

Зайченко Олена Юріївна

На правах рукопису
УДК 681.3

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ
ТА СИНТЕЗУ СТРУКТУРИ
КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ
РОЗПОДІЛЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

05.13.08 - обчислювальні машини , системи та мережі, елементи та пристрої обчислювальної техніки та систем управління

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-1996



00759722 (W)

Дисертацією є рукопис.
 Роботу виконано на кафедрі авто
 та управління НТУ України "Київський

- Науковий керівник: - доктор технічних наук,
 професор Печурін Микола Капітонович
- Офіційні опоненти: - доктор технічних наук,
 професор Додонов Олександр Георгійович
- кандидат технічних наук,
 Шалугін Сергій Сергійович
- Провідна організація: - Інститут проблем реєстрації
 інформації НАН України, м. Київ

Захист відбудеться "22" апреля 1996р. о "14.30" годині на
 засіданні спеціалізованої Ради Д 01.02.06 в НТУ України "Київський
 політехнічний інститут" за адресою 252056, м.Київ, проспект Перемоги, 37,
 корп.18, ауд. 306.

Відгуки на автореферат в двох примірниках просимо надсилати за
 адресою: 252056, м.Київ, пр. Перемоги, 37, Вченому секретарю НТУУ
 "КПІ".

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці НТУ України
 "Київський політехнічний інститут"

Автореферат розіслано "4" марта 1996р.

Вчений секретар
 спеціалізованої ради,
 доктор технічних наук,
 професор

О.В.Бузовський

ЛННБ ім. В. Стефаника

України

АНОТАЦІЯ

Метою дисертаційної роботи є розробка моделей, методів і програмних засобів аналізу та синтезу комунікаційних систем розподілених комп'ютерних мереж.

Для досягнення цієї мети в дисертації розв'язані такі задачі:

1. Сформульована задача аналізу ймовірнісно-часових характеристик комунікаційних мереж.
2. Розроблені моделі та алгоритми розв'язання задач вибору пропускових спроможностей та розподілення потоків в комунікаційній мережі при обмеженнях на ймовірність своєчасної доставки.
3. Розроблений метод розв'язання задачі знаходження максимального потоку в розподіленій мережі при відмовах її елементів.
4. Введено показник живучості мережі і розроблена методика його оцінки.
5. Сформульована задача синтезу структури розподіленої мережі при обмеженнях на показники своєчасності доставки повідомлень і живучості мережі та запропоновано алгоритм її розв'язання.

Автор захищає :

- 1) метод вибору оптимальних пропускових спроможностей в комунікаційній мережі (КМ) при обмеженнях на ймовірність своєчасної доставки;
- 2) метод розподілення потоків в мережі по критерію ймовірності своєчасної доставки;
- 3) алгоритми знаходження максимального потоку в комунікаційній мережі при обмеженні на середній час доставки;
- 4) методику оцінки показників живучості мережі при відмовах її елементів;
- 5) алгоритм синтезу структури розподіленої мережі при обмеженнях на показники живучості і своєчасності доставки.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. На сьогоднішній день в Україні реалізується національна програма інформатизації, частиною якої є програма створення національної інформаційно-комп'ютерної мережі, а також регіональних і відомчих комп'ютерних мереж різного призначення. Важливими задачами, що виникають в процесі проектування КМ, є задачі аналізу таких найважливіших показників якості, як своєчасність доставки та синтезу структури комунікаційної мережі по вищезгаданому показнику. Для вирішення вказаних задач необхідна розробка адекватних моделей і методів аналізу ймовірнісно-часових та надійнісних характеристик мереж та оптимізації їх структури.

Застосування вказаних методів дозволить створити наукові основи раціонального проектування топології КМ, та забезпечити вже на етапі проектування досягнення заданих показників якості функціонування, зменшити капітальні затрати на створення мереж.

Методи дослідження. Основними методами дослідження в даній роботі є методи теорії масового обслуговування, дослідження операцій, методи дискретної оптимізації, теорія надійності та живучості.

Наукова новина досліджень полягає в наступному :

- запропонована модель аналізу ймовірно-часових характеристик КМ, яка дозволила сформулювати нові задачі аналізу мереж при обмеженні на ймовірність своєчасної доставки;
- розроблено точний метод вибору оптимальних пропускних спроможностей комунікаційної мережі при обмеженні на ймовірність своєчасної доставки ;
- розроблено метод знаходження максимального потоку в мережі при обмеженні на середній час доставки повідомлень, який відрізняється від існуючих тим, що розглядається багатопродуктовий потік і враховується обмеження на своєчасність доставки пакетів;
- запропонована методика оцінки показників живучості мережі при відмовах її елементів;
- розроблений алгоритм оптимізації структури КМ при обмеженнях на показники своєчасності доставки та живучості.

Практична цінність. На основі запропонованих в дисертації методів , моделей та алгоритмів створений програмний комплекс "Аналіз та синтез РОМ" . Даний комплекс дозволяє розв'язувати задачі аналізу часових та ймовірно-часових характеристик та показників живучості комп'ютерних мереж та їх комунікаційних мереж на етапі проектування та оптимізувати структуру розподіленої мережі. Застосування вказаного комплексу дає можливість науково-обгрунтованого проектування топології комп'ютерних мереж, дозволяє вибрати раціональну структуру мережі, мінімізуючу капітальні затрати на побудову мережі при досягненні заданих рівнів показників якості по своєчасності доставки та живучості .

Обгрунтованість та вірогідність наукових висновків та практичних рекомендацій дисертації підтверджується коректним застосуванням математичного апарату, доведеними теоретичними твердженнями, а також результатами застосування наукових результатів при вирішенні практичних задач проектування комп'ютерних мереж.

Реалізація результатів роботи. Розроблений комплекс моделей, алгоритмів та програм був використаний в наступних проектах :

- в проєкті шифр " Банк " для вибору структури базової комунікаційної мережі для національного банку комп'ютерної інформації та аналізу її характеристик;
- оптимізації топологічної структури національної інформаційно-комп'ютерної мережі (НКМ) України та аналізу її часових та надійнісних характеристик (шифр " Топологія ").

Запропонована методика оцінки показників живучості була застосована для аналізу живучості базової комунікаційної мережі для НКМ України . Розроблені алгоритми та програмні засоби використовуються в

використовуються в навчальному процесі на кафедрі ММСА КПІ в курсі "Математичне моделювання обчислювальних систем".

Апробація роботи. Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на: міжнародній конференції "Автоматика - 94" (Київ, КПІ, 1994), міжнародній конференції по інформаційним системам та мережам МКІСІС-94 (С.Петербург, 1994), на конференції "Інформаційні мережі та системи" (Суздаль, 1995) та Міжнародній конференції "Проблеми алгебри та кібернетики" (Гомель, 1995).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 8 друкованих робіт.

Структура та обсяг роботи. Дисертація містить вступ, чотири глави, список літератури та додатки. Зміст роботи викладено на 115 ст. машинописного тексту та ілюстровано 12 рис., 47 табл. Бібліографія містить 92 найменувань. В вступі міститься аналітичний огляд літератури по аналізу та синтезу.

В першій главі висвітлені задачі аналізу ймовірно-часових характеристик комп'ютерних мереж, розроблені алгоритми вибору пропускних спроможностей, розподілу потоків в КМ при обмеженнях на надійність своєчасної доставки.

В другій главі розглянута задача про знаходження максимального потоку в КМ, запропоновані показники живучості мережі та розроблені алгоритм та методика оцінки показників живучості КМ.

В третій главі сформульована задача синтезу структури КМ при обмеженнях на ймовірність своєчасної доставки та показники живучості мережі та описано алгоритм її рішення.

В четвертій главі приводяться результати експериментальних досліджень розроблених методів та алгоритмів, а також матеріали по практичному застосуванню розробленого комплексу в задачах проектування мереж.

В додатках приводяться опис програмного комплексу, що реалізує запропоновані алгоритми аналізу та структурного синтезу мереж, акти про застосування наукових результатів дисертації.

ГОЛОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

1. Аналіз ймовірно-часових характеристик РКМ.

Розглядається комунікаційна система розподіленої комп'ютерної мережі, в якій задані структура $G=(X,E)$, де X - множина вузлів мережі, $E = \{(i,j)\}$ - множина дуг (каналів зв'язку), сполучаючих вузли x_i та x_j , матриця вимог в передачі інформації $H = h_{ij}$, $i,j = 1,n$, h_{ij} - величина потоку (пак./с), який потрібно передавати від x_i до x_j , набір типів каналів зв'язку $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ та відповідних їм питомих собівартостей каналів зв'язку $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$, де c_k - питома собівартість одиниці довжини каналу, що має пропускну спроможність d_k .

Для побудови аналітичної моделі оцінки ймовірісно-часових характеристик введено такі припущення:

1. Вхідні потоки вимог-Пуасонівські.

2. Час обслуговування в каналах зв'язку розподілено по експоненціальному закону, з середнім $\bar{t}_{\text{обс}} = \frac{1}{\mu_n}$, де μ_n - пропускна спроможність каналу зв'язку (r, s) , (інтенсивність обслуговування).

3. Канали зв'язку ненадійні, інтенсивність відмов зв'язку (r, s) γ_n , а інтенсивність відновлення η_{rs} . При цьому середній час роботи на відмову

$T_{o,rs} = \frac{1}{\gamma_{rs}}$, а середній час відновлення $T_{вн} = \frac{1}{\eta_n}$. Головний надійнісний показник каналу зв'язку (r, s) - коефіцієнт готовності

$$k_{r,s} = \frac{T_{O,rs}}{T_{O,rs} + T_{B,rs}} \quad (1)$$

4. Крім того будемо вважати, що інформація в пакетах старіє, при цьому час старіння $t_{\text{стпр}}$ - випадкова величина, яка розподілена по експоненціальному закону з інтенсивністю ν , що однакова для всіх видів повідомлень.

При цих допущеннях ймовірність своєчасної доставки повідомлень в режимі комутації повідомлень по одному каналу зв'язку (r, s) за час $t_n \leq t_{\text{стпр}}$ визначається при допомозі формули, що отримана Г.П. Захаровим:

$$P_{\text{ст}} = P\{t_n \leq t_{\text{стпр}}\} = \frac{\mu_n - \lambda}{\mu_n - \lambda + \nu} \quad (2)$$

де- $\mu_n = \mu_n k_r$ - ефективна пропускна спроможність каналу зв'язку (r, s) , $\nu_e = \nu(1 + \mu k_r k_n / \nu k_r + \eta)$ - ефективна інтенсивність старіння, $k_n = 1 - k_r$ - коефіцієнт простою каналу, η - інтенсивність відновлення каналу зв'язку (r, s) .

Знайдемо ймовірність своєчасної доставки між якою небудь парою кореспондуючих вузлів в мережі. Як відомо, при вищепроведених допущеннях середня затримка пакетів в мережі $T_{\text{оп}}$ описується виразом

$$T_{\text{оп}} = \frac{1}{\Lambda_{\Sigma}} \sum_{(r,s)} \frac{\lambda_n}{\mu_n - \lambda_n} \quad (3)$$

де μ_n - пропускна спроможність каналу зв'язку (r, s) , $\Lambda_{\Sigma} = \sum_i \sum_l \lambda_n$ - сумарний зовнішній потік передаваних по мережі.

Знайдемо тепер середню ймовірність своєчасної доставки для мережі в цілому:

$$P_{CD} = P\{T_{\varphi} \leq t_{\text{зад}}\} = M \exp\{-v T_{\varphi}\} = M \exp\left\{-v \frac{1}{\Lambda_{\Sigma}} \sum \frac{\lambda_n}{\mu_n - \lambda_n}\right\} = \\ = M \exp\left\{-\frac{v}{\Lambda_{\Sigma}} \sum_{(r,s) \in E} \lambda_n t_n\right\} = \prod_{(r,s) \in E} M \exp\left\{-\frac{v t_n}{\Lambda_{\Sigma}} \lambda_n\right\}$$

та з урахуванням того, що

$$M \exp\{-v t_n\} = P\{t_n \leq t_{\text{зад}}\} = \frac{\mu_n k_r - \lambda_n / n_n}{\mu_n k_r - \lambda_n / n_n + v} \quad (4)$$

отримасмо кінцевий вираз

$$P_{CD} = \prod_{(r,s) \in E} \frac{\mu_n k_r - \lambda_n}{\mu_n k_r - \lambda_n + v} = \prod_{(r,s) \in E} P_{CD}(t_n \leq \sigma_n t_{\text{зад}}) \quad (5)$$

де $\sigma_n = \lambda_n / \Lambda_{\Sigma}$.

В роботі розглядаються та досліджуються три типи найбільш важливих задач аналізу ймовірнісно-часових характеристик розподіленої обчислювальної мережі.

1. задача вибору пропускних спроможностей каналів зв'язку (ВПС);
2. задача вибору маршрутів та розподілення потоків в мережі (РП);
3. задача ВПС РП, яка є комбінацією вищезгаданих.

Використовування ймовірності своєчасної доставки замість обмеження на час доставки, дозволить по новому сформулювати ці задачі.

Задача ВПС для розподіленої обчислювальної мережі

Задана структура мережі $G = (X, E)$, матриця $H = \|h_i\|$ та розподілення потоків в каналах $(\lambda_n), (r, s) \in E$, набір каналів зв'язку з різною пропускною спроможністю $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ та відома собівартість одиниці довжини каналу типу $k - C_k, k = \overline{1, k}$. Необхідно знайти такі пропускні спроможності всіх ліній зв'язку $(r, s) \mu_n^0$, при яких

$$C_{\Sigma} = \sum_{(r,s) \in E} C_n^{\text{нов}}(\mu_n^0) \rightarrow \min \quad (6)$$

при умовах:

$$P_{CD} = \prod_{(r,s) \in E} \frac{\mu_n k_r - \lambda_n / n_n}{\mu_n k_r - \lambda_n / n_n + v} \geq P_{CD}^{\text{зад}} \quad (7)$$

та очевидних умовах

$$\mu_n k_r \geq \lambda_n / n_n \quad (8)$$

Ця задача відноситься до класу комбінаторних задач нелінійного дискретного програмування і точні методи її рішення раніше були невідомі. В дисертації розроблений точний метод її рішення (А1) для випадку дискретних ПС, що використовує ідеї послідовного аналізу та відсіву варіантів (ПАВ).

Алгоритм ВПС(А1). Алгоритм А1 містить в собі послідовне застосування процедури відсіву по обмеженню W_1 та відсіву по значенням цільової функції (процедура W_2).

Початковий етап.

Спочатку знаходимо діапазон зміни по кожній із перемінних :

$$\mu_n : [\mu_{n \min}, \mu_{n \max}] \quad \forall (r, s)$$

1. За $\mu_{n \min}$ вибираємо таке значення, для якого виконується наступна умова

$$P_{CI}^n = P\{t_n \leq t_{\max}\} = \frac{\mu_n k_r - \lambda_n}{\mu_n k_r - \lambda_n + v_y \frac{\lambda_n}{\Lambda_\Sigma}} \geq P_{CI}^{\max} \quad (9)$$

2. За $\mu_{n \max}$ вибираємо μ_n^0 , яке визначається із умови:

$$P_{CI}^n(\mu_n^0, \{\mu_{bq \min}\}) \quad \forall (b, q) \neq (r, s) \geq P_{CI}^{\max} \quad (10)$$

Потім переходимо до I-ої ітерації.

1-а ітерація. Процедура W_2 .

1. Знаходимо

$$C_{\Sigma \min} = \sum_{(r,s) \in E} C_n^{\text{оп}}(\mu_{n \min}) \quad \text{та} \quad C_{\Sigma \max} = \sum_{(r,s) \in E} C_n^{\text{оп}}(\mu_{n \max})$$

Привісноємо

$$C_1^* = \frac{1}{2}(C_{\Sigma \min} + C_{\Sigma \max})$$

2. Виконуємо відсів існуючих значень (μ_n) по умові $C_\Sigma((\mu_n)) \leq C_1^*$.

Тоді умова відсіву значень для перемінної μ_n має вигляд:

$$C_n^{\text{оп}}(\mu_n) > C_1^* - \sum_{\substack{\forall (b,q) \\ (b,q) \neq (r,s)}} C_n^{\text{оп}}(\mu_{bq \min}) \quad (11)$$

при цьому будуть відсіянні всі значення $\mu_n \geq \bar{\mu}_n$, де $\bar{\mu}_n$ це те мінімальне значення μ_n , при якому почне виконуватися (11).

3. Повторюємо цю процедуру для всіх (r, s) , при цьому отримаємо нові верхні границі перемінних $\{\mu_n\}$: $\mu_n^0(1)$. Якщо хоча б для одної множини M_{rs} $\mu_{rs}^{(s)}(1) < \mu_{rs \max}$ (тобто змінилось), переходимо до процедури W_1 . Інакше на шаг I процедури W_2 , при цьому необхідно звужити множину варіантів (μ_n) шляхом введення нового обмеження

$$C_\Sigma((\mu_n)) \leq C_2^* \quad (12)$$

де $C_2^* = \frac{1}{2}(C_{\Sigma \min} + C_1^*)$.

Процедура W_1 .

Проводимо відсів по обмеженню (7). Відсів проходить згідно умови:

$$\frac{\mu_{rs} k_r - \lambda_{rs}}{\mu_{rs} k_r - \lambda_{rs} + v_y \frac{\lambda_{rs}}{\Lambda_\Sigma}} \geq P_{CI}^{\max} / \prod_{\substack{(b,q) \in E \\ (b,q) \neq (r,s)}} \frac{\mu_{bq}^{\max} k_r - \lambda_{bq}}{\mu_{bq}^{\max} k_r - \lambda_{bq} + v_y \frac{\lambda_{bq}}{\Lambda_\Sigma}} \quad (13)$$

По ній відсіюються всі ті значення $\{\mu_n\}$, для яких $\mu_n \leq \bar{\mu}_n$, де $\bar{\mu}_n$ — максимальне значення μ_n , при якому починає виконуватися умова (13).

Відсів згідно (13) проводимо для всіх каналів зв'язку (r,s) . В результаті отримаємо нові множини варіантів $M_{rs}(1) = [\mu_{rs \min}(1), \mu_{rs \max}(1)]$.

Якщо виявиться, що $M_{rs}(1) = \emptyset$, хоча б для одного (r,s) , то перехід до 2-ої ітерації, при цьому розширюємо множину варіантів, для цього прирівнюємо

$$C'_1 = \frac{1}{2}(C_{\Sigma \max} + C'_1)$$

Послідовність ітерацій повторюємо до тих пір, поки не отримаємо настільки невеликі підмножини $M_{rs}(k)$, $\forall (r,s) \in E$, що з них можна буде знайти оптимальні рішення простим перебором, тобто шляхом перевірки по обмеженню та порівнюючи значення цільової функції.

Задача розподілення потоків.

Постановка задачі.

Задана структура мережі $G=(X,E)$, пропускні спроможності всіх каналів $\{\mu_n\}$ та матриця вимог $H = \|h_v\|$. Потрібно розподілити потоки по всім каналам та знайти такий вектор багатопродуктового потоку $\Lambda = [\lambda_n]$, $(r,s) \in E$, сумісний з набором пропускних спроможностей, для якого

$$P_{CQ}(\{\lambda_n\}) = P(T_n \leq t_{\max}) = \prod_{(r,s) \in E} \frac{\mu_n k_r - \lambda_n}{\mu_n k_r - \lambda_n + v_v \frac{\lambda_n}{\Lambda_\Sigma}} \rightarrow \max \quad (14)$$

при умовах

$$\lambda_n \leq \mu_n k_r, \quad (r,s) \in E \quad (15)$$

Запропонований алгоритм використовує доказану в роботі властивість, що функція $P_{CQ}(\{\lambda_n\})$ є увігненою по змінним $\{\lambda_n\}$. Для зручності зроблено перехід від цільової функції вида (14) до еквівалентної задачі мінімізації

$$\min - \ln P_{CQ}(\{\lambda_n\}) = \min \sum_{(r,s) \in E} - \ln \frac{\mu_n k_r - \lambda_n}{\mu_n k_r - \lambda_n + v_v \frac{\lambda_n}{\Lambda_\Sigma}} \quad (16)$$

Очевидно, що функція $-\ln P_{CQ}(\{\lambda_n\})$ буде опуклою по перемінним λ_n . Ця властивість дозволяє застосувати для рішення задачі РП модифікований алгоритм відхилення потоків, який є розвитком відомого алгоритму "ОП" Л.Клейпрока.

Задача ВПС РП

Задані: структура мережі $G=(X,E)$, матриця вимог $H = \|h_v\|$, набір пропускних спроможностей каналів зв'язку $D = \{d_1, d_2, \dots, d_t\}$ та відповідних питомих собівартостей каналів зв'язку $C = \{c_v, c_2, \dots, c_t\}$. Потрібно знайти

таке розподілення потоків $\Lambda^0 = [\lambda_n^0]$ та відповідні пропускі спроможності всіх каналів зв'язку $\{\mu_n^0\}$, при яких

$$C_{\Sigma} = \sum_{(r,s) \in E} C_n^{nop}(\mu_n^0) \rightarrow \min \quad (17)$$

при обмеженні

$$P_{cd} = \prod_{(r,s) \in E} \frac{\mu_n k_r - \lambda_n / n_n}{\mu_n k_r - \lambda_n / n_n + v_y \frac{\lambda_n}{\Lambda_{\Sigma}}} \geq P_{sam}^{cd} \quad (18)$$

та умові, що $\Lambda = [\lambda_n]$ багатопродуктовий потік, сумісний з матрицею $H = \|h_{ij}\|$.

Для вирішення вказаної задачі в дисертації розроблено алгоритм АЗ, який використовує багаторазове рішення комбінації задач ВПС та РП.

2. Знаходження максимального потоку в мережі при відмовах та аналіз показників її живучості.

Важливою задачею, що виникає при проектуванні комунікаційних мереж, є задача аналізу показників її живучості. Таким показником живучості пропонується брати величину максимального зовнішнього потоку, який передається по мережі при відмовах її елементів.

З цією метою в роботі запропоновано оригінальний метод знаходження максимального багатопродуктового потоку в мережі при обмеженні на середній час затримки в доставці інформації.

Сформульована така задача про знаходження максимального потоку в мережі при відмовах. Припустимо, що для мережі з структурою $G=(X,E)$ розв'язана задача ВПС РП і знайдено розподілення потоків та пропускі спроможності всіх каналів зв'язку.

Загальна пропускіна спроможність мережі буде характеризуватися величиною сумарного зовнішнього потоку, що передається через мережу $H_{\Sigma}^2 = \sum_i \sum_j h_{ij}$.

Припустимо, що канали зв'язку мережі ненадійні, та позначимо ймовірність безвідмовної роботи каналу зв'язку (r,s) через $P_n = k_n$.

Будемо вважати ймовірність відмов каналів зв'язку статистично незалежними випадковими величинами.

Припустимо, що відмовив канал (r,s) , ймовірність цієї події $q_n = 1 - P_n$. Потрібно знайти таке розподілення потоків в каналах $F^{(k)} = [f_n^{(k)}]$, а також величини передаваних зовнішніх трафіків $h_{ij}^{(k)}$, при яких забезпечується

передача максимального потоку через мережу за середній час $T_{\text{ср}}$, який задовольняє умові $T_{\text{ср}}(F^{(k)}, H^{(k)}) \leq T_{\text{зад}}$.

Математична модель цієї задачі така: знайти таку матрицю $H^{(k)} = \|h_{ij}^{(k)}\|$ та відповідний вектор ВП-потоку $F^{(k)} = [f_n^{(k)}]$, для яких

$$H_{\Sigma}^{(k)} = \sum_i \sum_j h_{ij}^{(k)} \rightarrow \max \quad (19)$$

$$\text{при умовах } T_{\text{ср}}(H^{(k)}) = \frac{1}{H_{\Sigma}^{(k)}} \sum_{(r,s)} \frac{f_r^{(k)}}{\mu_r - f_r^{(k)}} \leq T_{\text{зад}} \quad (20)$$

$$h_{ij}^{(k)} \leq h_{ij}, \forall (i,j) = \overline{1,n} \quad (21)$$

В роботі проведені дослідження даної задачі та властивостей оптимального потоку. Ці властивості встановлюються в наступних теоремах, доведених в дисертації.

Теорема 1.

Оптимальний потік $F^{(k)} = [f_n^{(k)}]$ - це потік по найкоротшим шляхам в метриці

$$l_{rs} = \left. \frac{\partial T_{\text{ср}}}{\partial f_{rs}} \right|_{f_n = f_n^{(k)}} \quad (22)$$

Теорема 2.

Якщо пакети вимог $h_{ij}^{(k)}$ домінують при передачі в мережі пакети $h_{ij}^{(k)}$ в оптимальному рішенні, то для них виконується співвідношення

$$l(\pi_{ij}^{\text{min}}) < l(\pi_{ij}^{\text{max}}) \quad (23)$$

де $l(\pi_{ij}^{\text{min}}), l(\pi_{ij}^{\text{max}})$ довжина найкоротшого шляху передачі пакетів h_{ij}, h_{ij} відповідно в метриці, визначеній в (22).

Доведення теореми 1.

Нехай умова теореми 1 не виконується для вимоги h_{ij} , тобто вона передається по шляху π'_{ij} , для якого $l(\pi'_{ij}) > l(\pi_{ij}^{\text{min}})$, де $l(\pi_{ij}^{\text{min}})$ - довжина найкоротшого шляху в метриці l_{rs} (22). Змінимо тоді маршрут передачі тільки для цієї вимоги з π'_{ij} на π_{ij}^{min} , не змінюючи інших.

Позначимо через $F_0^* = [f_n^*]$ - старий потік, а через $F_1 = [f_n^{(1)}]$ новий потік при зміні маршруту для вимоги h_{ij} на π_{ij}^{min} . Розглянемо F_1 як деяку варіацію потоку $F^* = [f_n^*]$ та знайдемо приріст критерію обмеження при цьому:

$$\Delta T_{\text{ср}}(F^*) = T_{\text{ср}}(F_1) - T_{\text{ср}}(F^*) = \sum_{(r,s) \in E} \left. \frac{\partial T}{\partial f_{rs}} \right|_{\Delta f_n} \quad (24)$$

Так як елементи потоку на каналах π'_{ij} зменшилися на величину Δh_{ij} , а на каналах π_{ij}^{min} вони збільшилися на величину Δh_{ij} , то

$$\Delta f_{rs} = \begin{cases} +\Delta h_{rs}, \text{ якщо } (r,s) \in \pi_{rs}^{\min} \\ -\Delta h_{rs}, \text{ якщо } (r,s) \in \pi'_{rs} \\ 0, \text{ в інших випадках} \end{cases} \quad (25)$$

Тоді

$$\begin{aligned} \Delta T_{cp}(F^* + \Delta F) &= \sum_{(r,s) \in \pi_{rs}^{\min}} \frac{\partial T}{\partial f_{rs}} \Delta h_{rs} - \sum_{(r,s) \in \pi'_{rs}} \frac{\partial T}{\partial f_{rs}} \Delta h_{rs} = \\ &= \Delta h_{rs} \left[\sum_{(r,s) \in \pi_{rs}^{\min}} \frac{\partial T}{\partial f_{rs}} \Big|_{f_{rs}=f'_{rs}} - \sum_{(r,s) \in \pi'_{rs}} \frac{\partial T}{\partial f_{rs}} \right] = \Delta h_{rs} [l(\pi_{rs}^{\min}) - l(\pi'_{rs})] \end{aligned} \quad (26)$$

Тому

$$\Delta T_{cp}(F^*) = \Delta h_{rs} [l(\pi_{rs}^{\min}) - l(\pi'_{rs})] < 0 \quad (27)$$

Отже, якщо змінити маршрут для вимоги h_{rs} на π_{rs}^{\min} , ми зменшимо величину критерію і тоді

$$T_{cp}(F_1) < T_{cp}(F^*) = T_{opt}$$

Це означає, що при розподіленні потоків з'являється резерв по загальній пропускній спроможності і можна збільшити величину потоку однієї з вимог, наприклад h_{rs} , на деяку величину без порушення обмеження (20). Але це протирічить припущенню, що потік F^* є максимальним. Таким чином теорема 1 доведена. По аналогії доводиться теорема 2.

Доведені властивості максимального потоку дозволили запропонувати алгоритми рішення задачі про максимальний потік для двох випадків:

- 1) коли відомі шляхи передачі всіх типів вимог в мережі без відмов;
- 2) в випадку, коли шляхи передачі невідомі.

Основна ідея алгоритму (для випадку 2) полягає в наступному.

Проранжируємо всі вимоги (i,j) в порядку збільшення умовних довжин:

$$(i_1, j_1) < (i_2, j_2) < \dots < (i_k, j_k) \leftrightarrow l(\pi_{i_1 j_1}^{\min}) \leq l(\pi_{i_2 j_2}^{\min}) \leq \dots \leq l(\pi_{i_k j_k}^{\min}) \quad (28)$$

Опис $(k+1)$ -ої ітерації.

Нехай проведено k ітерацій, в результаті яких побудовано БП-потік в мережі $F(k) = [f_{rs}(k)]$ з величиною $h_{rs}^{(k)} = \sum_{s=1}^k h_{rs}$.

1. Вибірємо найбільш пріоритетну вимогу (i_k, j_k) потік від якої ще не розподілений в мережі.

2. Знаходимо найкоротший шлях передачі інформації $\pi_{i_k j_k}^{\min}$ в метриці

$$l_{rs} = \frac{\partial T_{cp}}{\partial f_{rs}} \Big|_{f_{rs}=f_{rs}^{(k)}}$$

3. Направляємо потік вимоги h_{i_k} по шляху $\pi_{i_k}^{\min}$ і знаходимо складові нового БП-потоків:

$$f_{rs}(k+1) = \begin{cases} f_{rs}(k) + h_{i_k} & \text{якщо } (r,s) \in \pi_{i_k}^{\min} \\ f_{rs}(k) & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

4. Знаходимо $h_{\Sigma}(k+1) = h_{\Sigma}(k) + h_{i_k}^*$.

Перевіряємо умову $T_{\text{ср}}(F(k+1)) \leq T_{\text{ср.зад}}$. Якщо вона виконується, то на (k+2) - у ітерацію, інакше кінець. Потік $F(k+1)$ максимальний.

Даний метод знаходження максимального потоку в мережі використовується для оцінки показника живучості.

Будемо оцінювати живучість показником зменшення загальної пропускної спроможності (або зменшенням максимальної величини потоку) при відмовах елементів по зрівнянню з станом z_0 , в якому всі вузли і канали зв'язку безвідмовні. Позначимо максимальну величину потоку, що передається через мережу в даному стані, через $H_{\Sigma}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}$, а ймовірність такого стану через $P(z_0)$.

Нехай $z^{(k)}$ - деякий стан мережі, в якому відмовив канал (i_k, s_k) , його ймовірність - $P(z^{(k)})$, а максимальна величина потоку через мережу в стані z_k дорівнює $H_{\Sigma}(z_k) = H_{\Sigma}^{(k)}$. Тоді живучість КМ можна охарактеризувати таким показником - розподіленням величини загальної пропускної спроможності (ЗПС) при відмовах, тобто

$$P(H_{\Sigma}) = P(H_{\Sigma} \geq H_{\Sigma 0}) = 1 - P(H_{\Sigma} < H_{\Sigma 0})$$

Використовуючи цей підхід, в роботі сформульована наступна задача аналізу показників живучості мережі.

При заданій структурі мережі $E = \{(r, s)\}$, пропускних спроможностях всіх каналів зв'язку $\{\mu_n\}$ $(r, s) \in E$ та їх надійнісних характеристиках $k_{r,s}$, а також матриці вимог $H = \left\| h_{ij} \right\|_{i,j=1,n}$, знайти оптимальне розподілення потоків в мережі при відмовах КЗ $F^0 = [f_n^0]$ та визначити такі показники живучості мережі:

$$P\{H^{\phi}_{\Sigma} \geq 90\% H^{(0)}_{\Sigma}\}; P\{H^{\phi}_{\Sigma} \geq 80\% H^{(0)}_{\Sigma}\}, \dots, P\{H^{\phi}_{\Sigma} \geq 50\% H^{(0)}_{\Sigma}\}$$

де $H^{(0)}_{\Sigma}$ - величина максимального потоку в мережі в повністю безвідмовному стані; $H_{\Sigma}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}$; а H^{ϕ}_{Σ} - фактична величина потоку при відмовах.

В роботі показано, як обчислити розподілення ймовірностей $P\{H_{\Sigma}^{\Phi} \geq H_{зад}^{\Phi}\} = P\{H_{зад}^{\Phi}\}$.

Очевидно

$$P\{H_{зад}^{\Phi}\} = \sum_{z_j: H(z_j) \geq H_{зад}^{\Phi}} P\{z_j\} - 1 - \sum_{z_j: H(z_j) < H_{зад}^{\Phi}} P\{z_j\} \quad (29)$$

В дисертації розроблена методика оцінки запропонованих показників живучості мережі. Вона складається із таких етапів.

1. Розглядаємо різні відмовні стани мережі: z_1, z_2, \dots, z_k (відмови одного та більше КЗ та вузлів). Вважаючи ймовірності безвідмовного стану окремих каналів статистично незалежними, розраховуємо величини ймовірностей $P\{z_j\}$; $z_j \in Z_1$.

2. Для кожного із станів z_j , використовуючи запропонований алгоритм, знаходимо величину максимального потоку в мережі $H(z_j)$.

3. Розраховуємо величину $P\{H_{зад}^{\Phi}\}$ згідно з формулою (29).

Оптимізація структури КМ при обмеженнях на показники своєчасної доставки і живучості мережі.

Розроблені в роботі алгоритм і методика оцінки показника живучості мережі дозволили сформулювати нову постановку задачі синтезу структури КМ при обмеженнях на показники своєчасності доставки та живучості мережі. Вона формулюється так: задані вузли зв'язку мережі $X = \{x_j\}_{j=1..n}$, місця їх розміщення $\{d_j, w_j\}$; матриця вимог в інформаційному обміні між всіма вузлами $H = \| |h_{ij}| |_{i,j=1..n}$, набір ПС каналів зв'язку $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ та їх питомих собіварностей $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$; надійності характеристики каналів зв'язку та вузлів.

Потрібно: визначити структуру мережі $E^0 = \{(r, s)\}$, та знайти ПС всіх КЗ $\{d_{rs}^0\}$, та розподілення потоків в КЗ $\{f_{rs}^0\}$, відповідне матриці вимог таким чином, щоб забезпечити

$$\min C_{\Sigma}(\{d_{rs}^0\}) = \min_{(r,s) \in E^0} \sum C_{rs}^{неп}(\{d_{rs}^0, f_{rs}^0\}) \quad (30)$$

при обмеженнях на ймовірність своєчасної доставки

$$P\{C_{Д} = P\{T_{ср} \leq t_{зад}\} \geq P_{зад}\} \quad (31)$$

та обмеженнях на живучість мережі при відмовах:

$$P\{H_{\Sigma}^{\Phi} = 100\% N_{зад}\} \geq P_{0зад}$$

$$P\{H_{\Sigma}^{\Phi} \geq 90\% N_{зад}\} \geq P_{1зад}$$

$$P\{H_{\Sigma}^{\Phi} \geq 80\% N_{зад}\} \geq P_{2зад}$$

$$P\{H_{\Sigma}^{\Phi} \geq 70\% N_{зад}\} \geq P_{3зад}$$

$$P\{H_{\Sigma}^{\Phi} \geq 50\% N_{зад}\} \geq P_{4зад}$$

при обмеженні на середній час доставки $T_{\text{ср}} \leq t_{\text{зад}}$.

Крім того, коефіцієнт зв'язності структури мережі $k_{\text{св}}$ повинен задовольняти умові $k_{\text{св}} \geq k_{\text{зад}}$ ($k_{\text{зад}} = 2$).

Для рішення задачі пропонується декомпозиційний підхід, що розбиває початкову задачу на ряд взаємозв'язаних етапів:

1. Синтез найкоротшого зв'язуючого дерева (НЗД) Д0 з корнем в вузлі Х0.
2. Синтез початкової багатозв'язної структури Е0 та її оптимізація по критерію мінімуму C_{Σ} при обмеженні (31).
3. Оптимізація структури КМ по критерію мінімуму C_{Σ} при обмеженнях на показники живучості мережі.

На першому етапі для синтезу НЗД використовується модифікований алгоритм Ісау-Віл'ямса. На другому етапі робимо перетворення початкової структури Д0 в початкову багатозв'язну структуру Е0, що задовольняє заданій умові зв'язності. Потім робимо оптимізацію цієї структури шляхом видалення неекономічних каналів зв'язку та введення нових (варіант метода заміни гілок). При цьому використовується алгоритм розв'язання задачі ВПС та РП по обмеженню (31).

На третьому етапі здійснюємо оптимізацію структури E_k , що отримана в результаті етапу 2 при обмеженні на показники живучості. Розглянемо алгоритм етапу 3.

Спочатку, використовуючи вказану методику, обчислюємо показники живучості мережі. В результаті отримаємо початковий показник живучості мережі як величини ЗПС при відмовах

$$P(H_{\Sigma}^{\text{д}} \geq \alpha_k H_{\Sigma \text{зад}}) = P_k(0) \quad \text{де} \quad k=1,2,3,4,5;$$

$\alpha_0=100\%$; $\alpha_1=90\%$; $\alpha_2=80\%$; $\alpha_3=70\%$; $\alpha_4=60\%$; $\alpha_5=50\%$;

Необхідно відмітити, що з виразу (29) випливає, що підвищення надійності довільного КЗ автоматично підвищує показники живучості мережі.

Очевидно, необхідно знайти такі КЗ, збільшення надійності яких найбільш ефективно.

Розіб'ємо множину відмовних станів мережі $Z = \{z_j\}$ на підмножини Z_k $k=1..5$, такі, що $z_j \in Z_k$, якщо $H(z_j) < \alpha_k H_{\Sigma}^0$, де $k=1..5$.

При цьому $Z_1 \supset Z_2 \supset Z_3 \supset Z_4 \supset Z_5$.

Очевидно, зменшення ймовірностей станів $P(z_j)$ $z_j \in Z_k$, тобто підвищення надійності відповідних КЗ, підвищить також і живучість мережі в цілому.

Нехай z_j - стан, коли відмовив КЗ (r_i, s_i) .

Підвищення надійності КЗ (r, s) будемо забезпечувати шляхом введення резервних каналів.

За показник ефективності резервного каналу для КЗ (r_i, s_i) виберемо величину $\alpha_{\text{risi}} = -\Delta P(z_j) / \Delta C(r_j, s_j)$ (32)

де $\Delta P(z_j) = \Delta P(r_j, s_j)$ - зменшення ймовірності стану z_j при введенні резервного каналу в ЛЗ (r_j, s_j) ;

$\Delta C(r_j, s_j) = C_{r_j, s_j}(d_{r_j, s_j})$ вартість введення такого резерву.

При цьому, в роботі показано, що:

$$\alpha_{r_{isi}} = k_{r_{tj}, s_{tj}} P(z_j) / C_{r_{tj}, s_{tj}}(d_{r_{tj}, s_{tj}}) \quad (33)$$

Ш1. Розглядаємо відмовні стани з підмножини Z_5 та обчислимо показник $\alpha_{r_{isi}} = k_{r_{tj}, s_{tj}} P(z_j) / C_{r_{tj}, s_{tj}}(d_{r_{tj}, s_{tj}} | r_{j, s_j})$ $(r_j, s_j) \in Z_5$

Ш2. Вибираємо такні КЗ $(r^*, s^*) \in Z_5$, для якого $\alpha_{r^* s^*} = \max_{(r_k, s_k) \in Z_5} \alpha_{r_k s_k}$

Ш3. Вводимо резервний канал в КЗ (r^*, s^*) , перераховуємо потоки та показники живучості P_k . При цьому збільшення значення показника живучості ΔP_k буде визначатися зменшенням ймовірності стану z^* .

Ш4. Перевіряємо умови: $P_k(1) > P_{k\text{зад}}$ $k=1, \dots, 5$.

Якщо так, то кінець, інакше перехід до наступної ітерації. Всі наступні ітерації проводяться аналогічно, при цьому в першу чергу розглядаються ті відмовні стани $z_j \in Z_k$, які не розглядалися на попередніх ітераціях.

На основі запропонованих в роботі алгоритмів, моделей та методів було розроблено пакет програм "Аналіз та синтез розподілених мереж" на мові C++ . Пакет програм дозволяє вирішувати комплекс задач аналізу ймовірнісно-часових та надійносних характеристик та оптимізації структури мереж . Пакет було застосовано при вирішенні задач аналізу ймовірнісно-часових характеристик та показників живучості базової комунікаційної мережі для національного банку комп'ютерної інформації (НБКІ) в відповідності з проектом 6.01.02/009-93 шифр "Банк". Крім того, він був успішно застосований для аналізу та оптимізації топології національної інформаційної комп'ютерної мережі (НІКМ) в відповідності з програмою ГНТ 6.09.01 - телекомунікаційні комп'ютерні мережі . В результаті застосування пакету була синтезована фізична структура телекомунікаційної мережі для НІКМ та визначені її показники ймовірнісно-часові, вартості та живучості.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ .

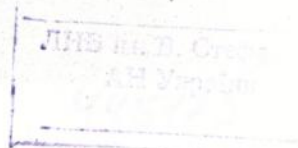
1. Запропоновано модель аналізу ймовірності своєчасної доставки в КМ та досліджено її властивості, що дало змогу по новому сформулювати задачу аналізу комп'ютерних мереж.
2. Розглянуті задачі аналізу ймовірнісно-часових характеристик розподілених мереж та розроблені алгоритми рішення задач ВПС, РП та ВПС РП при обмеженні на ймовірність своєчасної доставки.
3. Сформульована задача знаходження максимального потоку в мережі при обмеженні на час доставки, досліджені властивості оптимального

рішення та запропоновано алгоритм знаходження максимального потоку в розподіленій мережі при відмовах її елементів, який відрізняється від відомих тим, що розглядається багатопродуктовий потік та введено обмеження на своєчасність доставки.

4. Запропоновано новий показник живучості КМ та розроблено методику його оцінки .
5. Сформульована задача синтезу структури КМ при обмеженнях на показники своєчасної доставки повідомлень та живучості та розроблено алгоритм синтезу структури мережі .
6. На основі запропонованих в роботі моделей , методів та алгоритмів створено пакет програм " Аналіз та синтез розподілених мереж " на мові C++ . Даний пакет програм дозволяє розв'язувати комплекс задач аналізу характеристик та оптимізації структури комп'ютерних мереж по різним критеріям та обмеженням.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах :

1. Зайченко Ю.П., Зайченко Е.Ю. Синтез структуры РВС при ограничениях на показатели своевременной доставки сообщений и живучести сети, ж. Проблемы информатики и управления, 1995, №5.
- сформульовано задачу та алгоритм синтезу структури КМ при обмеженнях на показники живучості та своєчасності доставки.
2. Е.Ю. Зайченко. Оптимизация структуры РВС при ограничениях на показатели своевременности доставки сообщений и живучести сети. Материалы докладов конференции "Информационные сети и системы", Г.Суздаль, октябрь, 1995, с.30-33.
3. Е.Ю. Зайченко. Анализ показателей своевременности доставки и живучести распределённых вычислительных сетей. Тезисы докладов международной конференции "Проблемы алгебры и кибернетики", г.Гомель, 1995, с.42-44.
4. Печурин Н.К. , Зайченко Е.Ю. Моделирование и анализ алгоритмов динамической маршрутизации в сетях с коммутацией пакетов . Тезисы докладов международной конференции "Проблемы алгебры и кибернетики " ,г.Гомель ,1995 г.
- запропоновано алгоритми динамічної маршрутизації в комунікаційних мережах (КМ) з комутацією пакетів та описана імітаційна модель.
5. Ю.П. Зайченко , Е.Ю. Зайченко. Модели и алгоритмы анализа функционирования распределённых информационно-вычислительных сетей . Тез. докладов 1-й украинской конференции по авт. упр. " Автоматика-94 " , Киев,1994,с.233.
- розглянуті задачі аналізу ймовірнісно-часових характеристик РКМ.
6. Е.Ю. Зайченко, Ю.П. Зайченко. Модель и метод анализа живучести коммуникационной сети. Материалы докладов конференции Информационные сети и системы .г.Суздаль, октябрь,1995 г., с.11-13.



- сформульовано задачу знаходження максимального потоку при відмовах, та запропоновані алгоритми її розв'язання.
- 7. Ю.П. Зайченко, Е.Ю. Зайченко. Оптимізація структури розподілених вычислительных сетей. Тезиси докладов Международной конференции "Проблемы алгебры и кибернетики", г.Гомель, 1995, с.40-41.
- запропоновано метод оптимізації структури розподілених мереж.
- 8. E.Zaychenko, J.Zaychenko. Analysis and optimization models of stochastic characteristics of Distributed Data Networks - Proc. Intern. Conference on Information Networks and Systems. JCINAS-94 St. Petersburg 24-28 Oct. 1994, pp 67-72.
- сформульовані задачі аналізу ІЧХ РКМ та запропоновані алгоритми їх розв'язання.

Зайченко Елена Юрьевна.

Модели и методы анализа и синтеза структуры коммуникационных систем распределённых компьютерных сетей.

Работа является рукописью на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.08 - вычислительные машины, системы и сети, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления. Киев, 1996, Национальный технический университет Украины "КПИ"

Целью диссертационной работы является разработка методов и программных средств анализа вероятностно-временных характеристик и синтеза структуры распределённых компьютерных сетей по показателям своевременности доставки и живучести.

Zaichenko Helen J.

Models and methods of analysis and structural synthesis of communication systems of distributed computer networks.

This scientific work is a manuscript of a dissertation submitted for obtaining the scientific degree of candidate of science in speciality 05.13.08 - computers, systems and networks, elements and units of computer technique and control systems. Kiev, 1996, National Technical University of Ukraine "KPI".

The goals of the thesis are to develop new models, methods and tools for analysis and structure optimization of distributed computer networks under constraints of time-delays and surviveability.

Ключові слова: розподілена комп'ютерна мережа, своєчасність доставки, живучість, аналіз та синтез структури, комунікаційна система.

Зай

Підп. до друку 29.02.96 Формат 60×84^{1/8}. Папір
друк. № 2 Друк офсетний. Умовн. друк. арк. 293.
Умовн. фарбо-відб. 1,04. Облік-вид. арк. 10
Тираж 100 Зам. № 6-797.

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

445125

AB 34.246