$ -ий момент часу спостережень за математичним сподіванням трафіка,  $m_2$  – математичне сподівання випадкового параметру  $a_2$  еталону,  $P_i(t_k)$  – ймовірність перебування трафіка у  $i$ -му стані в  $k$ -ий момент часу,  $d_1, d_n$  – параметри дисперсії моделі, значення яких оптимізується із умови найкращого наближення дисперсії еталону трафіка.

Аналогічно виконується оптимізація параметрів моделей трафіка в безперервному випадку математичного очікування (3) та дисперсії (4)

$$\varepsilon 0^2(Z_1, Z_n) = \int_0^1 \left[ t_k (2 - t_k) - \sum_{i=1}^n Z_i \cdot P_i(t_k) \right]^2 dt_k, \quad (3)$$

$$\varepsilon 2^2(d_1, d_n) = \int_0^1 \left[ D_2 t_k^4 + D_1 t_k^2 - \sum_{i=1}^n d_i P_i^2(t_k) \right]^2 dt_k, \quad (4)$$

де  $t_k$  виступає в ролі змінної інтегрування.

Постановка задачі ефективного вибору середніх квантованих значень трафіка для дискретного і неперервного випадків наступна: відомі вирази для критеріїв оптимізації середніх квантованих значень  $Z_1, Z_n$  у вигляді функціоналів (1) (3); класичним методом пошуку мінімуму цих функціоналів потрібно знайти такі  $Z_{1opt}, Z_{nopt}$ , що доставляють мінімум

$$\min_{Z_1, Z_n} \varepsilon^2(Z_1, Z_n) = \varepsilon_{\min}^2(Z_{1opt}, Z_{nopt}). \quad (5)$$

Прирівнявши нулю похідних по параметрам  $Z_1, Z_n$  від функціоналів (1), (3), отримуємо систему з  $n$  рівнянь оптимізації щодо невідомих значень  $Z_1, Z_n$ .

Для дискретного випадку:

$$\sum_{t_k=0}^N \left[ t_k - (2 - t_k) - \sum_{i=1}^n Z_i \cdot P_i(t_k) \right] \cdot P_j(t_k) = 0, \quad j=1, n. \quad (6)$$

Для неперервного випадку:

$$\int_0^1 \left[ t_k - (2 - t_k) - \sum_{i=1}^n Z_i \cdot P_i(t_k) \right] \cdot P_j(t_k) dt_k = 0, \quad j=1, n. \quad (7)$$

Системи рівнянь (6), (7) приводяться до канонічної форми систем з  $n$  лінійних алгебраїчних рівнянь



$$AZ = B, \quad (8)$$

де елементи матриці  $A$  складаються з коефіцієнтів при невідомих координатах  $Z_l$ ,  $Z_n$  вектора  $Z$ , а праві частини рівнянь створюють вектор  $B$ .

Шляхом підстановки отриманих квантованих значень у функціонали (1), (3), знаходяться мінімальні значення відповідно (5).

При побудові моделі випадкового періодичного трафіка та завади для вирішення задач виявлення періодичності трафіка на фоні завод та оптимального оцінювання параметрів першої гармоніки трафіка в ролі критерію оптимальності вибрана відстань у просторі Евкліда між реалізацією трафіку, що спостерігається в мережі, та її оптимальною оцінкою:

$$S(A_1, \omega_1, \phi_1) = \sum_{t_i}^{T^2} [Z(h, n_0, k, t) - X(A_1, \omega_1, \phi_1, t)]^2, \quad (9)$$

де  $t$  – моменти часу взяття відліків,  $T^2$  – довжина реалізації.

Для побудови математичної моделі викривленого заводо трафіка  $Z(t)$  розроблена математична модель корисного сигналу  $X(t)$  і математична модель завади  $Y(t)$ . На першому етапі досліджень вимірюється основна гармоніка трафіка і модель корисного сигналу має вигляд

$$X(A_1, \omega_1, \phi_1, t) = A_1 [\cos(\omega_1 t) \cos(\phi_1) - \sin(\omega_1 t) \sin(\phi_1)], \quad (10)$$

де  $A_1$  – амплітуда,  $\omega_1$  – кругова частота,  $\phi_1$  – початкова фаза сигналу,  $t$  – час.

Аддитивна завада розглядається як високочастотний вузькосмуговий процес, що має частоту  $\omega_0$ , набагато більшу частоти  $\omega_1$  корисного сигналу, задану початкову фазу  $\varphi_0$  і амплітуду  $A_0$ , що визначається заданим відношенням сигнал/шум  $h$  за потужностями:

$$Y(A_0, \omega_0, \varphi_0, t) = \frac{A_0}{\sqrt{h}} [\cos(\omega_0 t) \cos(\varphi_0) - \sin(\omega_0 t) \sin(\varphi_0)]. \quad (11)$$

Таким чином, математична модель періодичного трафіка включає шість параметрів, залежить від часу і має наступний вигляд

$$Z(A_1, \omega_1, \phi_1, A_0, \omega_0, \varphi_0, t) = X(A_1, \omega_1, \phi_1, t) + Y(A_1, h, \omega_0, \varphi_0, t). \quad (12)$$

Частота завади  $\omega_0$  визначається через масштабний коефіцієнт  $n_0$ , що значно більший 10, та частоту корисного сигналу  $\omega_1$ :

$$\omega_0 = n_0 \omega_1 \quad (13)$$

Початкова фаза завади задана як поточна дискретна змінна:

$$\varphi_0 = \frac{k}{n_1} \frac{\pi}{2}, \quad k = 0, 1, \dots, n_1, \quad (14)$$

де  $k$  – поточний індекс фази завади,

$n_1$  – загальне число можливих значень фази завади,  $\phi_0 \in [-\pi/2, \pi/2]$ .

Формули (12) - (14) дозволяють визначити модель трафіка (12) через три параметри завади і дослідити вплив цих параметрів на процедуру оптимального оцінювання параметрів трафіка на фоні завади. Модель періодичного трафіка можна представити у такому компактному замкнутому вигляді:

$$Z(t, h, n_0, k) = A_1 \left[ \cos(\omega_1 t - \phi_1) + \frac{1}{\sqrt{h}} \cos\left(n_0 \omega_1 t - \frac{k \pi}{n_1 2}\right) \right]. \quad (15)$$

Розв'язок отриманого рівняння оптимізації параметрів періодичного трафіка дозволяє отримати оптимальні оцінки і розробити метод визначення структури і параметрів викривленого завадою періодичного трафіка та алгоритм оптимізації оцінок параметрів періодичного трафіка в гетерогенних комп'ютерних мережах.

Для розв'язання рівнянь оптимізації розроблено числовий графоаналітичний ітераційний метод, який дозволяє отримувати оптимальні оцінки частоти і фази з наперед заданою точністю. Сутність цього методу полягає в тому, що інтервал оптимального оцінювання, в якому знаходиться оптимальна оцінка, на початку ітераційного процесу визначають за графіками критерію оптимальності, а потім його поступово зменшують до тих пір, поки відносна погрішність оцінки не стане меншою наперед заданої або нев'язка рівняння не стане меншою за наперед заданої величини.

Для застосування цього методу рівняння оптимізації приводяться до зручного для визначення нев'язки вигляду. Значення оцінки з певною похибкою відповідає оптимальному значенню, нев'язка рівняння «проходить через нуль». Це дозволяє зафіксувати довжину інтервалу, в якому знаходиться оптимальна оцінка із заданою похибкою.

Для складання рівнянь обчислюються похідні від критерію по керованим змінним і прирівнюються нулю. В результаті отримується система рівнянь оптимізації оцінок параметрів періодичного трафіка:

$$\sum_t [Z(h, n_0, k, t) - X(A_1, \omega_1, \phi_1, t)] \cos(\omega_1 t - \phi_1) = 0 \quad (16)$$

$$\sum_t [Z(h, n_0, k, t) - X(A_1, \omega_1, \phi_1, t)] \sin(\omega_1 t - \phi_1) = 0 \quad (17)$$

$$\sum_t [Z(h, n_0, k, t) - X(A_1, \omega_1, \phi_1, t)] \sin(\omega_1 t - \phi_1) = 0 \quad (18)$$

З рівняння (16) оптимальна оцінка амплітуди знаходиться в аналітичній формі

$$A_{1\text{opt}} = \frac{\sum_t [Z(h, n_0, k, t) \cos(\omega_1 t - \phi_1)]}{\sum_t \cos(\omega_1 t - \phi_1)^2} \quad (19)$$

Для розв'язання рівняння (17) оптимізації оцінки частоти  $\omega_l$  основної гармоніки визначається ліва (20), права (21) частини і нев'язка (22) рівняння:

$$LP1(\omega_1) = \sum_t X(A_1, \omega_1, \phi_1, t) \sin(\omega_1 t - \phi_1) t, \quad (20)$$

$$RP1(\omega_1, h, n_0, k) = \sum_t Z(h, n_0, k, t) \sin(\omega_1 t - \phi_1) t, \quad (21)$$

$$\Delta LP1(\omega_1, h, n_0, k) = LP1(\omega_1) - RP1(\omega_1, h, n_0, k). \quad (22)$$

Аналогічно визначають параметри рівняння (18) оптимізації оцінки початкової фази  $\phi_l$  основної гармоніки.

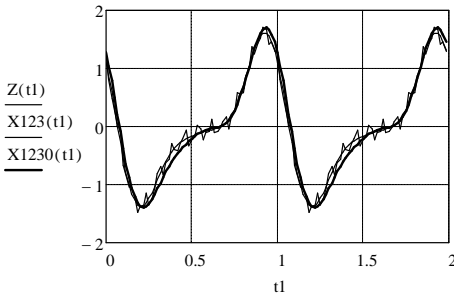


Рис.1. Оптимальне оцінювання періодичного трафіка по критерію МНК

Ітераційну процедуру оцінювання параметрів основної гармоніки періодичного трафіка завершують тоді, коли всі параметри (частота, фаза) визначаються з наперед заданою точністю.

Чисельний графоаналітичний ітераційний метод дозволяє дослідити вплив всіх параметрів обсягу завади на максимальний обсяг інформації, яка передається мережею.

На рис.1 зображені результати оптимального оцінювання періодичного трафіка по критерію МНК (трафік, що спостерігається  $Z(t)$ , істинне значення трафіка  $X123(t)$  та його оптимальна оцінка  $X1230(t)$ ).

Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити висновок, що оптимальна оцінка трафіка досить точно відображає особливості періодичного трафіка.

Практичне застосування досліджень процедури оптимального оцінювання гармонічного трафіка дозволяє всебічно дослідити основні закономірності моніторингу періодичного трафіка з урахуванням основних параметрів корисних сигналів і завад, будувати більш складні оптимальні процедури.

У **третьому розділі** набув подальшого розвитку метод статистичної оптимізації обслуговування трафіку в симплексних і дуплексних лініях зв'язку в багатоканальних системах, гетерогенних комп'ютерних мережах з метою оцінити втрати, що виникають через неоптимальність режиму, визначити відповідні керуючі впливи для наближення режиму до оптимального.

В якості вхідних числових характеристик виступають математичне очікування, дисперсія і коефіцієнт варіації оптимальної пропускної здатності, що обумовлена випадковими параметрами функцій втрат в  $N$ -канальній системі, що мають гаусовські розподіли з відповідними числовими характеристиками. У зв'язку з цим задача оптимізації обслуговування трафіку приймає статистичний характер. Критерій оптимізації перетворюється у функцію двох випадкових аргументів, від яких залежить оптимальне рішення.

Вихідні числові характеристики визначаються методом лінеаризації нелінійних функцій випадкових аргументів і гаусовської апроксимації розподілів випадкових величин. В якості критерію оптимізації вибрано критерій середнього ризику обслуговування трафіку.

Метод статистичної оптимізації обслуговування трафіку включає наступні операції: обґрунтування і вибір критерію та вхідних даних задачі; отримання залежностей вихідних характеристик від вхідних даних; визначення числових характеристик оптимального рішення задачі статистичної оптимізації обслуговування трафіку; формулювання висновків і практичних рекомендацій по результатам розв'язання задачі статистичної оптимізації обслуговування трафіку.

Математичне сподівання середнього ризику  $D_0$  визначається з урахуванням середнього коефіцієнту  $\rho_0$  використання лінії зв'язку через ймовірності протилежних подій:

$$D_0(a, b, c) = \frac{\rho_0}{1 + \rho_0} \frac{a}{c} + \frac{1}{1 + \rho_0} bc, \quad (23)$$

де  $a$ ,  $b$  – параметри функцій втрат і витрат,  $c$  – пропускна здатність симплексної лінії зв'язку.

Суттєвими недоліками вибору критерію оптимальності обслуговування трафіку у вигляді (23) є те, що він не враховує дію випадкових факторів - параметри втрат і витрат розглядаються як точно відомі детерміновані величини.

Для усунення цих недоліків параметри  $a$ ,  $b$  розглядаються як випадкові величини, що мають гаусовські розподіли з відповідними числовими характеристиками:

$$M[a] = m_a, \quad D[a] = \sigma_a^2, \quad M[b] = m_b, \quad D[b] = \sigma_b^2. \quad (24)$$

У цьому більш загальному випадку задача оптимізації обслуговування трафіку приймає статистичний характер. Критерій оптимізації перетворюється у функцію двох випадкових аргументів. Оптимальне рішення стає також залежним від цих двох випадкових аргументів.

Виконуючі операції обчислення математичного сподівання, дисперсії та коефіцієнта варіації критерію оптимізації (23) з урахуванням числових характеристик (24), отримуються числові характеристики (математичне

сподівання, дисперсія та коефіцієнт варіації) задачі статистичної оптимізації обслуговування трафіку:

$$M[D_0(a, b, c)] = \left( \frac{1}{1 + \rho_0} \right) \left( \frac{m_a \rho_0}{m_c} + m_b m_c \right), \quad (25)$$

$$D[D_0(a, b, c)] = \left( \frac{1}{1 + \rho_0} \right)^2 \left[ \left( \frac{\sigma_a \rho_0}{m_c} \right)^2 + \sigma^2 b m^2 c \right], \quad (26)$$

$$V[D_0(a, b, c)] = \sqrt{\left[ \left( \frac{\sigma_a \rho_0}{m_c} \right)^2 + \sigma^2 b m^2 c \right]} / \left( \frac{m_a \rho_0}{m_c} + m_b m_c \right). \quad (27)$$

Оптимальне рішення задачі статистичної оптимізації обслуговування трафіку також залежить від випадкових параметрів  $a$ ,  $b$ .

Оптимальне значення пропускну здатності:

$$C_{opt}(a, b) = \sqrt{\frac{a}{b}} \rho_0 = \sqrt{\rho_0} \sqrt{\frac{a}{b}}. \quad (28)$$

Мінімальне значення критерію середнього ризику:

$$D_{0min}(a, b) = \frac{2\sqrt{\rho_0}}{1 + \rho_0} \sqrt{ab}. \quad (29)$$

Критерій середнього ризику  $D_{0min}(\rho_0)$  досягає максимальних значень  $\rho_0 = 1$  при

$$D_{0min \max}(\rho_0 = 1) = \sqrt{ab}. \quad (30)$$

Числові характеристики оптимального рішення визначаються методом лінеаризації і гаусовської апроксимації розподілів випадкових функцій (28), (29). Після обчислення відповідних похідних і використання операцій визначення математичного сподівання отримуються математичне сподівання, дисперсія та коефіцієнт варіації оптимального значення пропускну здатності симплексного каналу:

$$M[C_{opt}(a, b)] = m_{c0} = \sqrt{\frac{m_a}{m_b}} \rho_0, \quad (31)$$

$$D[C_{opt}(a, b)] = D_{c0} = \frac{1}{4} m_{c0}^2 \left[ \frac{\sigma_a^2}{m_a^2} + \frac{\sigma_b^2}{m_b^2} \right], \quad (32)$$

$$V^2[C_{opt}(a, b)] = V_{c0}^2 = \frac{D[C_{opt}(a, b)]}{M^2[C_{opt}(a, b)]} = \frac{1}{4} [V_a^2 + V_b^2], \quad (33)$$

$$V[C_{opt}(a, b)] = V_{c0} = \frac{1}{2} \sqrt{[V_a^2 + V_b^2]}. \quad (34)$$

Рішення задачі для симплексної і дуплексної систем обслуговування трафіку узагальнюються на багатоканальні системи, в ролі яких звичайно

виступають багатоканальні лінії зв'язку, комунікаційні центри, вузли гетерогенних комп'ютерних мереж. В ролі критерію оптимізації пропускної здатності лінії зв'язку вибрано критерій середнього ризику обслуговування трафіку, який в цьому узагальненому випадку має такий вигляд:

$$D(n, N, a, b, C_N) = P(n \geq N) \frac{a_N}{C_N} + P(n < N) b_N C_N, \quad (35)$$

де  $a_N$  і  $b_N$  – випадкові параметри функцій втрат і витрат в  $N$  каналній системі,  $C_N$  – сумарна пропускна здатність вихідної багатоканальної лінії зв'язку,  $P(n \geq N)$  і  $P(n < N)$  – ймовірності того, що лінія буде зайнята і того, що лінія буде вільна.

Визначені основні характеристики багатоканальної системи обслуговування, обґрунтовані необхідні припущення для побудови її математичної моделі. Якщо справедлива апроксимація критерію середнього ризику (35) і прийняті припущення щодо функціонування багатоканальної системи, тоді оптимальне значення пропускної здатності вихідної багатоканальної лінії як функції випадкових параметрів  $a_N$  і  $b_N$

$$C_{\text{Opt}}(a_N, b_N) = \sqrt{\frac{P(n \geq N) a_N}{P(n < N) b_N}}. \quad (36)$$

Оптимальне значення пропускної здатності вихідної багатоканальної лінії забезпечує мінімальне значення критерію (35)

$$D_{\text{min}}(a_N, b_N) = 2\sqrt{P(n \geq N)P(n < N)}\sqrt{a_N b_N}. \quad (37)$$

При  $N = 1$  з результатів (34), (35) впливають як сингулярний випадок результати (28), (29) для симплексних каналів, тому (36), (37) є узагальненням задачі статистичної оптимізації обслуговування трафіку на випадки  $N > 1$ .

Для пошуку оптимального рішення для багатосистемної гетерогенної комп'ютерної мережі з різними техніко-економічними характеристиками систем обрано статистичний критерій оптимальності у вигляді сепарабельної адитивної функції вагових коефіцієнтів  $q_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , визначальних параметрів стану систем, втрат і витрат  $a_i$  і  $b_i$ , пропускних здатностей систем  $C_i$  як керованих змінних:

$$D_{N(q_i, n_i, N_s, a_i, b_i, C_i)} = \sum_{i=1}^{N_s} q_i D_i = \sum_{i=1}^{N_s} q_i (P_i(n_i \geq N_i) a_i c_i^{-1} + P_i(n_i < N_i) b_i c_i), \quad (38)$$

де  $N_s$  – загальне число різномірних систем обслуговування трафіку в гетерогенній комп'ютерній мережі,  $i = 1, N_s$ ,  $D_i$  – локальний критерій

оптимізації типу (35) для  $i$ -ої системи,  $q_i = D_i / \sum_{i=1}^N D_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -ої системи обслуговування.

Вагові коефіцієнти критерію оптимальності (38) повинні відповідати двом основним умовам: позитивності й нормування, тоді існує оптимальне рішення.

Розв'язання задач різних класів вимагає різних вхідних даних, тому виконана класифікація для обмежень за ознаками вибору значення вагових коефіцієнтів з метою розв'язання задач різних класів:

- всі параметри та обмеження накладаються на сумарну пропускну здатність комп'ютерної мережі;
- накладається на загальну вартість обслуговування систем мережі;
- враховує витрати, що обумовлені відмовами в обслуговуванні в мережі;
- враховує витрати на одиницю пропускну здатності системи;
- враховує коефіцієнти варіації тривалості обслуговування;
- враховує значення математичного сподівання сумарних витрат.

Обмеження представлено в узагальненому вигляді:

$$C_N = \sum_{i=1}^N g_i C_i, \quad (39)$$

де вагові коефіцієнти  $g_i$ ,  $i=1, N$  обираються в залежності від діючого в даний момент класу обмеження.

Головна вимога для задач оптимізації з обмеженнями: загальне число  $m_i$  обмежень не повинно дорівнювати або бути більше числа керованих змінних, тобто повинна виконуватися необхідна умова

$$m_i \leq n_c \cdot (m_i / n_c) \leq 1. \quad (40)$$

де  $n_c$  – загальне число керованих змінних. При виконанні умови (40) оптимальне рішення існує.

Використання різних за змістом вагових коефіцієнтів  $q_i$  дозволяє враховувати багато принципових відмінностей в техніко-економічних характеристиках систем гетерогенних комп'ютерних мереж або видів їх трафіка.

Статистична оптимізація обслуговування нестационарного трафіку визначає:

- числові характеристики критерію середнього ризику по числовим характеристикам випадкових параметрів  $a_N$ ,  $b_N$ , а також чисел  $n$ ,  $N$ ;
- вплив числа пакетів  $n$  і числа каналів  $N$  системи обслуговування трафіку на оптимальне рішення;
- переваги і недоліки застосування багатоканальної системи обслуговування трафіку, що функціонує в оптимальному режимі, відносно оптимальної симплексної лінії зв'язку.

Задачі статистичної оптимізації обслуговування трафіку в таких мережах є задачами статистичного пошуку реалізацій оптимального розподілу пропускних здатностей гетерогенних комп'ютерних мереж з урахуванням їх особливостей і реально існуючих обмежень.

Загальна постановка прямої задачі пошуку оптимального розподілу реалізацій пропускних здатностей систем в гетерогенній комп'ютерній мережі має такий вигляд: необхідно знайти оптимальний розподіл реалізацій пропускних здатностей систем мережі

$$C_{i \text{ opt}} = \arg \min_{C_i} D_N(C_i), i = 1, \dots, N, \quad (41)$$

за умови, що виконується нерівність

$$C_N = \sum_{i=1}^N g_i C_i \geq G_N^*, \quad (42)$$

де  $C_N^*$  – необхідне значення середньої пропускної здатності систем мережі.

Для розв'язання цієї нелінійної задачі оптимізації складається допоміжна функція Лагранжа виду

$$L(a_i, b_i, C_i, \lambda) = \sum_{i=1}^N q_i (a_i C_i^{-1} + b_i C_i) + \lambda \left[ C_N^* - \sum_{i=1}^N g_i C_i + v^2 \right], \quad (43)$$

де  $\lambda$  – допоміжний множник Лагранжа;

$v$  – допоміжна змінна, яка вводиться у тому випадку, коли (40) задано у вигляді нерівності.

Для пошуку оптимального розподілу реалізацій  $C_{i \text{ opt}}, i=1, \dots, N$  пропускних здатностей складових гетерогенної комп'ютерної мережі розв'язується система нелінійних рівнянь оптимізації

$$\begin{cases} \frac{\partial L(a_i, b_i, C_i, \lambda, q_i, g_i)}{\partial C_i} = 0, i = 1, \dots, N, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial v} = 0. \end{cases} \quad (44)$$

Оптимальний розподіл реалізацій  $C_{i \text{ opt}}$ , що отримується з розв'язання системи (44) забезпечує мінімальне значення  $D_{\min}(C_{i \text{ opt}})$  при дотриманні обмеження (42).

Допоміжний множник Лагранжу

$$\lambda = \frac{\partial D_{\min}(C_{i \text{ opt}})}{\partial C_N^*} \quad (45)$$

показує, як змінюється приріст значення  $D_{\min}(C_{i \text{ opt}})$  в залежності від приросту значення  $C_N^*$  обмеження.



За результатами третього розділу можна зробити наступні висновки: методи статистичної оптимізації обслуговування трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах по числовим характеристикам вхідних випадкових даних розв'язують задачі оптимізації пропускних здатностей ліній зв'язку в умовах невизначеності, коли оптимальні рішення залежать від випадкових параметрів.

В **четвертому розділі** наведені результати експериментального дослідження запропонованих методів виявлення періодичності та спектру нестационарного трафіка на фоні завад, статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах.

Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів підтверджуються обчислювальними експериментами, які дозволили виявити закономірності, корисні властивості, особливості й можливості практичного використання запропонованих методів.

Запропоновано новий метод верифікації моделей нестационарного трафіка в гетерогенних комп'ютерних мережах. Процедура верифікації розуміється як перевірка адекватності моделей трафіка еталонній моделі за допомогою обраних критеріїв і показників адекватності, у ролі яких використані цільові функціонали, що визначають точність і достовірність моделей нестационарного трафіка.

Для підтвердження ефективності розробленого методу верифікації проведена оптимізація моделей нестационарного трафіка поліноміального виду в гетерогенних комп'ютерних мережах.

Побудова ефективних моделей поліноміального трафіка виконується по критерію оптимізації математичного сподівання та дисперсії в дискретному (46) і безперервному (47) випадку, в ролі якого було вибрано квадрат відстані між числовими характеристиками еталонного і модельного трафіка.

в дискретному випадку:

$$\begin{aligned} \varepsilon^2(Z_1, Z_n) &= \sum_{t_k=0}^N [t_k (m_1 - m_2 t_k) - \sum_{i=1}^n Z_i P_i(t_k)]^2 \\ \varepsilon 1^2(d_1, d_n) &= \sum_{t_k=0}^N [D_2 t_k^4 + D_1 t_k^2 - \sum_{i=1}^n d_i P_i^2(t_k)]^2 \end{aligned} \quad (46)$$

в безперервному випадку:

$$\begin{aligned} \varepsilon 0^2(Z_1, Z_n) &= \int_0^1 [t_k (2 - t_k) - \sum_{i=1}^n Z_i P_i(t_k)]^2 dt_k \\ \varepsilon 2^2(d_1, d_n) &= \int_0^1 [D_2 t_k^4 + D_1 t_k^2 - \sum_{i=1}^n d_i P_i^2(t_k)]^2 dt_k \end{aligned} \quad (47)$$

У ролі показників точності обрані: середнє значення середньоквадратичного відхилення модельних значень трафіка від значень

еталонної моделі на інтервалі нестационарності, середнє значення коефіцієнта варіації, коефіцієнти конкордації модельних і еталонних значень обвідної трафіку, точкові та інтервальні оцінки конкордації.

Критеріями адекватності служать точкові та інтервальні оцінки конкордації між собою модельних і еталонних значень моментів поліноміального трафіка на інтервалі нестационарності:

- середнє значення критерію конкордації моделі і еталону нестационарного трафіка для дискретного випадку:

$$\rho_0(Z_1, Z_2) := \sum_{t_k=0}^1 \frac{2 \cdot m(t_k) \cdot M(Z_1, Z_2, t_k)}{m(t_k)^2 + M(Z_1, Z_2, t_k)^2} \quad (48)$$

- інтегральний критерій конкордації моделі і еталону нестационарного трафіка для безперервного випадку:

$$\rho_0(Z_1, Z_2) = \int_0^1 \frac{2 \cdot m(t_k) \cdot M(Z_1, Z_2, t_k)}{m(t_k)^2 + M(Z_1, Z_2, t_k)^2} dt_k \quad (49)$$

- конкордації середніх значень трафіка на інтервалі нестационарності виду:

$$r_0(Z_{10}, Z_{20}) = \frac{2m_0 M_0(Z_{10}, Z_{20})}{m_0^2 + M_0(Z_{10}, Z_{20})^2} \quad (50)$$

Крім узгодження моделей і еталону нестационарного трафіка, є ще втрати адекватності, для характеристики яких введено показник неадекватності моделі і еталону нестационарного трафіка

$$\pi_2 = 1 - \rho_0(Z_{10}, Z_{20}) \quad (51)$$

Значення інтегральних показників (48, 49) розглядаються як песимістичні оцінки адекватності моделі і еталону нестационарного трафіка, а значення показника конкордації середніх значень трафіка на інтервалі нестационарності (50) - як оптимістичну оцінку адекватності моделі і еталону нестационарного трафіка. Тому можна застосовувати також інтервальну оцінку адекватності виду:

$$\text{Ipr}(Z_1, Z_2) = [\rho_0(Z_1, Z_2), r_0(Z_1, Z_2)] \quad (52)$$

Довжина інтервалу (52) може служити мірою адекватності моделі і еталону. Показник конкордації середніх значень трафіка на інтервалі нестационарності нелінійний і зворотно пропорційний ступеню адекватності, тому більш зручними є точкові оцінки адекватності і неадекватності моделі і еталону нестационарного трафіка.

$$\rho_0(Z_1, Z_2) = (\rho_0(Z_1, Z_2) + r_0(Z_1, Z_2)) / 2 \quad (53)$$

$$\pi_0 = 1 - \rho_0(Z_1, Z_2) \quad (54)$$

Процес верифікації є ітераційним.

В таблиці 1 подані результати розрахунків значень показника конкордації модельних і еталонних значень нестационарного трафіка в окремих точках спостережень  $t_k$ , де  $\rho_{kd}$  – значення показника конкордації для моделі, що оптимізована у просторі Евкліда;  $\rho_{kn}$  – значення показника конкордації для моделі, що оптимізована у просторі Гілберта.

**Таблиця 1**  
**Результати порівняння адекватності моделей нестационарного трафіка**

$t_k$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\rho_{kd}$	0.0	0.905	0.941	0.967	0.983	0.993	0.998	1.0	1.0	1.0	1.0
$\rho_{kn}$	0.0	0.932	0.998	0.991	0.992	0.996	0.999	1.0	1.0	0.999	0.999

Аналіз результатів, наведених у (табл.1, рис.2) показує, що розроблені моделі достатньо точно відображають еталонний трафік.

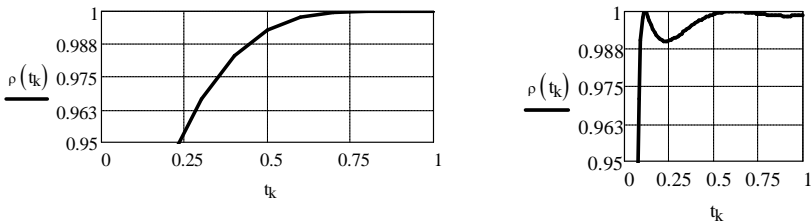


Рис. 2. Динаміка показника конкордації для дискретного та неперервного випадків

В дискретному випадку наближення виконується по кінцевому числу точок інтервалу нестационарного трафіка, тому накопичена відносна похибка має значно менше значення в порівнянні з відносною похибкою в безперервному випадку. В той же час апроксимація трафіка в дискретному випадку реально виконується гірше. Порівняння початкових моментів модельного та еталонного трафіка показує, що досягається цілком задовільна адекватність моделювання початкового моменту нестационарного трафіка.

Метод статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіка відстежує коливання трафіка з відносною випадковою похибкою, середнє квадратичне значення якої складає 10% від амплітуди змінної складової трафіка. Пропускна здатність лінії зв'язку також змінюється періодично. Якщо похибки вимірювання та управління трафіком відсутні, для оптимального обслуговування трафіку у цьому випадку необхідно дотримуватися умов:

$$b_0 > a_0, b_1 = a_1, \omega_2 = \omega_1, \Phi_2 = \Phi_1,$$

де  $b_0, b_1$  – амплітуди постійної і змінної складової пропускної здатності лінії;  $a_0, a_1$  – амплітуди постійної і змінної складової трафіка;  $\omega_2, \Phi_2$  – відповідно, частота коливання і початкова фаза пропускної здатності лінії.

Часові діаграми для цього ідеалізованого випадку представлені на рис. 3. В реальних умовах обслуговування трафіку похибки вимірювання та управління трафіком мають місце (рис. 4).

Графіки рис. 3-4 побудовані при таких числових значеннях параметрів:

$$a_0 = 0.5 \cdot 10^4 \text{ bit/sec}, a_1 = 0.125 \cdot 10^4 \text{ bit/sec}, \omega_1 = 2 \cdot 3.14 \cdot F_1, F_1 = 12 \text{ Hz}, \\ \Phi_1 = 0.35 \text{ Rad. } b_0 = 0.52 \cdot 10^4 \text{ bit/sec}, b_1 = 0.125 \cdot 10^4 \text{ bit/sec}, \omega_2 = 2 \cdot 3.14 \cdot F_2, \\ F_2 = 12 \text{ Hz}, \Phi_2 = 0.345 \text{ Rad.}$$

Реалізації похибок  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  моделювалися в системі Mathcad за допомогою функцій  $\xi_1 = \text{rnorm}(1, m_1, s_1)$ ,  $\xi_2 = \text{rnorm}(1, m_2, s_2)$ , де  $m_1 = m_2 = 0$ ;  $s_1 = 0.0125 \cdot 10^4 \text{ bit/sec}$ ,  $s_2 = 0.0125 \cdot 10^4 \text{ bit/sec}$ .

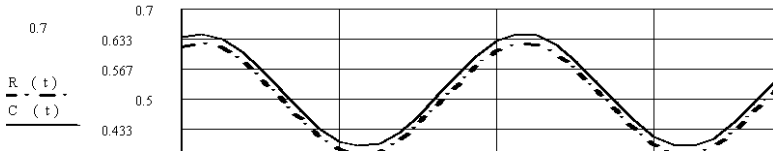


Рис. 3. Часова діаграма вимірювання та управління трафіком з відсутніми похибками

Параметри системи оптимального обслуговування повинні адаптивно налаштовуватись під зміни реалізацій трафіку. Це виконується за рахунок оптимального вибору постійної складової  $b_0$  пропускної здатності та інших параметрів.

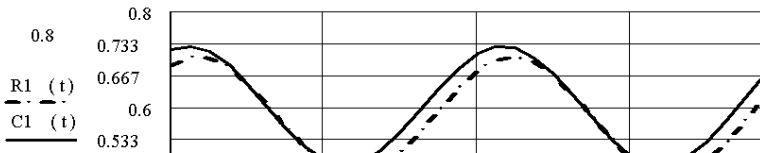


Рис. 4. Часова діаграма вимірювання та управління трафіком з похибками

На рис.5 наведено графік оптимального вибору пропускної здатності по критерію середнього ризику обслуговування нестационарного трафіку. Графіки побудовані при таких числових значеннях параметрів:  $\rho_0 = 0.961540$ ,  $P = 0.490197$ ;  $A = 5 \cdot 10^7 \text{ bit/sec}$ ;  $B = 2.5 \text{ bit/sec}$ . Оптимальне рішення має вигляд:

$$C_{opt} = 4.383 \cdot 10^3 \text{ bit/sec}, L_{min} = 1.118 \cdot 10^4 \text{ bit/sec.}$$

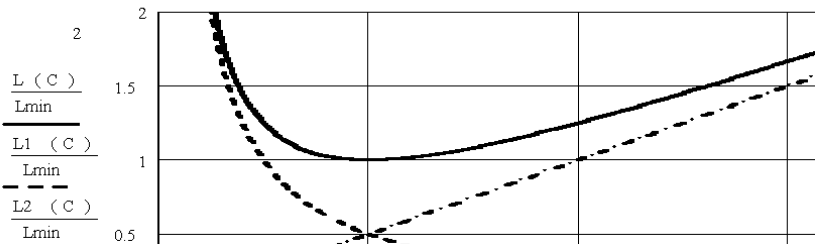


Рис. 5. Оптимальний вибір пропускної здатності по критерію середнього ризику обслуговування нестационарного трафіку

Таким чином результати експериментальних досліджень методом імітаційного моделювання в середовищі *Mathcad* підтвердили основні теоретичні положення, показали працездатність і ефективність використання запропонованих методів.

**Додатки** А-Г містять: пакети прикладних програм у *Mathcad* для дослідження і обслуговування нестационарного трафіку, практичні рекомендації щодо використання результатів роботи, акти впровадження результатів дослідження у навчальний процес ВНЗ, їх використання при виконанні НДР

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано нове вирішення актуальної наукової задачі, що полягає у підвищенні якості обслуговування нестационарного трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах, розробці нових та вдосконаленні існуючих методів статистичної оптимізації по критерію мінімуму середнього ризику обслуговування трафіку з урахуванням існуючих обмежень на базі вдосконалених логіко-математичних моделей нестационарного трафіка з високим ступенем адекватності.

Основні наукові та практичні результати проведеного дисертаційного дослідження полягають у наступному:

1. Удосконалено метод виявлення періодичності спектру нестационарного трафіка на фоні завад, досліджено вплив основних параметрів завади на обсяг інформації, яка передається мережею.

2. Набув подальшого розвитку метод статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіку в симплексних і дуплексних лініях зв'язку в багатоканальних системах, гетерогенних комп'ютерних мережах. На основі запропонованого методу оцінено втрати, що виникають в мережах передачі даних, визначено керуючі впливи для наближення режиму передачі даних до оптимального.

3. Обґрунтовані критерії оптимальності і обмеження в прямій постановці задачі оптимізації розподілу пропускних здатностей в

комп'ютерних мережах з урахуванням їх неоднорідності. Виконана класифікація обмежень задач оптимізації за ознаками вибору значень вагових коефіцієнтів.

4. Вперше розроблено метод верифікації логіко-математичних моделей динаміки нестационарного трафіка, який враховує параметр розмірності моделей з різним числом станів трафіку для перевірки адекватності моделей, а також виконує оцінку впливу некерованих змінних на оптимальні рішення.

5. Розроблено графоаналітичний ітераційний метод пошуку оптимальних числових рішень рівнянь оптимізації параметрів нестационарного трафіка. Для досліджень процедури розроблено пакети прикладних програм в системі *Mathcad* для оптимального оцінювання та верифікації моделей нестационарного трафіка.

6. Практичне застосування запропонованого методу виявлення періодичності та спектру нестационарного трафіка на фоні завад дозволяє визначити основні закономірності періодичного трафіка з урахуванням обраних параметрів корисних сигналів і завад та реалізувати оптимальні процедури моніторингу.

7. Результати експериментальних досліджень підтвердили адекватність розроблених моделей та запропонованих методів, виявили основні особливості їх практичного використання для оптимізації обслуговування нестационарного трафіку в мережах передачі даних та комп'ютерних системах і мережах.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Ладигіна О.А. Дослідження методів та моделей управління трафіком в комп'ютерних мережах / О.А. Ладигіна // *Проблеми інформатизації та управління*: Зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2011. – №4(36). – С.60-66.

2. Ігнатов В.О. Оптимізація моделей нестационарного поліноміального трафіку комп'ютерної мережі / В.О. Ігнатов, М.М. Гузій, О.А. Ладигіна // *Проблеми інформатизації та управління*: Зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2014. – №3(47). – С.36-40.

3. Ігнатов В.О. Статистична оптимізація обслуговування трафіка в гетерогенних інфокомунікаційних мережах / В.О. Ігнатов, М.М. Гузій, О.А. Ладигіна // *Проблеми інформатизації та управління*: Зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2015. – №1(49). – С.37-40.

4. Ладигіна О.А. Спосіб виявлення скритої шумом періодичності трафіку / О.А. Ладигіна // *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. праць. – К.: НАУ, 2015 – №2(50). – С.86-90.

5. Ігнатов В.О. Визначення та дослідження спектру періодичного трафіку / В.О. Ігнатов, О.А. Ладигіна // *Проблеми інформатизації та управління*: Зб. наук. праць. – К.: НАУ, 2015. – №3(51). – С.61-66.

6. Ладигіна О.А. Розв'язання задач статистичної оптимізації розподілу пропускних здатностей гетерогенних мереж / О.А. Ладигіна // *Проблеми*

*інформатизації та управління*: Зб. наук. праць. – К.: НАУ, 2015. – №4(52). – С.82-87.

7. Ладигіна О.А. Верифікація моделей нестационарного поліноміального трафіку / О.А. Ладигіна // *Наукоємні технології*. – К.: НАУ, 2018. – №4(40). – С. 410-414.

8. Ладигіна О.А. Оптимізація методів верифікації моделей нестационарного трафіку / О.А. Ладигіна, М.М. Гузій // *Наукоємні технології*. – К.: НАУ, 2019. – №1(41). – С. 16-22.

9. Ладигіна О.А. Оптимальне оцінювання гармонійних складових нестационарного трафіку / О.А. Ладигіна // *Наукоємні технології*. – К.: НАУ, 2019. – №3(43). – С. 307-312.

10. Ігнатов В.О. Верифікація моделей нестационарного трафіку комп'ютерних мереж / В.О. Ігнатов, М.М. Гузій, О.А. Ладигіна // *Комп'ютерні системи та мережні технології: VI міжнародна науково-технічна конференція, 11-13 черв. 2013: Збірн. тез.* – К.: НАУ, 2013. – С.64.

11. Ладигіна О.А. Обмеження задач оптимізації розподілу пропускних здатностей систем гетерогенних інфокомунікаційних мереж / О.А. Ладигіна // *Інформаційна безпека та комп'ютерні технології: Міжнародна науково-практична конференція, 24-25 берез. 2016 : Збірн. тез.* – Кіровоград: КНТУ, 2016. – С.104-105.

12. Ladygina O.A. Optimal Identification of the Periodic Traffic Structure in Heterogeneous Computer Networks Distorted by Noise / O.A. Ladygina // *XIV International Scientific Conference "AVIA-2019"*, Kyiv, April 23-25, 2019, С.8.39-8.41.

## АНОТАЦІЯ

**Ладигіна О.А.** Методи статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти. Національний авіаційний університет, Київ, 2020.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності обслуговування нестационарного трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах за рахунок статистичної оптимізації обслуговування нестационарного трафіку з урахуванням існуючих обмежень та вдосконалення моделей нестационарного трафіка для підвищення їх адекватності реальним умовам.

Поставлені і розв'язані задачі побудови удосконалених моделей динаміки поліноміального і періодичного трафіка; розробки методів й алгоритмів статистичної оптимізації обслуговування трафіку в симплексних, дуплексних та в багатоканальних системах, в гетерогенних комп'ютерних мережах.

*Ключові слова:* нестационарний трафік, обслуговування трафіку, гетерогенна комп'ютерна мережа, статистична оптимізація, верифікація моделей трафіка.

### ABSTRACT

**Ladygina O.A.** Methods of Statistical Optimization of Servicing Unstable Traffic in Heterogeneous Computer Networks. Manuscript.

Dissertation for the degree of a Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – National Aviation University, Kyiv, 2020.

The objective of the dissertation is to increase the efficiency of non-stationary traffic service in heterogeneous computer networks by statistical optimization of non-stationary traffic service taking into account the existing limitations and improvement of non-stationary traffic models to increase their adequacy to real conditions.

The tasks to build the improved models of dynamics of polynomial and periodic traffic were set and solved; traffic periodicities on the background of obstacles were disclosed; the structures and parameters of traffic which has random periodic character were determined, that is the numbers and parameters of harmonics in the structure of unstable traffic were also determined; the methods and algorithms of statistical optimization of servicing traffic in simplex, duplex, many-server systems and heterogeneous computer networks were developed; mathematical models of the criteria of optimality of servicing traffic and limits for heterogeneous and computer networks were developed.

Every problem description presents grounding of the choice of necessary data, method of task solving and expected results. The statistical data of the direct measuring of traffic in heterogeneous computer networks are used as incoming data and the results of the observations of their operation.

The grounding of the influence of the choice of number of quantization levels on the accuracy indicators in constructing models by quantization method, Markov approximation and model improvement parameters was presented. The dependence of optimality criteria on random parameters, the choice of method for optimization and search for optimal solving were given. The analysis of dependences of optimal decision on the parameters of functioning of many-server system of servicing traffic was also offered.

The task of verification of the improved models of polynomial unstable traffic and the structure and parameters of multi-component periodic traffic on the background of obstacle was solved.

*Key words:* unstable traffic, servicing the traffic, heterogeneous computer network, statistical optimization, verification of traffic models.



**СВІДОЦТВО ПРО ВНЕСЕННЯ СУБ'ЄКТА ВИДАВНИЧОЇ СПРАВИ ДО ДЕРЖАВНОГО  
РЕЄСТРУ ВИДАВЦІВ, ВИГОТІВНИКІВ І РОЗПОВСЮДЖУВАЧІВ ВИДАВНИЧОЇ ПРОДУКЦІЇ**  
Серія ДК № 1537 від 22.10.2003 р.

Підп. до друку 21.10.2020 р. Формат 60х90/16. Папір офсет.  
Друк різнограф. Ум. др. арк. 0,9. Тираж 100. Зам. № 9397.

---

---

**РЕДАКЦІЙНО-ВИДАВНИЧИЙ ВІДДІЛ**

*Центральноукраїнського державного педагогічного  
університету імені Володимира Винниченка*

*25006, Кропивницький, вул. Шевченка, 1.*

*Тел.: (0522) 24-59-84.*

*Факс.: (0522) 24-85-44.*

*E-Mail: mails@kspu.kr.ua*

