

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

О.В. Суботін

АНАЛІЗ, СИНТЕЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Методичний посібник до самостійної роботи
студентів денної і заочної форм навчання
спеціальності 7.092501

Затверджено
на засіданні методичної
ради ДДМА
Протокол № 9 від 27.05.2005 р.

Краматорськ 2005

ББК 32.973
УДК 681.3:002.6
С 89

Рецензенти:

Л.В. Пивоваров, доктор технічних наук, професор Слов'янського державного педагогічного університету, м. Слов'янськ

В.І. Кравченко, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Комп'ютерні інформаційні технології» Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ

Суботін О.В.

С 89. Аналіз, синтез і оптимізація інформаційних мереж: Методичний посібник до самостійної роботи студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 7.092501. - Краматорськ: ДДМА, 2005 – 80 с.

ISBN 966-7851-84-2

Розглянуто питання, які стосуються аналізу, синтезу, моделювання й оптимізації інформаційних (обчислювальних) мереж. Подано методику рішення завдання оптимального розміщення обчислювальних центрів і абонентських пунктів у регіональній інформаційній мережі. Приділено увагу вибору технічних засобів і оптимізації інформаційних потоків у мережах. Подані принципи моделювання й оптимізації інформаційних мереж і оцінка їхньої ефективності.

Посібник може бути використаний при вивченні дисциплін «Методи оптимального проектування систем управління» і «Обчислювальні мережі й системи управління».

ISBN 966-7851-84-2

ББК 32.973
© О.В. Суботін, 2005
© ДДМА, 2005

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ПРИНЦИПИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ	5
1.1 Завдання й методи розробки інформаційних мереж	5
1.2 Детермінований та імовірнісний підходи у завданнях аналізу, синтезу й оптимізації ІМ	5
2 ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ	7
2.1 Визначення вартісно-економічних характеристик ІМ	7
2.2 Вибір технічних засобів інформаційної мережі	7
2.3 Завдання оптимального розміщення обчислювальних центрів (ОЦ) і абонентських пунктів (АП) у регіональній ІМ	9
2.4 Методика рішення завдання розміщення	11
3 ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У МЕРЕЖІ	16
3.1 Аналіз характеристик інформаційних потоків	16
3.2 Визначення затримок передачі інформації	17
4 ОЦІНКА ІМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІМ	21
4.1 Методика розрахунків характеристик функціонування мережі	21
4.2 Основні характеристики функціонування мережі	25
5 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ІМ	27
5.1 Загальні положення	27
5.2 Моделювання у теорії ІМ	28
5.2.1 Імітаційне моделювання	29
5.2.2 Методика імітаційного моделювання ІМ	30
5.2.3 Програмні засоби імітації	32
5.2.4 Планування імітаційних експериментів	33
5.2.5 Оброблення даних імітації	35
5.3 Оцінка адекватності імітаційних моделей	40
5.4 Метод групового обліку аргументів	44
6 МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ	46
6.1 Цільові функції оптимізації	46
6.2 Типові завдання оптимізації	48
6.3 Критерії й обмеження у завданнях оптимізації ІМ	50
6.4 Основні завдання оптимізації ІМ	53
6.5 Методи оптимізації	56
6.5.1 Неаналітичні методи оптимізації	56
6.5.2 Евристичні методи оптимізації	58
7 МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМ	64
ВИСНОВОК	68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	69
ДОДАТКИ	70
ДОДАТОК А. Завдання для самостійної роботи	70
ДОДАТОК Б. Приклад рішення оптимізаційного завдання	72

ВСТУП

Створення інформаційних мереж, їхнє розроблення й дослідження пов'язані з необхідністю рішення широкого кола завдань аналізу й синтезу. Їхній основний зміст визначається методологією проектування мережної архітектури і її елементів.

У ході процесу проектування формується топологічна структура мережі, що задовольняє поставленим вимогам до її характеристик, вибираються технічні засоби, розробляється програмне забезпечення. Вибір ЕОМ і терміналів, які будуть використані у мережі, виконують із обліком того, що вони мають бути однотипними або можуть бути різних типів. При цьому з'ясовують, як буде здійснюватися оброблення інформації (чи буде діяти один головний обчислювальний центр і концентратори або буде здійснюватися розподілене оброблення інформації). Визначається також, які будуть обрані керуючі пристрої й протоколи управління процесами. Виробляється вибір каналів передачі даних і лінії зв'язку, які будуть застосовані в ІМ. Установлюються середні значення (або максимальні) розподілу припустимих тимчасових затримок. Вибираються значення пропускної здатності каналів зв'язку, задаються їхнім розподілом за структурою мережі. При цьому робиться обґрунтування, як треба використати лінії, які найкращі швидкості передачі й розміщення ліній. Забезпечують задані вимоги надійності мережі шляхом дворазового з'єднання й резервування каналів і встаткування мережних вузлів, коли недостатньо однократного.

При проектуванні мережі, як правило, необхідно також визначити найкращі формати повідомлень і маршрути руху, режими й методи передавання даних.

1 ПРИНЦИПИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

1.1 Методика проектування ІМ

У вступі подані основні завдання розроблення інформаційних мереж, визначимо тепер методику їхнього проектування.

Загальний порядок проектування ІМ і його методика передбачають таку послідовність етапів розроблення:

- визначення вихідних даних на підставі передпроектних обстежень, узгодження цих даних на експертних комісіях;
- формування структур вхідних і вихідних повідомлень відповідно до змісту запитів і завдань обробки інформації;
- вибір форматів і визначення обсягів вступників, переданих і вихідних з мережі повідомлень;
- вибір способів комутації;
- установлення необхідних пропускних здатностей каналів зв'язку, швидкості передачі інформації й вибір ліній зв'язку;
- проектування й обґрунтування топологічної структури;
- вибір ЕОМ, терміналів, абонентських пунктів і інших технічних засобів;
- призначення процедур управління передачею й потоками повідомлень;
- визначення вимог до математичного забезпечення й розроблення програмних засобів;
- визначення вимог до обслуговування й ремонту встаткування; економічні розрахунки й обґрунтування.

1.2 Детермінований та імовірнісний підходи у завданнях аналізу, синтезу й оптимізації ІМ

Розрізняють детерміновані й імовірнісні завдання аналізу, синтезу й оптимізації ІМ, їхніх елементів, моделей і структур. Прикладом детермінованих завдань розроблення є завдання аналізу й синтезу, пов'язані з дослідженнями топологічних моделей ІМ. Ці завдання простіше за змістом, чим імовірнісні, причому застосовувані у них структури й моделі ІМ досить широко поширені на практиці. До імовірнісного завдання розроблення мереж, що вимагають застосування апарата імовірнісних методів і теорій, ставиться більша частина за-

вдань, оскільки у загальному випадку процеси функціонування ІМ є типовими випадковими процесами, потоками повідомлень, відмовами апаратур і т.д.

Імовірнісні моделі мереж та імовірнісні методи аналізу й синтезу застосовують у тих випадках, коли подання ІМ у вигляді детермінованих систем може призвести до принципових помилок, як, наприклад, для мереж з адаптивною структурою, що змінюється під дією різних випадкових факторів, мереж з адаптивними алгоритмами управління процесами, маршрутизацією, резервуванням, відновленням та ін. Розглянемо зміст деяких завдань аналізу й синтезу інформаційних мереж, розв'язуваних із застосуванням детермінованих методів. Залежно від виду ІМ, її цільового призначення зміст завдань буде трохи різним, але загальний підхід припускає поділ усіх їх на завдання аналізу (декомпозиції) і синтезу (композиції).

Процес розробки ІМ принципово не може бути зведений тільки до аналізу або тільки до синтезу, а сам вид завдань не може розглядатися ізольовано один від іншого. Це пояснюється тим, що розробка ІМ являє собою типовий ітераційний процес, коли спочатку створюється деякий синтезований варіант ІМ (її структури або організації), а вже надалі він аналізується з метою обґрунтування або оптимізації й у залежності від результатів приймається або відхиляється.

Сучасні методи проектування при реалізації ітераційних процедур передбачають інтерактивний режим взаємодії користувача – проектувальника автоматизованою системою, що виконує розрахунки й обчислення. При цьому головним завданням проектувальника є чітка й правильна постановка завдання для ЕОМ, що ґрунтується на деяких вихідних концептуальних поданнях. Відповідно до цих подань *здаються вихідною топологією*, що задовольняє вимогам, які ставляться до проектованої мережі.

Одним з можливих детермінованих завдань може бути визначення вартісно-економічних характеристик ІМ, що задовольняють заданим характеристикам топологічної структури.

Теоретичних співвідношень загального виду, застосовуваних для рішення завдання даного типу, у цей час не існує. Однак відомі окремі підходи й методики, що дозволяють застосувати математичний апарат для розрахунків синтезованих мереж, вибору їхніх прийнятних варіантів і при необхідності для постановки оптимізаційних завдань проектування.

2 ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

2.1 Визначення вартісно-економічних характеристик ІМ

Одна з методик ґрунтується на встановленні взаємозв'язку між топологією й економічними характеристиками проєктованих мереж. Із цією метою уся безліч можливих варіантів топологічних структур ІМ розбивається на так звані вартісні класи, як показано на рис. 1.

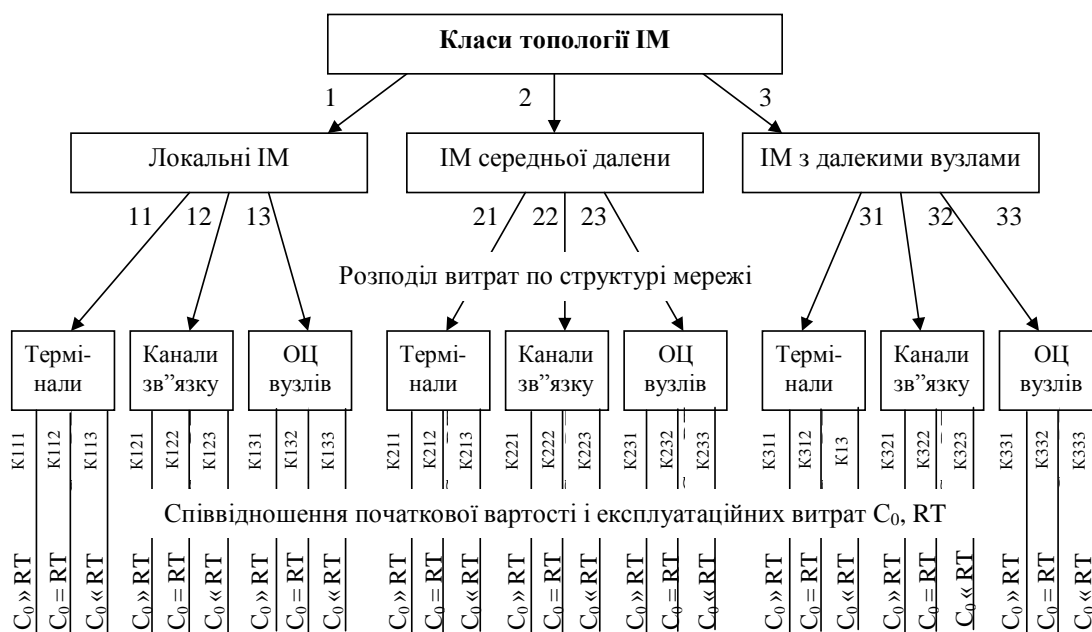


Рисунок 1 - Вартісні класи ІМ

Принципи даної класифікації полягають у наступному. Серед безлічі мережних топологічних структур виділяються три основних типи: локальні (з мінімальною довжиною каналів зв'язку), регіональні (із середньою довжиною каналів) і глобальні (з вилученими каналами). Для кожного із зазначених типів задається розподіл функції вартості W_{ij}^k за елементами фізичної структури, тобто вказується частковий розподіл вартості у відсотках або відносних одиницях і коефіцієнтах, що припадає на абонентські системи, термінальне устаткування мережі, апаратури передачі даних й устаткування мережних вузлів.

2.2 Вибір технічних засобів інформаційної мережі

Розглянемо приклад, що ілюструє застосування зазначеної вище методики для вибору технічних засобів інформаційної мережі.

Спочатку на підставі попереднього аналізу заданої вихідної топологічної структури вибирається один з можливих варіантів — так званий вартісний клас мережі, відповідно до особливостей якого складаються співвідношення. Наприклад, якщо задано комунікаційну мережу з каналами середньої далькості й рівномірним розподілом витрат, то цьому випадку відповідає клас із індексами W_{222} (див. рис. 1).

Загальне вираження для повних витрат, включаючи витрати на створення мережі, експлуатаційні витрати для будь-який ІМ даного класу W_{Σ} має вигляд:

$$W_{\Sigma}(T) = n_T(C_T + R_T T) + n_K(C_K + R_K T) + n_V(C_V + R_V T), \quad (1)$$

де $W_{\Sigma}(T)$ — сумарні повні витрати на створення мережі й обслуговування її функціонування протягом часу T ; n_T, n_K, n_V — кількість у мережі терміналів, каналів і вузлів відповідно; C_T, C_K, C_V — початкова вартість одного терміналу, каналу й вузла відповідно; R_T, R_K, R_V — витрати коштів в одиницю часу на експлуатацію терміналу, каналу й вузла відповідно; T — термін дії мережі з початку функціонування.

Вираз (1) є основою для перевірочних розрахунків під час синтезу мережної архітектури. Зокрема, для мережі з рівномірно розподіленим вартісним класом W_{222} з нього випливає ряд наступних співвідношень:

$$n_T(C_T + R_T T) \approx n_K(C_K + R_K T) \approx n_V(C_V + R_V T), \quad (2)$$

яке означає, що витрати на кожну безліч елементів мережі (термінали, канали й вузли) розподіляються практично нарівно;

$$C_T = R_T T; C_K = R_K T; C_V = R_V T, \quad (3)$$

яке означає, що експлуатаційні витрати W_{Σ} за час T досягають значення початкової вартості;

$$W_{\Sigma}(T) \approx 6n_T C_T \approx 6n_K C_K \approx 6n_V C_V, \quad (4)$$

вираження сумарних витрат, що отримано із виразів (1), (2) і (3).

Далі процес проектування здійснюється за схемою: вибір вихідного варіанта топологічної структури ІМ і наступний перевірочний розрахунок із застосуванням відповідних співвідношень типу (1). Наприклад, для розглянутого випадку задана загальна сума коштів, виділених на створення мережі і її обслуговування. Вибирають тип терміналу, вартість якого відома. Перевіряють, чи перевищує при відомій загальній кількості терміналів n_T у мережі даного

типу загальна їхня вартість із урахуванням коефіцієнта, обумовленого індексом класу мережі, сумарну вартість зазначених засобів.

У цьому випадку

$$bn_T C_T \leq W_\Sigma (T).$$

Якщо остання логічна умова виконується, то можна зупинитися на зробленому виборі; якщо ні, то рішення має бути переглянуте, тобто мають бути змінені або вартість терміналу, або їхня кількість.

Аналогічно здійснюється й перевіряється вибір каналів зв'язку й устаткування мережних вузлів.

2.3 Завдання оптимального розміщення обчислювальних центрів (ОЦ) і абонентських пунктів (АП) у регіональній ІМ

Через те, що проектування мереж ставиться до числа завдань виняткової складності, стає зрозумілим факт відсутності єдиної конструктивної методики розрахунку всіх параметрів, що визначають характеристики мережі. У більшості випадків доводиться застосовувати приватні методики й підходи, серед яких знаходять застосування два основних класи, що розглядають обчислювально-потужносні та комунікаційні аспекти.

Перший клас методик дозволяє вирішувати завдання вибору й розрахунку технічних засобів, на основі визначення вимог до систем обробки даних, завдань інформаційного обслуговування й т.д.

Другий клас методик орієнтований на рішення завдань, пов'язаних з розробкою топології елементів системи обміну даними, диспетчеризації й управління інформаційними потоками в ІМ, завдань визначення характеристик системи зв'язку.

Далі розглядаються два спрощених варіанти рішення завдань синтезу топології, що визначає розміщення ЕОМ і АП по території мережі й описується методика оцінки характеристик ІМ [1].

Постановку завдання розміщення можна сформулювати у такий спосіб: потрібно визначити кількість і місця розташування ЕОМ і АП при заданій кількості споживачів інформації для об'єктів управління у великому регіоні із заданим обсягом інформаційно-обчислювальних робіт. Прийmemo наступні допущення: різні зони ОЦ не мають загальних абонентів; характеристики потоків

інформації у мережі незмінна; стохастична природа потоків запитів не міняється; усі ОЦ з'єднані за принципом «кожний з кожним».

За критерій оптимізації візьмемо наведені витрати на створення й функціонування мережі W . Значення W залежить від обсягу оброблюваних запитів або обсягу інформаційно-обчислювальних робіт, виконуваних кожним ОЦ для групи m_j абонентів, що належать до зони i -го ОЦ. Якщо визначити приналежність запитів до зони дії ОЦ у такий спосіб:

$$q_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{при } m_j \in A_j, \\ 0 & \text{при } m_j \notin A_j \end{cases}, \quad (5)$$

(A_j - підмножина абонентів, що належать зоні i -го ОЦ), то обсяг запитів, що надходять до ОЦ із зони його дії, складе

$$Q_i = \sum_j m_j q_{ji}. \quad (6)$$

Відстань між i -м і k -м ОЦ позначимо R_{ik} , через Q_{ik} — середнє значення обсягу інформації, що циркулює між ОЦ із номерами i й k , а через W_{ik} — питомі витрати на передавання обсягу інформації на одиницю довжини каналу зв'язку між цими ОЦ. Розглянуте завдання ставиться до числа оптимізаційних завдань із детермінованими змінними - необхідно мінімізувати витрати.

$$W = \sum_i W_i + \sum_{jk} W_{jk} Q_{jk} R_{jk} \quad (7)$$

при наступних обмеженнях:

$$\sum_i q_{ji} \geq 1, \quad Q_i = \sum_j m_j q_{ji}, \quad (8)$$

$$m_j q_{ji} \leq d_{ji} C,$$

де W_i — наведені витрати на створення й експлуатацію i -го ОЦ; d_{ji} - кількість каналів зв'язку між абонентами m_j й i -м ОЦ; C — пропускна здатність каналу зв'язку.

Для спрощення розглянутої методики (що цілком прийнятно, оскільки вона застосовується на початковому етапі проектування), доцільно ввести ряд додаткових допущень, які дозволяють одержати рішення в аналітичному виді, зокрема із цією метою додатково вводяться наступні допущення: користувачі розміщені по території регіону з рівною щільністю; запити користувачів однорідні, а їхній потік має постійну інтенсивність у часі; перетворення, збір і про-

міжне зберігання інформації здійснюються в ОЦ і АП; споживачі з АП і ОЦ зв'язані радіально.

Загальна схема розміщення ОЦ у мережі подана на рис. 2, де окружностями позначені зони дії кожного ОЦ.

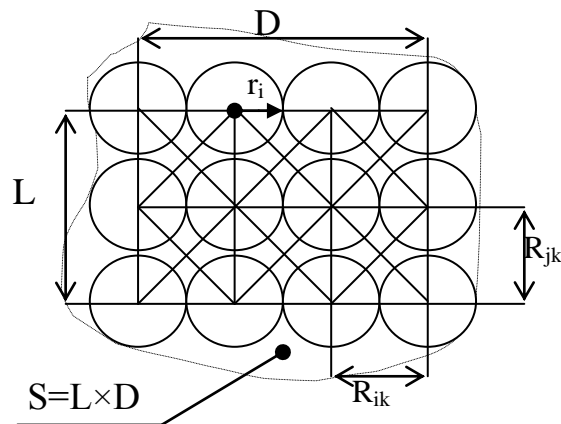


Рисунок 2 - Схема розміщення вузлів при синтезі оптимальної топологічної структури ІС

Відзначимо, що дане завдання виникає при створенні на базі регіональної ІМ територіально розподіленої автоматизованої системи управління для республіки або краю, області. У вузлах такої ІМ розміщують ОЦ колективного користування, між якими організується зв'язок з метою обміну різними файлами (довідкової, даної статистичної обробки й т.п.). Зв'язок організується, як правило, на основі використання каналів Єдиної автоматизованої мережі зв'язку (ЄАМЗ) і засобів загальнодержавної системи передачі даних, але можуть бути випадки, коли специфіка розв'язуваних у мережі завдань вимагає створення спеціальної автономної первинної мережі зв'язку. Незалежно від того, як саме організований зв'язок ОЦ, будемо думати, що витрати на створення мережі зв'язку, якщо її ні, або на експлуатацію орендованих каналів ЄАМЗ перебувають у лінійній залежності від відстані між вузловими ОЦ і від відстані між ОЦ і абонентськими пунктами АП. Це ще одне допущення, необхідне для формалізованої постановки завдання розміщення.

2.4 Методика рішення завдання розміщення

Уважаються заданими: площа регіону S , кількість абонентів у мережі N , капітальні витрати на установку одного ОЦ і АП W_1 і W_2 відповідно; вартість 1 км магістрального каналу зв'язку між ОЦ W_3 і вартість 1 км каналу зв'язку

між АП і ОЦ W_4 . Потрібно визначити координати установки ОЦ і АП, їхня кількість у регіоні, а також конфігурацію системи обміну даними, щоб забезпечити мінімум витрат і можливість обробки обсягів інформації.

З очевидних геометричних міркувань треба, щоб капітальні витрати на магістральні канали зв'язку між ОЦ можна було б визначити з наступного вираження

$$W_{ВЦ}^{kan} = W_3 \left[\sum_i (R_{jk} + R_j) + \sum_{jk} \sqrt{R_{j1}^2 + R_{j2}^2} \right], \quad (9)$$

де i — індекс розглянутого ОЦ; j — індекси ОЦ, що перебуває праворуч й k — який знаходиться нижче (див. рис. 2); R_{j1}, R_{j2} - проекція прямої, що зв'язує i -й ОЦ із ОЦ, що перебувають нижче за діагоналлю, на вертикальну й горизонтальну осі координат, жорстко пов'язаних з контурами регіону.

Величина $\sum_i (R_{jk} + R_j)$ не залежить від значень R_{jk} і R_j . У той же час відповідно до нерівності Коші друга сума у квадратних дужках формули (9) мінімізується при $R_{j1} = R_{j2} = R$ для будь-яких i .

Ґрунтуючись на аналогічних міркуваннях, можна дійти висновку, що мінімізація сумарної довжини каналів зв'язку між ОЦ і АП також досягається при рівномірному розміщенні АП у зоні обслуговування ОЦ.

Виходячи з викладеного, визначають капітальні вкладення на створення усіх ОЦ ($W_{ВЦ}$) до АП ($W_{АП}$), що обслуговуються у регіоні. Опускаючи проміжні алгебраїчні перетворення у формулах, отриманих з геометричних побудов, наведемо основне співвідношення для постановки завдання мінімізації витрат на проектувану мережу:

$$W = W_2 \frac{S}{R^2} + \frac{S}{r^2} (W_2 + 0,35W_3R) + W_4 \left[2,82 \frac{S}{R} + 0,82R - 1,82(D + L) \right] + 0,35W_4Nr, \quad (10)$$

де D і L - розміри зони, заданої у вигляді прямокутника (див. рис. 2).

Для конкретних структур мережі ЕОМ значення S , D , L і N можуть бути обрані з деякої безлічі варіантів. Зокрема, з урахуванням рекомендацій про рівномірний розподіл ОЦ і АП у регіоні значення R й r для будь-якого варіанта можуть бути обчислені у такий спосіб:

$$r_{cp} = \frac{1}{2\sqrt{2}} R, \quad (11)$$

$$W_1 = W_3 \frac{3}{r^2} \frac{R}{2\sqrt{2}}, \quad (12)$$

$$W_2 = W_4 \frac{NR}{2\sqrt{2}}. \quad (13)$$

Знайдемо частки похідні від повних витрат W за змінним R та r з метою визначення екстремальних значень цих величин для функції W і дорівнюємо їх до нуля:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial R} = -2W_1 \frac{S}{R^3} + 0,35W_3 \frac{S}{r^2} + W_3(0,82 - 2,82 \frac{S}{R^2}) = 0, \\ \frac{\partial W}{\partial r} = -3W_1 \frac{S}{r^3} (W_2 + 0,35W_3 R) + 0,35W_4 N = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Розв'язавши спільно ці два рівняння як систему шляхом підстановки, одержимо шукане співвідношення, що є рівнянням 11-й ступеня відносно R :

$$a_{11}R^{11} + a_{12}R^{12} + \dots + a_2R^2 + a_1R^1 + a_0 = 0. \quad (15)$$

Вираження для коефіцієнтів $a_0 - a_{10}$ у загальному виді надзвичайно громіздкі, тому розглянемо приклад розрахунку з наступними даними: $S = 100$ км²; $N = 10^4$; $W_1 = 500$ тис. грн.; $W_2 = 10$ тис. грн.; $W_3 = 20$ тис. грн. /км; $W_4 = 10$ тис. грн. /км.

Знайшовши корінь алгебраїчного рівняння для даних значень коефіцієнтів, знайдемо безліч значень кореня $R_{01} - R_0$. Із цієї безлічі, природно, виключаються елементи, що визначають уявні й негативні значення, інші перевіряються на відповідність фізичному змісту завдання. Вибравши одне найбільш відповідне значення $R_0 = 2,49$ км, знаходимо далі відповідному цьому значенню величини, що визначають оптимальний розподіл витрат для синтезованої мережі:

1) середня відстань між АП і ОЦ: $r_{cp} = \frac{1}{2\sqrt{2}} R_0 = 0,875$ км;

2) оптимальне число вузлів (ОЦ у цьому випадку) у мережі:

$$S \approx L \times D \approx 2r_{cp}n_L 2r_{cp}n_D \approx 4r_{cp}^2 n_L n_D \approx r_{cp}^2 n_{y_0}, \quad n_{y_0} \approx S/4r_{cp}^2;$$

3) середнє число АП, що приєднують у кожному вузлі,

$$n_{АП} = \frac{N}{m_i n_y} = \frac{4Nr_{cp}^2}{m_i S},$$

де m_i — середнє число абонентів в одному вузлі.

Для топологічного проектування з перерахованих параметрів найбільш важливим є оптимальна кількість вузлів у мережі. У тих випадках, коли вартість є головним критерієм, синтез топологічної структури може бути проведений за мінімумом цього критерію.

Допустимо, що для деяких значень вихідних даних S , N , W_1 , W_2 , W_3 , W_4 був отриманий результат, який відповідає оптимальному числу n_y . Реальне розміщення ОЦ по території регіону може не відповідати рівномірному їхньому розподілу. Але при невеликій кількості вузлів шляхом підбору конкретних місць розташування ОЦ, можна вибрати найбільш близький реальний варіант і прийняти його для наступного аналізу.

Припустимо, що у результаті обчислень n_y вийшло дорівнює восьми, а реальне місце розташування ОЦ, поєднаних у мережу, відповідає схемі, показаної на рис. 3.

При первісних припущеннях, уважалося, що зв'язки між вузлами утворять повнозв'язну структуру. Однак під час синтезу архітектури такої мережі можна теоретично розглянути й інші варіанти топологічних структур, оцінити, наскільки можливо подальше зменшення вартості, якщо це потрібно.

Надалі при розгляді питання синтезу топології ІМ будемо орієнтуватися на просту структуру типу дерева, думаючи, що у такий спосіб можна понизити вартість проектованої мережі й зрівняти її з максимальною у відповідності до повнозв'язної структури.

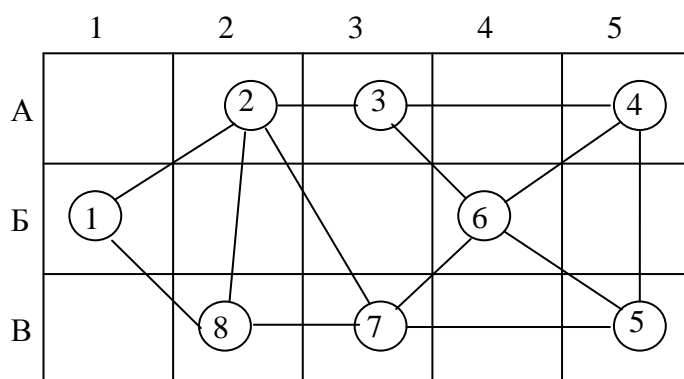


Рисунок 3 - План розміщення вузлів у синтезованій мережі

Для рішення завдання мінімізації структури скористаємося моделлю мережі у вигляді зваженого графа, у якого ваги дуг характеризують, наприклад, довжини каналів між відповідними вузлами ІМ. Тому що розглядається мере-

жа з відносно малою кількістю ребер, для неї зручним способом рішення завдання мінімізації структури є алгоритм Краскала, що полягає в наступному [12].

Таблиця 1 – Список ребер з їхніми ваговими значеннями

Вага ребра	Ребра	Примітка
0,5	(1,2)	–
1,0	(1,8), (3,6), (6,7)	–
1,8	(3,7) відкидаємо	Приводить до циклу
1,9	(2,3), (2,7) відкидаємо	–
2,0	(2,6) відкидаємо	–
2,1	(7,8) відкидаємо	–
2,2	(1,7) відкидаємо	–
2,3	(1,3), (4,5) і (1,3)	(1,3) відкидаємо
2,8	(1,6) відкидаємо	–
3,0	(6,4)	–
3,5	(3,4) відкидаємо	–
5,5	(5,6) відкидаємо	–
5,8	(5,7) відкидаємо	–
8,0	(1,5) відкидаємо	–

Упорядкуємо ребра за вагою, вибираючи з безлічі ребер графа, при складанні списку, щораз ребро мінімальної ваги, і далі за зростанням, як показано в табл. 1.

Потім, користуючись списком, будемо мінімальне покриваюче дерево, починаючи з першого ребра й додаючи наступні один по одному. Якщо чергове обране ребро приводить до утворення циклу, то його відкидаємо. Після вибору ребра $n - 1$ (n - число вершин графа) процес закінчується.

3 ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У МЕРЕЖІ

3.1 Аналіз характеристик інформаційних потоків

Визначивши план оптимального розміщення вузлів і абонентських пунктів мережі, отриманий з розрахункових співвідношень для різних видів капітальних витрат, відстаней між абонентськими пунктами й ОЦ, інших параметрів, можна розглянути питання інформаційного забезпечення, які містять у собі:

- формування структур можливих типів вхідних і вихідних повідомлень;
- визначення складу запитів, їхніх частотно-тимчасових розподілів.

Ці характеристики визначають значення обсягів збереженої й оброблюваної у мережі інформації, потоки повідомлень, значення навантаження. Точніше визначення об'єктивної потреби обчислювальних ресурсів і масштабів інформаційного обслуговування не є можливим хоча б тому, що дані характеристики динамічно змінюються, мають особливості складного випадкового процесу.

Крім того, для більшості існуючих методик характерний суб'єктивний фактор, що полягає в тому, що багато даних, за якими оцінюються показники інформаційних потоків і характеристики інформаційного обслуговування, виходять на основі анкетування, опитування компетентних фахівців і т.п. При створенні нової мережі інформаційні характеристики виступають як прогнозовані величини, тому вони носять імовірнісний характер і, отже, принципово можливі відхилення від реально спостережуваних значень у майбутній мережі.

Відзначимо два суперечливих моменти, які необхідно враховувати при створенні мережі:

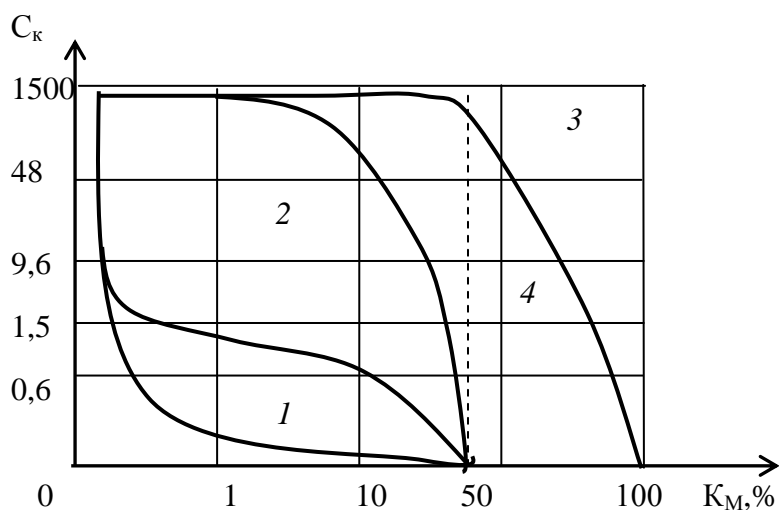
- по-перше, варто мати на увазі, що техніка, яка може використатися у мережі, має бути завантажена як можна повніше;
- по-друге, необхідно передбачити можливості розвитку мережі й збільшення завантаження ресурсів.

Важливим питанням у рішенні завдань синтезу є вибір і обґрунтування способів комутації, тому що вони сильно впливають на значення й розподіли потоків інформації.

Знаючи структуру мережі й вимоги до швидкості передачі інформації з каналів, можна визначити раціональний спосіб комутації. Основними параметрами, що впливають на вибір способу комутації, є середні обсяги переданої

інформації, а також величини відхилень реальних обсягів від середніх значень. На розподіл потоків впливають також тривалість цих відхилень і коефіцієнт завантаження каналів. При постійній потребі у великому обсязі обміну інформацією між ОЦ і АП доцільно застосувати пересічну комутацію каналів.

При великому коливанні навантаження, коли немає високих вимог до максимально припустимої затримки у передачі повідомлень, спосіб комутації повідомлень забезпечує високе використання каналів і дозволяє вирівнювати навантаження, причому він може застосовуватися при будь-яких швидкостях передачі інформації. Особливо він ефективний при застосуванні адаптивних методів управління потоками повідомлень.



1 - комутація каналів; 2 - пакетна комутація; 3 - прямий зв'язок з ЕОМ;
4 - пересічна комутація

Рисунок 4 – До питання вибору способів комутації при синтезі ІМ

Для вибору методу комутації можна скористатися діаграмою розподілу областей застосування різних методів комутації залежно від пропускної здатності C_k каналів мережі й коефіцієнта K_m використання каналу. Ці залежності представлені на рис. 4 [4]. Даний розподіл відповідає технічному рівню апаратур зв'язку й засобів обчислювальної техніки, а також їхньої вартості при реалізації різних способів комутації, здійснюваних у цей час.

3.2 Визначення затримок передачі інформації

Середні затримки є одним з найважливіших показників, що характеризують продуктивність конкретної інформаційної мережі. Для визначення сере-

дніх затримок задається структура графа, що відображає топологію проектованої мережі, для чого користуються різними матрицями, наприклад матрицею суміжності. Матричне подання графа зручно при рішенні мережних завдань на ЕОМ. Для розглянутої мережі, наприклад (див. рис. 3), матриця суміжності має вигляд:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\
 1 & - & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 2 & 1 & - & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 3 & 0 & 1 & - & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 4 & 0 & 0 & 1 & - & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 5 & 0 & 0 & 0 & 1 & - & 1 & 1 & 0 \\
 6 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & - & 1 & 0 \\
 7 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & - & 1 \\
 8 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -
 \end{array}
 \end{array}$$

Далі для розрахунку затримок має бути задана матриця зовнішніх інтенсивностей потоку повідомлень $\|\gamma_{ij}\|$, де елемент матриці γ_{ij} — є зовнішня інтенсивність надходження повідомлення до вузла j з i вузла.

За цією матрицею й наступною формулою можна визначити повний зовнішній графік мережі:

$$\gamma = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \gamma_{jk} \cdot \quad (16)$$

Це необхідно надалі для оцінки значень середніх затримок.

Виходити з міркувань якнайшвидшої доставки інформації, часто задаються матрицею маршрутів $\|r_{ij}\|$, якщо вона не задана.

Елемент r_{ij} — це номер вузла, до якого повинне надійти повідомлення, якщо воно перебуває у вузлі з номером i .

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\
 1 & \left\| \begin{array}{cccccccc}
 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 8
 \end{array} \right\| \\
 2 & \left\| \begin{array}{cccccccc}
 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 7 & 1
 \end{array} \right\| \\
 3 & \left\| \begin{array}{cccccccc}
 2 & 2 & 3 & 4 & 6 & 6 & 6 & 2
 \end{array} \right\| \\
 4 & \left\| \begin{array}{cccccccc}
 3 & 3 & 3 & 4 & 5 & 6 & 6 & 6
 \end{array} \right\| \\
 5 & \left\| \begin{array}{cccccccc}
 7 & 4 & 4 & 4 & 5 & 6 & 7 & 7
 \end{array} \right\| \\
 6 & \left\| \begin{array}{cccccccc}
 3 & 3 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 7
 \end{array} \right\| \\
 7 & \left\| \begin{array}{cccccccc}
 3 & 3 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8
 \end{array} \right\| \\
 8 & \left\| \begin{array}{cccccccc}
 1 & 2 & 2 & 7 & 7 & 7 & 7 & 8
 \end{array} \right\|
 \end{array}
 = \|r_{ij}\|.
 \end{array}$$

На підставі матриці маршрутів $\|r_{ij}\|$ будується також матриця рангів шляхів $\|n_{ij}\|$, де елемент n_{ij} — кількість каналів зв'язку, складових $(1 - k)$ - шлях.

$$\begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{array} & \left\| \begin{array}{cccccccc} 0 & 1 & 2 & 4 & 5 & 3 & 4 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 3 & 4 & 2 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 \\ 4 & 4 & 3 & 2 & 0 & 1 & 1 & 2 & 5 \\ 5 & 5 & 4 & 3 & 1 & 0 & 2 & 3 & 6 \\ 6 & 3 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 & 4 \\ 7 & 4 & 3 & 2 & 2 & 3 & 1 & 0 & 6 \\ 8 & 1 & 2 & 3 & 5 & 6 & 4 & 5 & 0 \end{array} \right\| \\ \end{array} = \|n_{ij}\|.$$

У даній матриці рівність її елемента 1 означає, що одна ланка (один канал зв'язку) лежить між відповідними вузлами; 2 - це дві ланки утворять шлях від однієї із заданих вершин до іншої і т.д.

Для оцінки характеристик внутрішніх потоків у мережі необхідно скористатися таблицею маршрутів, що враховує зв'язки вузлів і напрямки передачі інформації між ними. У найпростішому варіанті ці зв'язки детерміновані й однозначні; тоді таблицю маршрутів $\|u_{ij}\|$ (табл. 2) становлять шляхом перерахування дуг, що з'єднують відповідні вершини, або по черговою вказівкою номерів вершин (вузлів ІМ).

Інтенсивність потоку повідомлень по i -му каналі, використовуючи побудовані матриці, визначимо за формулою

$$\lambda = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \lambda_{jk}.$$

Для n -вузлової мережі існує наступна формула для визначення середньої затримки повідомлення в i -у каналі [1]

$$T_i = 1/(\nu_i - \lambda_i). \quad (17)$$

Тому що всі канали у мережі працюють незалежно, то для обчислення середньої затримки повідомлення у мережі можна користуватися формулою

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\gamma} \frac{1}{\nu_i - \lambda_i}. \quad (18)$$

де $1/\nu$ - середній час передачі; ν - середня довжина одного повідомлення.

Якщо результати розрахунків затримок задовольняють необхідним значенням (причому вартість мережі витримувалася під час проектування в мінімально можливих межах), то отримана топологічна структура може бути прийнята за основу подальшої розробки, що полягає у визначенні конкретних типів технічних засобів, реалізації обраних протоколів, способів управління, комутації, у складанні програмного забезпечення й у рішенні інших питань технічного проектування.

Таблиця 2 - Таблиця маршрутів $\|u_{ij}\|$

Номера вузлів ІМ								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1-2	1-2-3	1-2-3-4	1-2-3-4-5	1-2-3-6	1-2-3-6-7	1-8
2	2-1	0	2-3	2-3-4	2-3-4-5	2-3-6	2-7	2-1-8
3	3-2-1	3-2	0	3-4	3-6-5	3-6	3-6-7	0
4	4-3-2-1	4-3-2	4-3	0	4-5	4-6	4-6-7	4-6-7-8
5	5-7-2-1	5-4-6-3-2	5-4-3	5-4	0	5-6	5-4-6-7	5-7-8
6	6-3	6-3-2	6-3	6-4	6-4-5	0	6-7	6-7-8
7	7-6-3-2-1	7-6-3-2	7-6-3	7-6-4	7-4-5	7-6	0	7-1-8
8	8-1	8-2	8-2-3	8-2-3-4	8-7-5	8-7-6	8-7	0

Номера рядків табл. 2 відповідають номерам вузлів, з яких повідомлення надходять до мережі, а номери стовпчиків вузлам, до яких ці повідомлення адресовані. Елементи таблиці позначають шляхи, якими повідомлення проходять через відповідні вузли.

4 ОЦІНКА ІМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІМ

При керуванні потоками даних виникає необхідність передбачити обмеження навантаження в субмережі зв'язку й здійснити, таким чином, регулювання потоків повідомлень, які надходять до мережі.

Обмеження навантаження робиться з метою узгодження швидкості роботи відправників і адресатів даних; ліквідації транзитних вузьких місць, коли інтенсивність потоку перевершує швидкість обслуговування пакетів.

Обмеження навантаження виконується за допомогою так званого механізму вікна, що регулює навантаження у кожному віртуальному (тимчасовому логічному) з'єднанні «відправник - адресат».

Дослідження мережі, у якій діє обмеження навантаження, здійснюється методами теорії мереж масового обслуговування (ММО). Рішення для стаціонарних імовірнісних станів мереж ММО відомі, однак вираження для різних показників обслуговування визначені тільки для розімкнутих систем («вхід – вихід»).

Для однорідних замкнутих мереж з ідентичними (однотипними) заявками є ефективні обчислювальні алгоритми, для неоднорідних замкнутих мереж вони ще недостатньо добре розроблені.

4.1 Методика розрахунків характеристик функціонування мережі

Розроблено методику розрахунків характеристик функціонування мережі пакетної комутації, що використовує механізм вікна для управління вхідними потоками ІМ.

За даною методикою досліджується мережа ЕОМ колективного користування (рис. 5), що складається з інформаційних процесорів (ІП), які обмінюються даними через канал зв'язку (КЗ) методом комутації пакетів – система передачі даних (СПД). Інформаційні процесори підключаються за допомогою каналів міжмашинного обміну (КМО) до мережних процесорів (МП).

Коли від абонента надходить повідомлення на ІП, здійснюється формування й передавання пакетів під управлінням операційної програми (ОП) мережного процесора. ОП утворюють систему комутації пакетів і забезпечують фізичний обмін каналами зв'язку. МП з'єднані з ІП каналами міжмашинного об-

міну із прямим доступом до пам'яті, а між собою МП з'єднані напівдуплексними каналами зв'язку (по декілька каналів у кожному напрямку).

Нехай відомо, що пропускна здатність МП становить N_{II} пакетів у секунду, максимальна довжина повідомлення - L_c пакетів, максимальна довжина пакета - B байт.

У деякий момент часу в мережі є кілька односпрямованих віртуальних з'єднань «відправник - адресат», причому з кожним з них зв'язана та або інша кількість пакетів, що транспортуються.

На кожний прийнятий адресатом пакет відправникові посилає підтвердження (квитанція), що має більше високий пріоритет, чим пакет з даними. Якщо кількість пакетів, що транспортуються у даному з'єднанні, досягло величини N_s - ширини вікна, то відправник не передає нового пакета до одержання підтвердження.

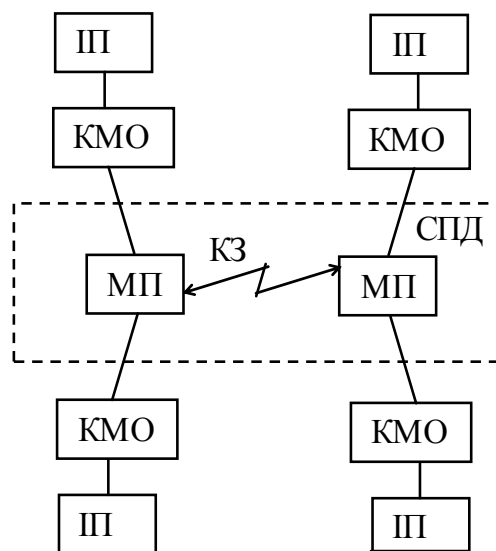


Рисунок 5 - Приклад конфігурації до завдання оцінки імовірнісних характеристик ІМ

Характеристики відправника вхідного потоку задаються розподілом довжини пакетів та інтервалів між моментами виникнення пакетів.

Потік прийнятих повідомлень характеризується розподілом часу прибуття пакетів.

Обмеження кількості пакетів у віртуальному з'єднанні перетворить відкрити мережу масового обслуговування (ММО) у замкнуту з безліччю цикліч-

них ланцюжків ММО, що обслуговують пристрої, які відповідають кожному віртуальному з'єднанню.

Важливим показником, що характеризує транспортну службу мережі, є реалізована засобами ІІ кількість одночасно переданих пакетів N_0 . Аналіз характеристик мережі при різних N_s і N_0 дозволяє визначити раціональні режими роботи мережі, виявити вузькі місця.

Розглядаються наступні можливі випадки (варіанти) з'єднань взаємодіючих процесів.

У першому варіанті моделюється локальна ділянка мережі з одним віртуальним з'єднанням ІІ₁-СП-ІІ₂, що є замкнутим ланцюжком з п'яти станцій масового обслуговування (рис. 6, а). Станції 1 і 5 моделюють транспортні служби ІІ₁ і ІІ₂, станції 2 і 4 — канали міжмашинного зв'язку, а станції 3 — мережний процесор.

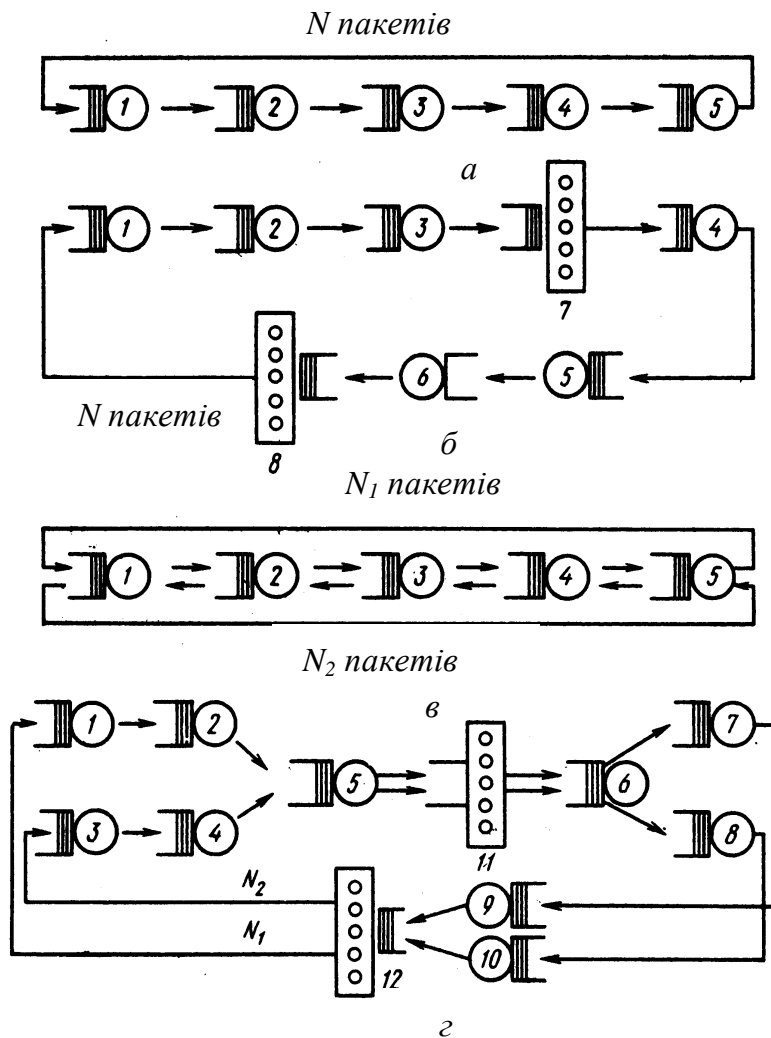


Рисунок 6 - Варіанти схем організації віртуальних з'єднань у синтезованій ІМ

У другому варіанті моделюється транзитна ділянка мережі $\Pi_{1-СП1}$ - канал зв'язку - $\Pi_{2-ИП2}$, що, так само як і в першому випадку, є замкнутим ланцюжком ММО, але складається з восьми станцій (рис. 6, б). Одна з них б моделює мережний процесор Π_2 , а 7 і 8 — канали зв'язку між ним і процесором Π_1 .

У третьому варіанті розглядається локальна ділянка $\Pi_{1-СП-ИП2}$, у якому встановлені два віртуальних з'єднання із двома протилежними напрямками передачі пакетів (рис. 6, в). Тут номери станцій відповідають першому варіанту.

У загальному ж випадку для даної мережі може бути задана модель, що враховує в комплексі наведені варіанти взаємодій Π_1 і Π_2 із двома класами заявок: перший, коли передані пакети проходять маршрутом 1—2—5—11—6—7—9—12, другий, коли вони транспортуються шляхом 3—4—5—11—6—8—10—12 (рис. 6, м).

Для аналітичного подання даної моделі розглядається замкнута мережа систем масового обслуговування, що складає в загальному випадку з M обслуговуючих пристроїв (станцій). Кожна станція містить k_i каналів, час обслуговування в якій має експонентний розподіл із середнім значенням $\tau_i, -$. У мережі перебуває постійна кількість заявок, що належать різним класам, обумовленим маршрутизацією пакетів. Часи обслуговування заявок різних класів на окремій станції мають однакові розподіли.

Процеси маршрутизації описуються ланцюгами Маркова 1-го порядку з матрицями перехідних імовірностей $P_r = \|p_{ij}^{(r)}\|$, $i, j = 1, M, r = 1, R$, де $p_{ij}^{(r)}$ — імовірність переходу заявки класу r на станцію j після закінчення обслуговування на станції i .

Визначення характеристик функціонування мережі МО виробляється на основі виражень для стаціонарних імовірностей станів, які в цьому випадку записуються в наступній формі:

$$p(\bar{n}) = \frac{1}{C(\bar{N})} \prod_{r=1}^R \frac{n_i}{n_{1i} n_{2i} \dots n_{Ri}} A_i(n_i) \prod_{r=1}^R y_{ri}^{n_{ri}}, \quad (19)$$

де n_{Ri} — кількість заявок класу R на станції i ; $n_i = \sum_{r=1}^R n_{ri}$ загальна кількість заявок на станції i ; N_r — число заявок класу r у мережі ($r = \overline{1, R}$); $\bar{N} = (N_1, \dots, N_r)$ — кількість заявок усіх можливих класів.

$$A_i(j) = \begin{cases} r_i^j / j! & j \leq k_i, \\ \tau_i^j / k_i! & k_i^{j-k} \quad j > k_i. \end{cases} \quad (20)$$

Величини y_{ri} визначаються рішенням R систем лінійних рівнянь

$$y_{1i} = \sum_{j=1}^M y_{ji} P_{ji}^{(R)}, \quad i = \overline{1, M} \quad \bar{y}_1 = (y_{11} \dots y_{1M});$$

...

$$y_{Ri} = \sum_{j=1}^M y_{jR} P_{ji}^{(R)}, \quad i = \overline{1, M} \quad \bar{y}_R = (y_{R1} \dots y_{RM})$$

і являють собою середні кількості проходів заявки класу через станцію за один повний цикл обслуговування.

Константа нормалізації $C(\bar{N})$ забезпечує рівність суми ймовірностей $P(\bar{n})$ одиниці, тобто

$$C(\bar{N}) = \sum_{nes} P(\bar{n}), \quad S(\bar{n}) = \left\{ \bar{n} = (\bar{n}_1 \dots \bar{n}_M) / \sum_{i=1}^M n_{ri} = N_r \right\}.$$

4.2 Основні характеристики функціонування мережі

У процесі рішення зазначеного вище завдання, одержуваного на основі застосування чисельних методів, реалізованих на ЕОМ, визначаються основні характеристики функціонування мережі:

Пропускні здатності мережі для заявок різних класів:

$$I_r(N) = \frac{C(\bar{N} - \bar{I}_r)}{C(\bar{N})}. \quad (21)$$

Дана характеристика визначає середню кількість заявок класу r , що пройшли повний цикл обслуговування в одиницю часу, а $\bar{I}_r = (0, 0, \dots, 1, \dots, 0)$ - вектор, у якого r - компонента $j_r = 1$ й $j_k = 0$, $k \neq r$.

Середні часи затримки заявок різних класів на круговому маршруті замкнутої мережі:

$$D_r = \frac{N_r}{T_r(\bar{N})}, \quad r = \overline{1, R}. \quad (22)$$

Дана характеристика виражає середній час, що вимагається для проходження повного циклу обслуговування заявки класу r .

Коефіцієнти використання станцій:

$$u_i^{(r)} = y_{ri} \tau_i T_r(\bar{N}), \quad r = 1, \dots, R, \quad i = \overline{1, R}. \quad (23)$$

Якщо k_i (кількість каналів на станції i) дорівнює одиниці, то $u_i^{(r)} < 1$.

Якщо $k_i > 1$, то $u_i^{(r)}$ дорівнює середньому числу зайнятих каналів на станції i заявкам класу r . У цьому випадку коефіцієнт використання окремого каналу на станції i

$$C_i^{(r)} = u_i^{(r)} / k_i. \quad (24)$$

Середні часи перебування заявок на окремих станціях:

$$d_i^{(r)} = \begin{cases} l_i^{(r)} / y_{ri} T_r(\bar{N}), & \text{если } y_{ri} \neq 0 \\ 0, & \text{если } y_{ri} = 0 \end{cases},$$

де $l_i^{(r)}$ — середня кількість заявок на окремих станціях.

Коефіцієнт потужності мережі:

$P(\bar{N}) = T(\bar{N})D(\bar{N})$ - загальна потужність,

$P_r(\bar{N}) = T_r(\bar{N})D_r(\bar{N})$ - потужність за класом.

Зазначені в п. 1 ... 5 характеристики можуть бути визначені для випадку, коли у мережі обслуговуються заявки тільки одного класу: пропускна здатність $T(N) = C(N-1)/C(N)$; середня затримка $D(N) = N/T(N)$; коефіцієнти використання станцій (при $k_i = 1$) або кількість зайнятих каналів (при $k > 1$) $u_i = y_i T(N) \tau_i$ середнє число заявок

$$l_i = \frac{1}{C(N)} \sum_{k=1}^N k \Delta(k) y_i C_{M-1}(N-k),$$

де N — загальна кількість заявок; M — кількість станцій.

Середній час перебування заявки на станції i :

$$t_i = l_i / (y_i T(N)).$$

Практичне рішення розглянутого завдання оцінки імовірнісних характеристик ІМ може бути виконано тільки із застосуванням ЕОМ при реалізації спеціальних обчислювальних методів і алгоритмів, а також на основі імітації досліджуваних процесів на ЕОМ, принципи яких розглядаються в [1].

5 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ІМ

5.1 Загальні положення

Моделюванням називається процес зіставлення (відображення) безлічі властивостей $\{M_s\}$ деякої системи S на безліч $\{M_m\}$ властивостей іншої системи M , що є моделлю першої. Для відображення вибирають відповідні засоби й методи, наприклад мови моделювання, які дозволяють здійснити ті або інші можливості процесу моделювання. Самі моделі, тобто системи M , можуть являти собою різні фізичні й логічні сутності.

В одних випадках це може бути деяка фізична система, в інших - теорія.

Моделювання у загальному значенні - є метод наукового пізнання, при використанні якого досліджуваній об'єкт заміняється іншим, більше простим об'єктом, названим моделлю. У цей час відомі й широко використовуються у наукових дослідженнях та інженерній практиці численні методи й прийоми моделювання, у тому числі й для моделювання ІМ. Тут у різних розділах теорії ІМ виникає необхідність застосовувати поняття, що являють по суті абстрактні логічні моделі. Це, наприклад, графоматричні відображення й моделі топологічних структур, моделі марковських процесів, застосовувані для опису динамічних режимів функціонування ІМ, моделі потоків у комутаційних системах і т.п.

Основними різновидами процесу моделювання можна вважати два його види: *математичне й фізичне моделювання*.

При *фізичному моделюванні* досліджувана система заміняється відповідною їй іншою матеріальною системою, приладом або пристроєм, які відтворюють властивості досліджуваної системи (об'єкта) зі збереженням їхньої фізичної природи. Прикладом цього виду моделювання може служити оцінка властивостей реальних каналів зв'язку інформаційної мережі за допомогою макетів, що складаються з генераторів імпульсів і еквівалентних електричних ланцюгів. Можливості фізичного моделювання досить обмежені. Воно дозволяє вирішувати окремі завдання при фіксованих умовах. На відміну від фізичного математичне моделювання має більше широкі можливості.

Під *математичним моделюванням* розуміють метод дослідження різних процесів, описуваних тими або іншими математичними співвідношеннями.

При його використанні будується математичний опис або математична модель. Вона являє собою сукупність співвідношень, наприклад формул, рівнянь, нерівностей, логічних умов, операторів і т.п., що визначають характеристики станів системи залежно від її параметрів, вхідних сигналів, початкових умов і часу.

Математичне моделювання тісно пов'язане з рішенням багатьох завдань проектування ІМ. Крім того, самі математичні моделі є теоретичною основою для розробки інших типів моделей.

Залежно від характеру процесів, що ми модулюємо, і систем вибирається відповідний математичний апарат, який визначає безліч необхідних для моделювання понять, процедур і формальних правил перетворення вихідних співвідношень, які враховують істотні особливості об'єкта.

Так, наприклад, можна зазначити класи детермінованих і стохастичних (з випадковими змінними, параметрами й функціями) моделей, причому як ті, так й інші можуть бути у свою чергу розподілені на два різновиди - аналогові й дискретні моделі.

5.2 Моделювання у теорії ІМ

У теорії ІМ більшу групу завдань вирішують на основі моделювання випадкових величин і випадкових дискретних подій (процесів). Моделювання випадкової величини (випадкового процесу) найчастіше здійснюється за допомогою так званого методу Монте-Карло, у якому застосовується ідея конструктивного імовірнісного простору й дії деякого випадкового механізму.

Конструктивний простір відповідає уявленню випадкової величини у вигляді кінцевої або рахункової послідовності незалежних величин, рівномірно розподілених на відріжку $[0,1]$. Послідовність чисел називається рівномірно розподіленою $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i \in (0, 1)$, якщо для будь-якої інтегрувальної на відріжку $[0,1]$ за Рیمانом функції $f(x)$ має місце співвідношення

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(\alpha_i) = \int_0^1 f(x) dx.$$

Завдання методу Монте-Карло полягає в одержанні за низкою реалізацій деяких відомостей про розподіл випадкової величини, тобто ϵ , таким чином, типовим завданням математичної статистики.

Останні досягнення в області обчислювальної техніки породили новий напрямок у дослідженні складних процесів і систем — *імітаційне моделювання*. Воно дозволяє досліджувати як детерміновані, так і випадкові процеси й системи.

Імітаційне моделювання на ЕОМ викликало великий інтерес у дослідників, проектувальників і експлуатаційників технічних систем. При його використанні є можливим істотно заощадити час і витрати на одержання необхідних даних про властивості систем у порівнянні з використанням звичайних «традиційних» методів натурних випробувань або аналітичних досліджень. У зв'язку з появою потужних ЕОМ третього й наступного поколінь і розвитком спеціальних мов програмування ефективність імітаційного моделювання сильно зросла.

5.2.1 Імітаційне моделювання

Імітаційне моделювання - це сукупність чисельних методів проведення експериментів на ЕОМ з математичними моделями, що описують поведінку складних систем протягом тривалих періодів часу. Інформація, що використовується в імітаційному експерименті як послідовність чисел (детермінованих або випадкових), уводиться до ЕОМ із зовнішніх носіїв інформації. Ці послідовності найчастіше генерують за допомогою спеціальних програм.

При стохастичному моделюванні такі програми називаються генераторами псевдовипадкових чисел.

Відомі три основних конгруентних (співпадаючих) алгоритми генерування псевдовипадкових чисел - мультиплікативний, змішаний і комбінований. Усі вони ґрунтуються на загальній рекурентній формулі

$$n_{i+1} = \lambda n_i + \mu \pmod{m},$$

де n_i , m , λ і μ — ненегативні цілі числа.

Зупинимося на широко розповсюдженому мультиплікативному алгоритмі. Відповідно до одного з його варіантів кожне чергове число перебуває за формулою: $n_{i+1} = kn_{i-1}$, причому $k = 8t + 3$. Тут t - ціле число; n - непарне число; n_i - ціла значуща частина числа n_{i+1} .

Щоб відтворити рівномірний закон розподілу, що є вихідним для одержання законів будь-якого іншого виду, і згенерувати відповідну послідовність

випадкових чисел, користуються співвідношенням, що випливає з вираження для кумулятивної функції $F(x)$ рівномірного розподілу (рис. 7):

$$F(x) = \int_a^x \frac{1}{b-a} dt = \frac{x-a}{b-a},$$

звідки $x = a + (b-a)r$, $0 \leq r \leq 1$.

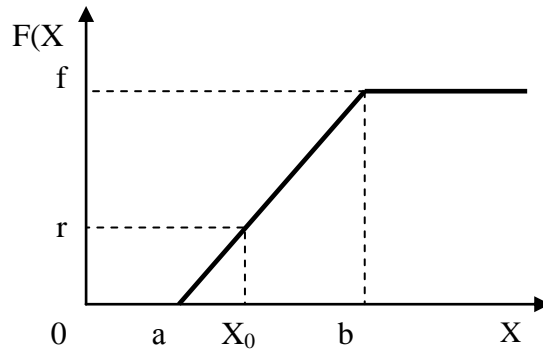


Рисунок 7 - Кумулятивна функція для рівномірного розподілу

Для одержання послідовностей з нерівномірним законом користуються функціональним перетворенням кумулятивної функції рівномірного закону.

5.2.2 Методика імітаційного моделювання ІМ

Загальний порядок розробки імітаційних моделей ІМ і здійснення процесу їхнього моделювання полягає в наступному. Спочатку формулюється основний зміст проблеми дослідження мережі й тих завдань, які пов'язані із цим дослідженням. Потім виконується формалізована постановка планованих завдань дослідження. При постановці широко користуються наявними у дослідника й взагалі відомими із практики досліджень необхідними математичними моделями й співвідношеннями. В окремому випадку таких моделей може взагалі не бути, однак це більш характерно для зовсім нових і не досліджених об'єктів, а мережі, очевидно, не можна вважати такими.

Наступним є етап визначення апріорних вихідних даних і їхнє обґрунтування. Вибір логічної й фізичної сутності тих або інших параметрів і змінних і визначення їхніх кількісних значень - це далеко не просте питання, що виникає в процесі моделювання. При великій кількості вихідних даних різко зростає обсяг обчислень, причому модель виходить надлишковою й громіздкою. При недоліку вихідних даних знижується точність, модель стає неадекватною. Тому

при виборі вихідних даних необхідно обґрунтувати цінність і значущість кожного з параметрів, що вводять у модель, і кожної зі змінних величин, зазначити з них головні й істотні, додаткові й другорядні. Цей етап можна розглядати як самостійний. У ході його здійснюється варіювання вихідними моделями, параметрами й змінними, робиться оцінка впливу кожного з них на суть моделі й очікувані результати.

Після того, як вихідна модель і обрані параметри випробувані під час варіювання й зроблені висновки про придатність узятій моделі, починають складання машинної програми для імітації на ЕОМ. На даному етапі може знадобитися коректування вихідної моделі, уточнення завдання програмування з метою складання блок-схеми алгоритму імітації написання програми.

У результаті пошуку прийняттого варіанта розроблювачі, щоб зробити модель більше точною і повною, настільки ускладнюють програму, що на її налагодження й прогони на ЕОМ іде значний машинний час, внаслідок чого й весь цикл машинних експериментів з моделлю стає непомірно більшим.

Прикладом, коли доводиться зіштовхуватися з подібною ситуацією, може служити завдання оцінки інформаційних характеристик мережі з комутацією пакетів, нагромадженням і обробленням інформації на вузлах.

Складність виникає не тільки на етапі написання програми, вибору засобів математичного забезпечення для реалізації моделей, але й на найперших етапах складання вихідного формалізованого математичного опису модельованої системи.

Тут у рішенні розглянутої проблеми дуже ефективним може виявитися модульний принцип моделювання ІМ. Подібно тому як в архітектурі самих мереж при аналізі зазначаються основні типові модулі, так і при побудові й дослідженні моделі мережі можна застосовувати й досліджувати моделі окремих модулів. Так, відомі термінальні модулі, комутаційні модулі, хостмодулі й ін.

У результаті такого підходу виявляється доцільним досліджувати характеристики мережних підсистем за допомогою імітаційних програм, складених для окремих модулів. Результати таких досліджень, як правило, подаються у вигляді табличних значень змінних, хоча можливі й інші форми подання, зокрема графіки або аналітичні залежності й співвідношення. Усі вони можуть розглядатися як проміжні математичні моделі.

Різні логічні, алгебраїчні й інші перетворення результатів імітаційного моделювання окремих модулів дозволяють здійснити концептуальні зв'язки у системі більше загального виду й одержати формалізовані моделі для мережі в цілому. Таким чином, весь процес моделювання ІМ у цілому може бути поданий як послідовність фаз або етапів математичного моделювання, що чергуються, й машинної імітації.

5.2.3 Програмні засоби імітації

Програмування моделі – основне питання, що виникає при машинній імітації. Складність машинної програми, що реалізує модель, залежить від кількості змінних і структури вихідної математичної моделі. Складання програми на одній з імітаційних мов дасть значний вигреш часу програмування, однак можуть зрости витрати машинного часу.

У процесі програмування важливо забезпечити мінімальні втрати адекватності моделі, її точності й придатності. У цьому плані алгоритмічні мови моделювання є ефективним засобом розроблення машинної реалізації й аналізу.

Існуючі мови імітаційного моделювання класифікують за орієнтацією на дії, події, потоки й процеси [5].

У мовах, орієнтованих на дії, представниками яких є CSL, FORSIM IV, GSP та інші, які імітують програми, побудовані таким чином, що здійснюється перегляд набору умов, необхідних для виконання дій. Якщо ці умови виконуються, то керуюча імітаційна програма включає відповідну дію до кількості виконаних, у протилежному випадку дія пропускається. Періодичний перегляд програмою умов, які змінюються, дає можливість оцінити імовірнісні характеристики виконуваних дій.

У мовах, орієнтованих на події, кожне з них розподіляється у певній послідовності. Настання подій так само, як і виконання дій у мовах, орієнтованих на дію, визначається умовами їхньої появи. У програмах, що імітують, складених на мовах даного типу, подія уявляється як миттєве відповідно до регламенту, що забезпечує його настання в той момент, коли динамічний стан моделі вказує на сформовані умови його появи. До подібних мов відносяться SIMSCRIPT, GASP, SIMCON та ін. Вони характеризуються ефективністю про-

грамування, тому що складаються з невеликої кількості типів різних макрокоманд і операторів.

У мовах, орієнтованих на процеси, формують потоки повідомлень (транзактів), які мають можливість переміщення різними логічними об'єктами (блоками). У програмах, складених на мовах цього типу, модельована система подається у вигляді сукупності блоків, що відображають логіку її функціонування. Типовими представниками транзактно-орієнтованих мов є GPSS, SIMDIS.

Кожна мова моделювання відбиває певну структуру понять, що застосовуються для опису досить широкого класу моделюємих явищ.

Засобами реалізації проблемно-орієнтованих програмних імітаційних моделей є також АСЕМБЛЕР і універсальні алгоритмічні мови. Однак їхнє застосування для цілей імітації нерациональне через складність програмування.

Основні відмінності мов імітаційного моделювання один від одного й від універсальних алгоритмічних мов визначаються: способом організації обліку часу й дій, що відбуваються; правилами присвоєння імен структурним елементам; способами перевірки умов, при яких реалізуються дії; видом статистичних випробувань, які можливі при наявності вихідних даних і обраних планів експериментів; ступенем труднощів зміни структури моделі.

Загальними перевагами мов імітаційного моделювання перед звичайними алгоритмічними мовами є: менші витрати часу на програмування; більше висока виразність дій, що імітують, відповідній логіці реальних процесів; можливість створення бібліотек стандартних підпрограм імітації, спеціально розрахованих на відповідні застосування; зручність формування, нагромадження й подання вхідних, вихідних і проміжних даних; ефективні способи налагодження програм і виявлення помилок у програмах імітації.

До числа недоліків відносять такі особливості, як значний час імітації, сувора необхідність витримування встановлених форматів, менша гнучкість моделей, тобто неможливості їхньої перебудови під час процесу моделювання.

5.2.4 Планування імітаційних експериментів

Моделювання ІМ - це творчий процес, під час якого широко застосовуються різні наукові прийоми, враховуючі наступні особливості й проблеми імітаційного моделювання ІМ:

1 Складність вибору параметрів і змінних при складанні вихідної математичної моделі.

2 Психологічні аспекти й неформалізовані фактори, що визначають поведінку користувача в процесі взаємодії з ІМ і діалогу з ЕОМ: неоднозначність реакції, його почуття, риси характеру, воля, евристичні алгоритми й т.п.

3 Семантичні й лінгвістичні аспекти інформаційних процесів в ІМ, тобто розгалуженість тезауруса, розімкнення інформаційних баз, що приводять в остаточному підсумку до неточності у вихідних моделях.

4 Нелінійність систем і відповідних математичних моделей.

5 Багатокомпонентність (велика кількість усіляких факторів).

6 Стохастичний характер численних процесів: випадкові потоки інформації, запити, процеси відмов і відновлення.

7 Складність техніки, застосовуваної в ІМ.

Важливим етапом у процесі моделювання, виконуваним після складання імітаційної програми, є розроблення плану імітаційного експерименту (планування експерименту). План припускає обґрунтований вибір початкових значень змінних, зазначених у вихідній математичній моделі, їхніх варіацій (змін кількісних значень) і визначення напрямку цих змін. Найпростішим варіантом плану є застосування дворівневих збільшень, формування спочатку теоретичного повного плану й вибір з нього конкретних часткових і дробових планів для цілей їхньої практичної реалізації. Тут широко застосовують так звані рототабельні плани й методи побудови поверхні реакції [5].

При моделюванні необхідно враховувати й ті основні проблеми, які ускладнюють завдання планування імітаційних експериментів. До їхнього числа відносяться:

1) проблема стохастичної збіжності (або незбіжності) результатів експерименту; зміст її у тому, щоб з'ясувати як забезпечити збіжність, якщо випадковий розкид у результатах дуже великий;

2) проблема великої кількості факторів. Немає необхідності досліджувати усі їх; потрібно вибрати тільки істотно важливі;

3) проблема багатокомпонентної, багатозначної реакції; результат може бути принципово неоднозначним; пояснення його конкретними причинами, що ускладнюють процес моделювання; важливим моментом у цьому процесі є об-

роблення результатів експерименту, тому що тільки за достовірними результатами можна виявити правильні закономірності.

5.2.5 Оброблення даних імітації

Основними методами оброблення даних імітаційного експерименту є:

- регресійний аналіз (РА);
- дисперсійний аналіз;
- статистична обробка.

Розглянемо деякі теоретичні положення, що дозволяють обробити дані експериментів і правильно інтерпретувати отримані результати моделювання. Основою будь-якого імітаційного експерименту на ЕОМ служить вихідна формалізована модель імітованої системи.

У найбільш загальному виді формалізована модель для більшості систем ґрунтується на концепціях кінцевих автоматів:

$$A = (X, Y, Z, T, P_f, P_g, z_0 \in Z),$$

де X - кінцева безліч вхідних сигналів, кожний елемент якого вектор постійної розмірності; Z - кінцева непуста безліч станів, обумовлених за допомогою вектора станів; Y - кінцева безліч вихідних сигналів; T - частково впорядковане (за відношенням \leq) безліч моментів часу t ; P_f - таблиця умовних функціоналів переходів абстрактного автомата, отримана відповідно до опису модельованого процесу (причому перехід автомата з одного стану до іншого відбувається практично миттєво); P_g - таблиця умовних функціоналів виходів, за допомогою якої описується процес формування вихідних сигналів у ті моменти часу, коли внаслідок надходження вхідного сигналу автомат переходить до нового стану.

Похибка формалізованої моделі у загальному випадку може виявитися досить значною. Але коли вона невідома, то можна йти від найпростіших моделей у бік ускладнення їх у міру необхідності. Критерієм можливості застосування деякого варіанта формалізованої моделі служить її точність і адекватність. Оцінка адекватності, аналіз і обробка результатів моделювання проводяться відповідно до обраної методики з безлічі можливих варіантів. Окремі методики, призначені для зазначеної мети, у деталях можуть відрізнятися один

від одного, але в головних рисах вони повинні відповідати наведеній загальній схемі моделювання.

Регресійний аналіз. Розглянемо на прикладі побудови формалізованої лінійної моделі з наступним переходом до більш складних моделей можливий варіант методики обробки результатів імітаційного експерименту. Нехай, за припущенням, модельованій системі відповідає лінійна модель, що доцільно прийняти за вихідну на першому етапі моделювання:

$$Y = \sum_{i=1}^k A_i x_i, \quad (25)$$

де A_i - деякі параметри модельованої системи; $\{ x_i \}$ - фактори; Y - реакції.

Якби була можливість проводити усі експерименти, то, змінюючи фактор \bar{x}_i у заданому діапазоні значень і спостерігаючи реакцію \bar{Y} , можна було б оцінити досить точно параметр A_i . Однак на практиці кількість експериментальних значень обмежено, тому їх потрібно логічно обґрунтувати, а потім інтерпретувати побудовану модель

$$\bar{Y} = \sum \bar{A}_i x_i, \quad (26)$$

де \bar{A} й \bar{Y} позначають оцінки величин A_i і Y відповідно.

Розглянемо, як варто встановлювати найбільш відповідні значення шуканих параметрів, щоб модель була по можливості більше точною. Для лінійних моделей маємо:

$$\bar{y}_1 = A_0 + A_1 x_1,$$

$$\bar{y}_2 = A_0 + A_1 x_2,$$

.

.

$$\bar{y}_n = A_0 + A_1 x_n.$$

Помилки, що являють собою розбіжність між ідеалізованими значеннями й експериментальними даними, відповідно рівні:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \bar{y}_1 - y_1 = A_0 + A_1 x_1 - y_1, \\ E_2 &= \bar{y}_2 - y_2 = A_0 + A_1 x_2 - y_2, \\ &\dots \\ E_n &= \bar{y}_n - y_n = A_0 + A_1 x_n - y_n. \end{aligned} \right\}$$

Функція (критерій) результуючої середньоквадратичної помилки визначається так:

$$F = E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2 = (A_0 + A_1 x_1 - y_1)^2 + (A_0 + A_1 x_2 - y_2)^2 + \dots + (A_0 + A_1 x_n - y_n)^2 = \sum_{i=1}^n (A_0 + A_1 x_i - y_i)^2. \quad (27)$$

Умова мінімуму (27):

$$\frac{\partial F}{\partial A_0} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial A_1} = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial A_0} &= \frac{\partial}{\partial A_0} \sum_{i=1}^n (A_0 + A_1 x_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial A_0} (A_0 + A_1 x_i - y_i)^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n 2(A_0 + A_1 x_i - y_i) = 2 \left(nA_0 + A_1 \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n y_i \right) = 0. \end{aligned}$$

Аналогічним образом знайдемо

$$A_0 \sum_{i=1}^n x_i + A_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i.$$

Одержимо, таким чином, систему рівнянь, що впливає:

$$\begin{cases} nA_0 + A_1 \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ A_0 \sum_{i=1}^n x_i + A_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{cases}.$$

Її рішення дає наступний результат:

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (28)$$

$$A_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (29)$$

За міру помилки моделі беруть стандартне відхилення, тобто

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (A_0 + A_1 x_i - y_i)^2}{n - 2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (30)$$

Коефіцієнти A_0, A_1 щонайкраще задовольняють умовам мінімуму $F(A_0, A_1)$ помилки, якщо вони перебувають із n систем лінійних алгебраїчних рівнянь із двома невідомими (n — кількість даних експерименту) і зводяться до деяких сталих значень A_{0y}, A_{1y} , що не залежать від n .

Крім лінійних моделей можуть зустрітися моделі більше високих порядків [5]. Наприклад:

- поліноміальні моделі другого порядку:

$$\hat{y} = \sum_{j=0}^k A_j x_j + \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^k A_{jm} x_j x_m; \quad (31)$$

- мультиплікативна регресійна модель:

$$\hat{y} = A_0 (x_1)^{\beta_1} \cdot (x_2)^{\beta_2} \dots (x_k)^{\beta_k};$$

$$\hat{y} = A_0 \prod_{j=1}^k (x_j)^{\beta_j}; \quad (32)$$

- експонентна модель:

$$\hat{y} = \exp(A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + \dots + A_k x_k); \quad (33)$$

- оборотна модель:

$$\hat{y} = \left(A_0 + \sum_{j=0}^k A_j x_j \right)^{-1}. \quad (34)$$

Шляхом відповідних математичних перетворень (апроксимації й т.д.) ці моделі спочатку зводять до лінійних, а потім досліджують.

Дисперсійний аналіз. Для визначення моделі, якій відповідають одержувані під час експерименту дані, досить докладну інформацію дає метод дисперсійного фактора аналізу (ТАК).

Загалом ТАК - це метод, що дозволяє досліджувати питання впливу окремих факторів на реакцію, а також їхній можливий взаємовплив.

У процесі дисперсійного аналізу вибирають яких-небудь два фактори із загальної їхньої безлічі X_1, X_2 . Щоб спростити індексування, уведемо нові позначення M і N . Фізичною сутністю, що відповідає цим факторам, у випадку моделювання інформаційних мереж, можуть бути: M — число джерел повідомлень, N - обсяг переданих повідомлень.

Метод дисперсійного факторного аналізу ґрунтується на припущенні про незалежність факторів, нормальності розподілу значень факторів і реакції, а також на збіжності значень дисперсії реакцій.

З метою з'ясування впливу факторів M_i , N_i розглядають ij варіанти їхніх обраних значень, для кожного з яких визначається безліч значень реакцій \bar{y}_{ij} (i - номер варіантів значень фактора M , j - фактора N). Для цього становлять таблицю наступного виду (табл. 4).

Під y може розумітися інтегрально-пропускна здатність мережі, тоді елементи, зазначені в таблиці, означають наступне: \hat{y} - середнє значення інтегральної пропускної здатності ІМ при i -м варіанті кількості джерел при j - варіанті середнього обсягу переданих повідомлень, \bar{y}_i , - середня за всіма варіантами обсягу повідомлень i за i -м варіантом кількості джерел пропускна здатність ІМ; \bar{y}_j ; - середня за всіма варіантами числа джерела при j -м варіанті обсягу вхідних повідомлень.

Аналізуючи значення різних величин, одержуваних у результаті підрахунку окремих різностей виду $\hat{y} - \bar{y}_i$, $\hat{y} - \bar{y}_{ij}$ й т.п., можна оцінити вплив факторів M і N на значення реакції. Крім того, у принципі може бути визначений і взаємовплив факторів один на одного в моделі, а отже, з певною ймовірністю й у самій системі.

При відсутності взаємодії факторів у моделі середнє за клітинкою табл. 4 може бути виражене через інші середні й деякі допоміжні величини. Такими величинами є так звані ефекти рядків і стовпців.

Таблиця 4 – Вплив факторів M_i і N_i

Можливі варіанти числа джерел повідомлення	Обсяги переданих повідомлень				
	$N(1)$		$N(j)$		$N(k)$
$M(1)$	\bar{y}_{11}	$\bar{y}_{..}$			
				$\bar{y}_{..}$	$\bar{y}_{.k}$
$M(i)$	\bar{y}_{i1}		\bar{y}_{ij}		
$M(l)$	\bar{y}_{l1}		\bar{y}_{lj}		\bar{y}_{lk}

Головним ефектом рядка (стовпця) вважається, зокрема, відхилення загального середнього за рядком \bar{y}_i , - (за стовпцем \bar{y}_j) від середнього за всією таблицею:

$$GE_i = \bar{y}_i - \bar{y} \quad (GE_j = \bar{y}_j - \bar{y}).$$

Якщо взаємодія відсутня, то виконується наступне співвідношення:

$$\bar{y}_{ij} = \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) + (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..}), \quad (35)$$

у протилежному випадку фактори M и N не адитивні, тобто не можуть розглядатися окремо.

Розглянуті принципи оцінки дії двох факторів M і N на реакцію Y й облік їхнього взаємовпливу можуть бути узагальнені й на випадок більшої кількості факторів, однак при цьому природно ускладнюються обчислення їхніх ефектів. Крім того, може ускладнитися сама модель і втратити свою точність і адекватність.

5.3 Оцінка адекватності імітаційних моделей

Визначення критеріїв адекватності істотно впливає на вибір оптимальних варіантів моделей. Оптимальна модель, маючи простоту й ефективністю реалізації, забезпечує необхідну адекватність моделювання. Для того щоб вибір моделі був досить обґрунтованим, необхідно мати можливість обчислення критерію адекватності.

Для розгляду питання скористаємося геометричними аналогіями, що дозволяють вивести розрахункові формули обчислення різних критеріїв.

Нехай у загальному виді вихідна формалізована модель, покладена в основу побудови імітаційної моделі, може бути подана за допомогою рівняння

$$f(x, y, z \dots a, b, c \dots) = 0, \quad (36)$$

де x, y, z - змінні модельованої системи; a, b, c - параметри системи.

У процесі імітаційного моделювання виходить безліч M даних: $M = \{X_M, Y_M, Z_M, \dots A_M, B_M, C_M\}$, причому кожна підмножина змінних $\{X_M\}$, $\{Y_M\}$, $\{Z_M\}$ моделі і її параметрів $\{A_M\}$, $\{B_M\}$, $\{C_M\}$ складається з n числових величин X_{Mi} , Y_{Mi} , Z_{Mi} , для довільно обраних параметрів a_{Mi} , b_{Mi} , c_{Mi} , можна побудувати безліч $\{\Delta\} = \{\Delta x, \Delta y, \Delta z\}$, визначивши кожний елемент його шляхом підрахунку різниці за умови: $y_i = y_{Mi}$, $z_i = z_{Mi}$. У загальному

випадку різниці Δx , Δy , Δz - величини випадкові, що характеризуються відповідними законами розподілу, щільностями ймовірності й числових характеристик.

Маючи у своєму розпорядженні достатній набір елементів безлічі різниць, неважко одержати середньоквадратичні значення й знайти математичні очікування цих випадкових величин:

$$M[\Delta] = \sum_{i=1}^n \Delta_i / n; \quad \sigma[\Delta] = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2} / n.$$

За характеристику точності T_1 , T_2 загального виду імітаційної моделі M при обраних параметрах A_H , B_M , C_M можна взяти величину, пропорційну різниці між обсягом V_1 (рис. 8, а) N -мірної фігури, що має як аналітичне відображення в області N змінних вихідна формалізована модель $f(x, y, z..a, b, c..)$, і обсягом V_2 подібної фігури, в аналітичному вираженні якої замість вихідних змінних узяті аргументи зі збільшеннями $M[\Delta]$ або $\sigma[\Delta]$, тобто

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = |V_{21} - V_{11}| = \int_D |f(x, y, z..a, b, c..) - f(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)| dv \\ T_2 = |V_{22} - V_{21}| = \int_D |f(x, y, z..a, b, c..) - f(x + \sigma x, y + \sigma y, z + \sigma z)| dv \end{array} \right\}. \quad (37)$$

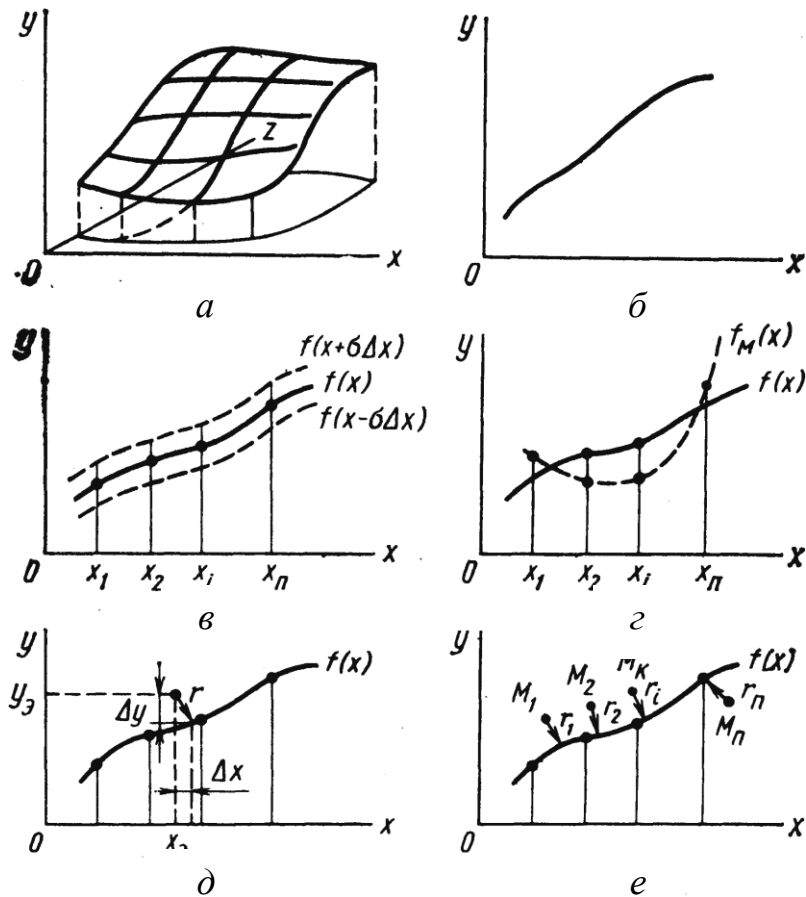
Для найпростішого випадку формалізована модель подається у вигляді функції в однієї змінної x (рис. 8, б) і відповідного набору параметрів a_m , а точність оцінюється відхиленнями Δ_i (рис. 8, а).

Використання тільки характеристики точності імітаційних моделей як критерій вибору оптимального варіанта часто недостатньо. Дуже важливо знати про те, наскільки збігаються в принципі результати аналітичних розрахунків за математичною моделлю й результати імітаційного моделювання, тобто визначити збіжність імітаційної моделі.

Як і при обчисленні точності моделі, розроблювачі мають у своєму розпорядженні безліч даних у значеннях змінних і параметрів, одержуваних у результаті імітації.

Апроксимуючи ці дані найбільш відповідними теоретичними співвідношеннями, можна побудувати набір формалізованих моделей $\{\varphi_M(x, y, z..a, b, c..)\}$, збіжність, моделі при цьому буде характеризувати повторення або не повторення вихідної закономірності.

Наочна ілюстрація цього подана на рис. 8, м для тієї ж вихідної моделі, що й на рис. 8, б.



a — тривимірне завдання для $M(1, 2, \dots, a, b, c) = 0$; *б* — одномірний аналог при $r = r_M$; *в* — вибір формалізованої моделі; *г* — незбіжність моделей; *д* — оцінка адекватності окремого результату; *е* — оцінка адекватності моделі по ряду експериментальних результатів

Рисунок 8 – Постановка типового завдання моделювання

Типове завдання моделювання. Однією з найважливіших умов оцінки точності, збіжності й адекватності моделі є завдання або формулювання так званого типового завдання (рис. 9). Зміст її полягає в тому, що для будь-якої досліджуваної системи завжди можна зазначити безліч вхідних X і вихідних змінних Y , безліч параметрів внутрішніх θ_{BT} і зовнішніх $\theta_{EШ}$, стосовно яких формулюється завдання, тобто задається безліч вихідних даних і вказуються параметри й змінному, підлягаючому визначенню. При рішенні завдання використовується також ряд співвідношень, що характеризують зв'язки між зазначеними параметрами й змінними. Покладається також, що завдання коректне й має рішення. Особливістю імітаційного моделювання є те, що, як правило, аналітичне

рішення завдання або принципово неможливо, або дуже складно й зв'язано зі значними спрощеннями й більшими неточностями.

Розглядаючи адекватність різних імітаційних моделей, призначених для рішення досліджуваної системи, необхідно умовитися про те, що в процесі моделювання до моделі не вводять нових параметрів і змінних, які не втримувалися в умові типового завдання, навіть якщо така процедура має на меті більш об'єктивно відобразити процеси. Інакше кажучи, необхідно, щоб при моделюванні не мінялися умови завдання дослідження системи.

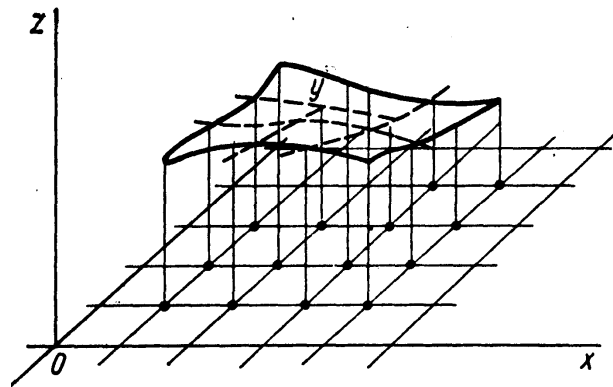


Рисунок 9 - До питань оцінки характеристики адекватності моделі

Точність і збіжність характеризують якість моделі в рамках вихідного математичного опису модельованої системи за умови, що воно є, або за умови формулювання типового завдання. При цьому точно не можна сказати, наскільки результати процесу імітації будуть збігатися із практичними значеннями спостережуваних змінних і параметрів.

Для відповіді на дані питання, як відомо, використовують таку характеристику моделі, як вірогідність або адекватність.

Якщо про конкретно досліджувану систему не має точних експериментальних даних, то адекватність визначити практично неможливо й, отже, вибір варіанта моделі має бути виконаний за характеристиками точності й збіжності. Мінімальною інформацією про систему будуть експериментальні дані, що визначають деяку точку в просторі відображення модельованої системи. У цьому випадку адекватність моделей можна оцінити відстанню r даної точки від поверхні фігури (для багатомірної моделі) або від лінії, що задається вихідною математичною моделлю $y = f(x)$ (див. рис. 8, д) для одномірного випадку.

Аналогічно можна підійти до оцінки адекватності моделі, коли є невелике число (3...5...5) експериментальних крапок (див. рис. 8, е). Це пов'язане з тим, що при невеликому числі експериментальних даних ще слабо виражається та або інша закономірність процесів, що відбуваються в досліджуваній системі.

При зростанні числа точок, що відповідають даним натурального експерименту із системою, закономірність починає проявлятися більшою мірою й може бути виражена відповідним аналітичним вираженням. Тоді при оцінці адекватності необхідно врахувати збіжність імітаційної моделі до цього аналітичного вираження, тобто розглядати адекватність як комплексне значення, що складається з характеристики точності й збіжності.

Розглядаючи завдання вибору оптимального варіанта імітаційної моделі, необхідно знати також і таку характеристику, як ефективність, що визначається, з одного боку, результатами імітації, з іншого боку - складністю цього процесу, і залежить у свою чергу від використовуваних алгоритмів, складу програмних засобів і витрат на їхню реалізацію.

5.4 Метод групового обліку аргументів

Методи регресійного й дисперсійного аналізу, розглянуті вище або ґрунтуються на прийнятому дослідником вихідному математичному описі, або мають за мету побудувати адекватний опис за даними імітаційного експерименту. У кожному із цих випадків наявні дані й одержувані результати інтерпретуються самим дослідником, що може внести до процесу моделювання істотний суб'єктивний фактор. Як виключити або, принаймні, звести до мінімуму вплив цього фактора? Очевидно, основний принцип, який можна застосувати у рішенні даної проблеми, - надати моделюючій системі (ЕОМ) широкі можливості вибору варіантів математичного опису (селекції їх), забезпечити настроювання моделюючих алгоритмів на реальні особливості модельованої системи.

Існує метод, що реалізує даний принцип, який називається методом групового обліку аргументів (МГОА). Він одержує широке поширення у системах автоматизованого моделювання складних систем.

Так само, як регресійний і дисперсійний методи аналізу, МГОА ґрунтується на результатах обробки даних експериментів. Однак принципова відмінність його від інших методів полягає в тому, що він застосовується для цілей

селекції моделей, оптимальних відносно адекватності й можливості найбільше точно пророкувати поведження модельованої системи у майбутньому [1].

Загалом схема моделювання відповідно до МГОА може бути описана у такий спосіб.

Нехай передбачається, що загальний формалізований опис моделі має вигляд: $\varphi = f(x_1, x_2, \dots, x_k, x_n)$. Виконується селекція, у ході якої загальний опис заміняється декількома рядами окремих описів. Утворюються ряди селекції. Перший ряд селекції складається з функції від двох факторів x_1, x_k :

$$y_1 = f(x_1, x_2), \quad y_2 = f(x_1, x_3) \quad \dots, \quad y_s = f(x_{n-1}, x_n). \quad (38)$$

де $s = C_n^2$ — число можливих пар факторів із загального числа n .

Потім будуються при необхідності підвищення адекватності моделі другий і наступний ряди селекції. Другий ряд утвориться з пар моделей першого ряду:

$$y_1 = f(x_1, x_2), \quad y_2 = f(x_1, x_3) \quad \dots, \quad y_s = f(x_{n-1}, x_n). \quad (39)$$

Процес триває доти, поки не буде знайдена оптимальна за змістом адекватності модель, причому вона виходить побудованою з мінімальною участю людини, що у цьому випадку може служити джерелом суб'єктивних погрішностей.

Якщо при цьому критерієм служить адекватність моделі й точність пророкування поведження модельованої системи при доцільному ступені складності, то можна вважати, що при побудові моделі враховуються самі істотні вимоги практики.

6 МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Розглянемо загальні положення теорії оптимізації складних об'єктів і систем із застосуванням їхніх моделей. Одним з основних призначень моделей є встановлення зв'язку між змінними параметрами системи або процесу й цільовою функцією, що підлягає дослідженню на пошук екстремумів при заданих обмеженнях і обраних критеріях оптимізації.

Якщо є формалізована модель системи, що утворюється за допомогою наступного співвідношення загального виду:

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k, x_n),$$

де y_i - вихідні змінні, змінні стани \dots , x_k - вхідні змінні, змінні управління ($k = 1, 2, \dots, n$), то цільова функція (ЦФ) також залежить від цих змінних і має так звану F -форму ЦФ:

$$F = F(y_1, y_2, \dots, y_m; x_1, x_2, \dots, x_n).$$

При відомій моделі від F -форми ЦФ можна перейти до так званої G -форми, виключивши з її $\{y_m\}$: $G = G(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Аналогічним чином з функції обмеження R_p можна виключити змінні y_i .

$$R_p(y_1, y_2, \dots, y_m; x_1, x_2, \dots, x_n) = Q_p(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Після цього завдання оптимізації зводиться до дослідження цільової функції на пошук екстремумів: $Q = Q(x_1, x_2, \dots, x_n)$, при обмеженнях $G_p(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

6.1 Цільові функції оптимізації

При рішенні завдання оптимізації важливо визначити основні принципи завдання цільових функцій. Серед них основними є наступні.

1 *Принцип однозначності*, який полягає в тому, що в рамках одного завдання повинна оптимізуватися одна й тільки одна цільова функція. Для цього необхідно, щоб набір окремих складових p_1 і p_2 загальної цільової функції F набув виду:

$$F = A_1 p_1 + A_2 p_2,$$

де A_1 й A_2 — вагомні коефіцієнти.

Якщо одна функція p_1 повинна максимізуватися, а інша p_2 мінімізуватися, то доцільно одну з них замінити на зворотну $\mathcal{G} = 1/p_1$, щоб при оптимізації шукати загальний максимум.

2 *Принцип відповідності*, який полягає в такому виборі, щоб оптимізація цільової функції забезпечувала найкращі результати, тобто впливала істотно на результат.

3 *Принцип модифікації*, який означає, що цільова функція має бути виражена через змінні, що піддаються цілеспрямованому впливу й зміні.

4 *Принцип відповідної форми*, відповідно до якого функції, які мають розриви, локальні екстремуми й неоднозначності, є небажаними для вибору їх як цільові функції. Найпоширенішими видами цільових функцій є:

ЦФ економічної ефективності (прибутку):

$$F = \sum_i v_i \prod_i,$$

де v_i - коефіцієнт ефективності i -го компонента процесу (системи); \prod_i - i -й позитивний ефект процесу; W_j - вартість j -го ресурсу; R_j - витрата j -го ресурсу.

ЦФ вартості:

$$F = \sum_i W_i(I_i),$$

де W_i - вартість одержання результату i -го виходу; для ІМ I - кількість інформації з i -му виходу.

ЦФ якості:

$$F = \sum_i A_i (\bar{Y}_j - y_i)^2,$$

де A_i - позитивні вагові коефіцієнти; \bar{Y}_j - настановні значення змінні ста-ни.

При оптимізації більшу роль грають обмеження, серед яких розрізняють наступні види:

- тверді обмеження на змінні управління, загальна форма яких може бути виражена нерівностями: $x_i \geq R_{in}$; $x_i \leq R_{in}$;

- нежорсткі обмеження на змінні управління, що враховуються непрямим чином через так звану функцію штрафу: $p_i = k_i(x_i / R_{iB})$, де k_i , M - позитивні

числа; R_{iB} — величина обмеження; можливий та інший вид функції штрафу:

$$P_2 = k_i \exp[M(x_i - R_{iB})];$$

- обмеження на змінні стани й змінні управління, виражені як функції змінних управління (умови обмежень):

$$S_p(y_1, y_2, \dots, y_m; x_1, x_2, \dots, x_n) \leq S_{pB};$$

$$S_p(y_1, y_2, \dots, y_m; x_1, x_2, \dots, x_n) \leq S_{pH}.$$

Модель дозволяє звести ці умови до такого виду, що обмеження будуть задані тільки у вигляді функцій змінних управління:

$$R_p(x_1, x_2, \dots, x_n; z_p) = 0,$$

де z_p - допоміжна змінна.

Співвідношення, розглянуті вище й використовувані при рішенні оптимізаційних завдань, показують основний зміст і призначення моделей досліджуваних процесів. Вони також дають можливість правильно ідентифікувати різні інформаційні параметри й величини; здійснювати постановку завдань моделювання й установлення зв'язків між різними змінними; вибрати й обґрунтувати критерії оптимізації, визначити цільові функції; задати обмеження; здійснити постановку оптимізаційного завдання й попередньо оцінити адекватність розроблювальної моделі.

6.2 Типові завдання оптимізації

Простим окремим випадком класичних оптимізаційних завдань є завдання на пошук екстремумів нелінійної цільової функції. Подібне завдання розглядалося у п.1. Якщо, для двох пар змінних стану й управління цільова функція має вигляд

$$F = F(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{Y}_1, \bar{Y}_2, X_1, X_2, Y_1, Y_2),$$

де \bar{X}_1, \bar{X}_2 й \bar{Y}_1, \bar{Y}_2 - координати оптимуму, те переходячи звичайним чином від подання цільової функції у вигляді F – форми до G – форми, можна вивести умови, при яких буде забезпечуватися її максимум (або мінімум). Причому вони обов'язково є, оскільки екстремальні крапки у функції існують.

Умовою максимуму є:

$$\left[Gx_1x_1Gx_2x_2 - (Gx_1x_2)^2 \right] > 0; \quad Gx_1x_1 < 0; \quad Gx_2x_2 < 0,$$

де $G_{x_1x_1}$, $G_{x_2x_2}$ — друга частинна похідна відповідно від x_1 і по x_2 ; $G_{x_1x_2}$ — змішана частинна похідна.

Для мінімуму умова $G(\bar{X}_1\bar{X}_2X_1X_2)$ відповідно має вигляд

$$\left[G_{x_1x_1}G_{x_2x_2} - (G_{x_1x_2})^2\right] > 0; \quad G_{x_1x_1} < 0; \quad G_{x_2x_2} < 0.$$

Часто в теорії оптимізації зустрічаються завдання на оптимізацію нелінійної цільової функції з нелінійними обмеженнями. Для знаходження оптимальних значень, за якими проводиться оптимізація, застосовується метод множників Лагранжа.

Аналіз змісту завдання даного типу приводить до наступних співвідношень: цільова функція може бути подана як сума її деякого приватного виду $F(x, y)$, що відповідає мінімальному значенню, отриманому в процесі оптимізації при відсутності обмежень, і функції обмежень $H(X, Y)$, узятій з деяким множником λ :

$$\tilde{F} = F(x, y) + \lambda H(x, y).$$

У випадку, коли задано m обмежень, цільова функція має вигляд:

$$\tilde{F} = F(x, y) + \sum_{k=1}^m \lambda_k H_k,$$

а умови оптимуму становлять систему наступних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \tilde{F}}{\partial x_1} &= \frac{\partial F}{\partial x_1} + \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial H_k}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial \tilde{F}}{\partial x_2} &= \frac{\partial F}{\partial x_2} + \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial H_k}{\partial x_2} = 0 \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{\partial \tilde{F}}{\partial x_n} &= \frac{\partial F}{\partial x_n} + \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial H_k}{\partial x_n} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Більшу групу оптимізаційних завдань становлять завдання лінійного програмування. Лінійні моделі у відсутності обмежень не мають кінцевих значень змінних, визначальний мінімум або максимум цільових функцій. Сукупність деякого числа лінійних обмежень визначає в n -мірному виробництві відповідний опуклий багатогранник, вершинами якого є координати $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Будь-яке вираження виду $k_{i1}x_1 + k_{i2}x_2 + \dots + k_{in}x_n = Q_i$ визначає гіперплощина x -мерного простору. При m числі обмежень утвориться m

гіперплощин, причому перетинання будь-яких двох з них дає в перетині деякий багатогранник (рис. 10).

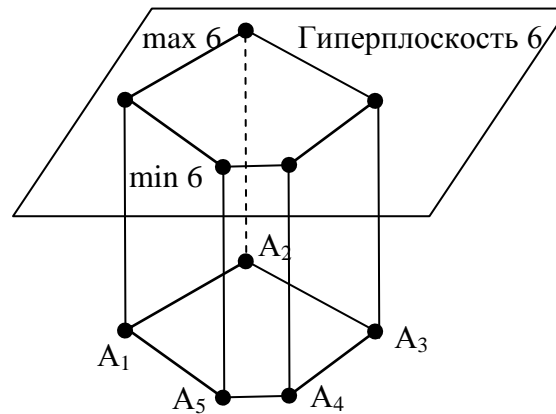


Рисунок 10 - Лінійне програмування й симплекс-метод

Рішення завдань подібного типу проводиться за допомогою так званого *симплексного методу*, сутність якого полягає у знаходженні координат однієї з вершин і наступному спрямованому русі по ребрах багатогранника, отриманого у результаті перетинання x -мерного опуклого багатогранника з гіперплощиною виду

$$G = A_1x_1 + A_2x_2 + \dots + A_mx_m. \quad (41)$$

Рух повинен проводитися тільки або убік зменшення значення цільової функції при її мінімізації, або убік збільшення при пошуку максимуму.

Серед інших класичних завдань оптимізації велике місце посідають завдання, розв'язувані із застосуванням методів варіаційного обчислення й динамічного програмування.

6.3 Критерії й обмеження у завданнях оптимізації ІМ

Розглянуті положення класичної теорії оптимізації лінійного й динамічного програмування є основою для постановки й вибору методів рішення завдань оптимізації ІМ. Принципово можлива постановка нескінченної безлічі оптимізаційних завдань і їхніх модифікацій, розглянутих щодо різноманітних критеріїв, змінних і характеристик інформаційних мереж.

Як критерій часто виступає *повна вартість* мережі W .

Для лінійної моделі вартості отримане співвідношення, що визначає оптимальне значення пропускної здатності каналів ІМ, у той час як для нелінійної

моделі (увігнутої функції) вартості рішення оптимізаційного завдання часто дає кілька локальних мінімумів, що значно ускладнює рішення завдань оптимізації ІМ. Одним з розглянутих критеріїв оптимізації ІМ є *надійність* інформаційної мережі.

Надійність мережі визначається як здатність забезпечувати нормальний зв'язок між усіма діючими парами вузлів, хоча б одним шляхом. При проектуванні може бути поставлена вимога про необхідність зв'язку між будь-якими парами вузлів за двома і більше незалежними шляхами. Таким чином, кількісним показником надійності, необхідним для оптимізації ІМ, у цих випадках може служити середня частка пар вузлів, між якими зв'язок стає неможливим через ушкодження вузлів або ліній. Для розрахунку цього показника потрібно знати або оцінити інтенсивність відмов елементів, потоки відмов і відновлень окремих ліній і вузлів ІМ.

При постановці оптимізаційного завдання встановлюються обмеження, обумовлені фізичною сутністю процесів, що протікають у досліджуваній мережі, економічними вимогами й іншими конкретними особливостями, наприклад надійністю й ефективністю функціонування елементів.

Інтерес викликають лише деякі з них, наприклад: характеристики топологічних структур ІМ - безліч вузлів N і безліч зв'язків між ними M ; пропускні здатності каналів зв'язку, причому кожному зв'язку (дузі) відповідає пропускна здатність C_i . Це найчастіше дискретна, а рідше безперервна змінна. Кожному значенню C_i буде відповідати вартість W_i .

Відомі дві моделі, що встановлюють взаємозв'язки W і Z (рис. 11): лінійна $W_i = kC_i$ й статична (увігнута) і $W_i = kC_i^{ai}$. Вартість каналів також є або безперервної, або дискретною величиною. Загальна вартість мережі

$$W = \sum_i^M W_i(C_i)$$

часто фігурує як змінна в завданнях оптимізації ІМ.

Загальноприйнятим критерієм, що оцінює якість функціонування, є середня затримка повідомлень T :

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^{N \cdot M} \lambda_i (T_i + T_{zi} + T_{oi}),$$

де $\gamma = \sum_i \sum_{\gamma} \gamma_{ij}$ - загальна пропускна здатність мережі; λ_i - частота появи повідомлень у i -м каналі; T_i - середній час на передачу повідомлень плюс час очікування для i -го каналу; T_{zi} - час затримки проходження повідомлень по i -му каналі; T_{0i} - час обробки у вузлі, розташованому за i -м каналом.

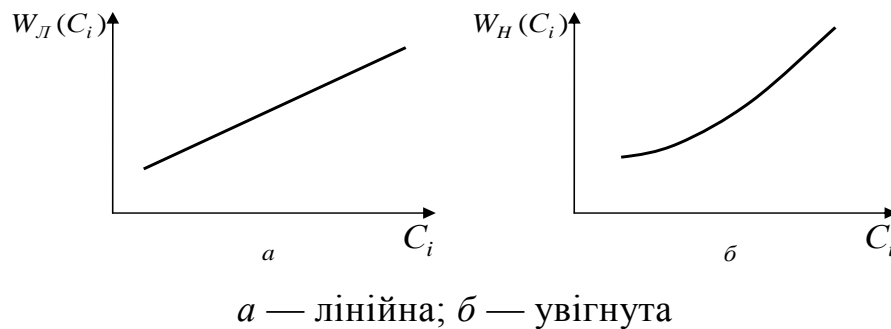


Рисунок 11 - Види аналітичних залежностей для моделей вартості каналів зв'язку ІМ у функції від пропускної здатності

Серед обмежень, що мають місце у завданнях оптимізації ІМ, зазначаються наступні.

1 Обмеження на потік. При збереженні потоку у вузлах для кожної сукупності (i, j) дуг не має бути втрат і розсіювання його на цих дугах, тобто

$$\sum_{i=1}^{N \cdot M} f_{jl}(k, l) - \sum_{i=1}^{N \cdot M} f_{ij}(l, i) = \begin{cases} -\delta_{kl}, & \text{если } i = k; \\ +\delta_{kl}, & \text{если } i = l; \\ 0 - \text{в } \text{остальном}. \end{cases}$$

2 Обмеження на пропускну здатність каналів зв'язку, що виражає реальна властивість передавати обмежена кількість інформації за одиницю часу:

$$f_i = C_i; \quad i = 1, \dots, NM.$$

3 Обмеження на вартості визначається кінцевими фінансовими ресурсами, виділюваними на створення мережі (планований бюджет):

$$W \leq W_{\max}.$$

4 Обмеження на затримку передачі повідомлень. Фактор затримки може бути визначений фізичними причинами. Припустима затримка пов'язана з тим, що несвоєчасна інформація може втратити практичну цінність, а, отже, мережа не забезпечує виконання заданих функцій. Таким чином, повинна виконуватися умова: $T \leq T_{\max}$.

5 Обмеження на топологію мережі. Як відзначалося, з одного боку, мережа повинна мати n – зв'язність із міркувань заданої надійності, а з іншого боку - максимальний порядок вузла, тобто число приєднаних до нього каналів не може бути більше деякої припустимої величини.

6.4 Основні завдання оптимізації ІМ

Розглянемо деякі типові варіанти оптимізаційних завдань, пов'язаних з топологічним проектуванням ІМ. Можлива наступна їхня класифікація [6].

1 Вибір оптимальної пропускної здатності (ВСП).

Дано: топологія мережі, потоки, маршрути. *Потрібно:* мінімізувати затримки T за змінною пропускною здатністю каналів C_i при обмеженнях на вартість W і пропускні здатності C_i :

$$W = \sum_{i=1}^{NM} W_i(C_i) \leq W_{\max}; \quad C_i \geq f_i.$$

2 Розподіл потоку.

Дано: топологія мережі, потоки, пропускні здатності каналів. *Потрібно:* мінімізувати T за змінною «маршрут руху» при заданих обмеженнях на потоки.

3 *Оптимальний розподіл потоків і одночасно вибір пропускних здатностей.*

Дано: топологія мережі, потоки. *Потрібно:* мінімізувати W за змінними «маршрут» і «пропускна здатність» ін. і заданих обмеженнях на потік і час затримки.

4 Визначення оптимальної топології мережі.

Дано: характеристики трафіка ІМ. *Потрібно:* мінімізувати за змінними «топология», «маршрут» і «пропускна здатність» при обмеженнях на потік, затримку й топологію.

Розглянемо завдання оптимізації пропускних здатностей ліній. Висока пропускна здатність ліній приводить до збільшення витрат, а при малій відбуваються перевантаження й затримки повідомлень. Співвідношення між вартістю й пропускною здатністю ліній має вигляд

$$W = \sum_i W_i(C_i),$$

де W - повна вартість ліній; W_i - вартісний коефіцієнт для i -лінії; C_i - пропускна здатність i -лінії.

Значення W_i нерівні, тому що лінії мають різні довжини. Зокрема, співвідношення між вартістю й пропускною здатністю може бути задано законом

$$W = \sum_i W_i C_i^2.$$

Середня затримка для i -й лінії задається часом очікування у черзі при допущеннях, що довжина повідомлень має експонентний розподіл:

$$T_i = 1/(\mu C_i - \lambda_i),$$

де λ_i — інтенсивність потоку повідомлень у i -м каналі; $1/\mu$ — середня довжина повідомлень (у бітах).

Середнє значення затримки за всіма складовими виходить шляхом усереднення значення T_i взятого з ваговими коефіцієнтами λ_i/γ , де γ - сумарна швидкість надходження повідомлень. Таким чином, середня затримка T при цьому визначається вираженням

$$T = \sum_i \frac{\lambda_i}{\gamma} \left(\frac{1}{\mu C_i - \lambda_i} \right). \quad (42)$$

Шукані пропускні здатності, які мінімізують T при постійному W , визначаються методом невизначених множників Лагранжа. Опускаючи відповідні математичні перетворення, наведемо результат у готовому виді:

$$C_i = \frac{\lambda_i}{\mu} + \frac{W_e}{W_i} \frac{\sqrt{\lambda_i W_i}}{\sum_i \sqrt{\lambda_i W_i}}, \quad (43)$$

де W_e — визначається вираженням

$$W_e = W - \sum_i \frac{\lambda_i W_i}{\mu}.$$

Перший доданок λ_i/μ , у правій частині формули для C_i - пропускна здатність лінії у режимі насичення, а другий доданок - додаткова пропускна здатність цієї лінії.

Величина результуючої транзитної затримки при передачі по лініях із пропускними здатностями C_i вищенаведеними рівностями, що задаються (43), визначається так:

$$T_{\min} = \frac{n}{\mu W_e} \left(\sum_i \sqrt{\frac{\lambda_i W_i}{\lambda}} \right), \quad (44)$$

де λ - сума інтенсивностей трафіка λ_i по всіх лініях.

Розглянуте завдання дозволяє при заданому обмеженні на вартість каналів зв'язку так вибрати пропускні здатності, щоб середня затримка повідомлень були мінімальною.

До числа оптимізаційних завдань синтезу ІМ ставиться завдання розподілу потоків. У попереднім завданні вибирали пропускні здатності каналів при заданій конфігурації потоків. У даному завданні пропускні здатності задані, а потоки треба розподілити так, щоб мінімізувати середню затримку T . Передбачається, що всі пропускні здатності задовольняють вимогам трафіка, а процедури вибору шляхи фіксовані й однозначні.

Як вихідне вираження для рішення завдання використаємо наведену вище формулу. У цьому випадку завдання оптимального розподілу потоків являє собою мінімізацію нелінійної функції T за потоками $\{\lambda_i\}$ при умовах виконання закону збереження потоків у кожному вузлі.

Відповідно до цього закону сумарний трафік $(j - k)$, що надходить у вузол n , дорівнює сумарному трафіку $(j - k)$, що виходить із вузла, за винятком випадків, коли вузол $u = k$; є вузлом-джерелом або при $n = k$ - вузлом призначення. На пропускні здатності накладаються обмеження, що складаються в тім, що потік λ_i / μ у каналі i не має бути негативним й меншим пропускної здатності, тобто $0 \leq \lambda_i / \mu < C$.

Виявляється, що при цих умовах і обмеженнях T є опукла функція потоків, а безліч реалізованих потоків зображується математичною моделлю у вигляді опуклого багатогранника в N -мірному просторі параметрів потоків. Розглянуте завдання вирішується симплексом-методом, що згадувався вище. Якщо вона має реалізоване рішення, то будь-який локальний мінімум є глобальним мінімумом для T .

Часто при оптимізації ІМ використовується метод відхилення потоку (ОП), суть якого полягає в знаходженні вартості мережі для значень «довжин» i - х ребер. Значення довжин ребер задаються вираженням

$$l_i = \frac{\partial T}{\partial \left(\frac{\lambda_i}{\mu} \right)} = \frac{C_i}{\gamma \left[C_i - \left(\frac{\lambda_i}{\mu} \right) \right]^2}, \quad (45)$$

при цьому потік у каналі дорівнює λ_i/μ . Такі «довжини» або «вартісні коефіцієнти», що відповідають їм, використовують для формулювання завдання відшукування потоків по найкоротшими шляхами і з'ясування питання про те, яка частина вихідного потоку має бути відхилена. Процес рішення циклічно повторюється доти, поки не будуть отримані прийнятні значення T_3 . Оптимальний алгоритм ОП дає мінімальне значення T - середню затримку повідомлення в мережі.

6.5 Методи оптимізації

6.5.1 Неаналітичні методи оптимізації

Найбільш необхідні спеціальні методи аналізу, синтезу й оптимізації при побудові топологічних структур, що забезпечують необхідну надійність мережі. Для розрахунку цієї характеристики необхідно знати або мати можливість оцінювати інтенсивність відмов усіх елементів, що входять до мережі.

Детальний аналіз надійності містить у собі облік відмов елементів, вплив їх на вимоги, пов'язані з характеристиками потоків, стратегії розподілу потоків по лініях, припустимі затримки й інші істотні показники мережі. При такому аналізі робиться обчислення математичного очікування пропускових здатностей неушкоджених частин всієї мережі.

Чисто аналітичні способи аналізу незастосовні до великих мереж через великий обсяг обчислень, за винятком, може, обчислень для мереж з деревоподібною структурою. Тому при знаходженні оцінок імовірнісних параметрів широко застосовуються методи статистичного моделювання.

Розглянемо приклад завдання аналізу характеристик надійності мережі, що складається з вузлів і галузей. Імовірність виходу з ладу кожного елемента дорівнює p . Потрібно оцінити або $h(p)$ – імовірність порушення з'єднань у мережі через ушкодження компонентів, або математичне очікування для p значень числа пара вузлів, між якими неможливо здійснити зв'язок.

Існує три способи рішення цього завдання.

Перший спосіб називається примітивним і полягає в наступному. Моделюванням для кожного елемента одержують деяке випадкове число. Якщо воно менше p , то один з елементів вважається ушкодженим і вилучається з мережі,

потім мережа перевіряється на зв'язність і визначається кількість незв'язаних у цьому випадку пар вузлів. Обчислення повторюються багаторазово, що необхідно для одержання досить точної оцінки для кожного з k значень h .

Другий спосіб називається способом функціонального моделювання. У ньому, як і в примітивному способі, для кожного елемента одержують деяке випадкове число. Елементи й відповідні числа групують за парами, причому числа розміщуються у порядку убуття ($r_{i_1}, r_{i_2}, \dots, r_{i_{N+B}}$ - зазначені випадкові значення, i - номер елемента). Відповідно до примітивного методу, якщо $r_{i_k} \geq p \geq r_{i_{k+1}}$, необхідно проаналізувати на зв'язність підсіть, яка складається з елементів i_1, \dots, i_k . При цьому значення зв'язності й показника надійності може бути знайдене для кожного значення p за допомогою наступної процедури: при $1 \geq p > r_{i_1}$ мережа не містить несправних вузлів або галузей; при $r_{i_1} \geq p > r_{i_2}$ мережа складається з елементів i_1, i_2 і т.д.

Таким способом можна скористатися для «корекції» результатів у процесі аналізу заданої мережі при введенні до неї додаткових резервних елементів. Щодо цього він ефективний і дає можливість вирішувати завдання синтезу мереж при введенні нових компонентів до структури з номером від i_1 до i_{N+B} . Одночасно можна виконати аналіз підмереж, складених з $i_1 \dots i_k$, і, для $k = 1, 2, \dots, B$. Зокрема, можна визначити $h(p)$ або $n(p)$ відразу для ряду значень p , використовуючи алгоритм зв'язності один раз для кожної точки вибору.

Третій спосіб – метод Мура-Шеннона, заснований на застосуванні наступних співвідношень для $h(p)$ і $n(p)$:

$$h(p) = \sum_{k=0}^{N+B} C(k) p^{N+B-k} q^k, \quad (46)$$

$$n(p) = \sum_{k=0}^{N+B} D(k) p^{N+B-k} q^k, \quad (47)$$

де $q = 1 - p$ - імовірність безвідмовної роботи елемента ІМ, а $C(k)$ - число незв'язаних підмереж, що містять рівну кількість N елементів, і $D(k)$ - середнє число пар вузлів, не зв'язаних між собою у всіх підмережах, що містять рівну кількість A елементів.

$C(k)$ і $D(k)$ перебувають за допомогою моделювання, тому що всі $C(k)$ й $D(k)$, крім $k = B - N + 2$, відомі заздалегідь. Є C_k^B підмереж, що містять рів-

ну кількість k елементів. Для малих k $C(k)$ і $D(k)$ можна знайти шляхом простого перерахування.

6.5.2 Евристичні методи оптимізації

Розглянемо зміст деяких спеціальних методів, застосовуваних у процесі оптимізації топології ІМ. Для їхньої реалізації необхідно мати обчислювальну систему з більшими ресурсами пам'яті й швидкодією, на базі якої будується система автоматизації топологічного проектування.

Оптимізація топології з використанням евристичних методів виробляється за алгоритмом, що ґрунтується на методі усунення ребер (МУР). Відповідно до цього алгоритму:

- 1) вибирають вихідну топологію (часто на практиці вибирають повнозв'язну мережу);
- 2) для кожного каналу, заданого у вихідній топології, проводять статичну апроксимацію вартості: $W = \sum W_i C_i^\alpha$, $0 \leq \alpha \leq 1$;
- 3) розглянутими методами вирішують спільне завдання вибору пропускних здатностей і розподілу потоків;
- 4) задаються дискретними змінами безперервних пропускних здатностей, отриманих з рішення завдання;
- 5) проводять оптимізацію потоків шляхом застосування алгоритму обмеження потоків;
- 6) повторюють п. 3 і 5 для ряду реалізованих початкових потоків;
- 7) при необхідності повторюють п. 1...6 для декількох початкових топологій.

При постановці завдання задають загальне число вузлів, їхнього місця розташування, а в процесі рішення оцінюють характеристики мереж за багатьма варіантами вибору ліній зв'язку між вузлами [6]. Вони формуються шляхом змін вихідних топологічних структур.

На рис. 12 наведена загальна схема алгоритму автоматизованого топологічного проектування із застосуванням ЕОМ. У блоці A генеруються початкові конфігурації, які проходять топологічну перевірку у блоці B . Приймаються рішення про подальші локальні виправлення, за якими іде певна послідовність тестів для пошуку найкращої конфігурації.

Для обраних маршрутів і заданих пропускних здатностей ліній оцінюються транзитні затримки, причому трафік пропорційно збільшується доти, поки максимальна затримка не досягне певного припустимого значення $T_{тп}$. У блоці P с обліком річної вартості ліній, що відносять до загального трафіку, підраховується міра економічності, що дорівнює найкращим значенням, отриманим раніше. Закінчення процесу оптимізації визначається часом, відведеним для розрахунків.

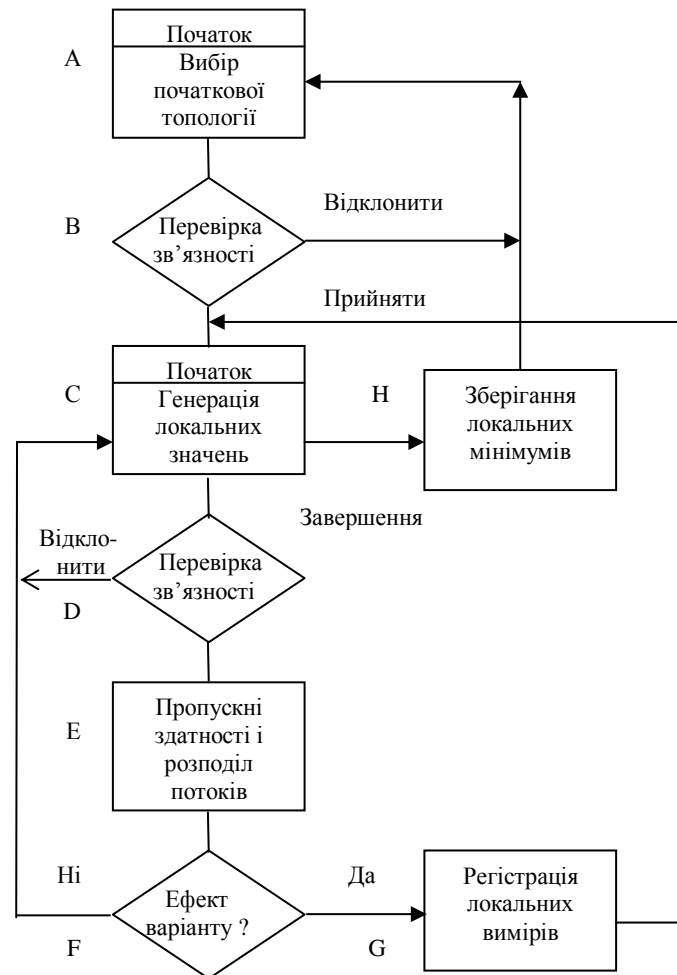


Рисунок 12 - Структурна схема процедури автоматичного топологічного проектування

Топологічне проектування, і особливо оптимізація мереж, є, як видно з наведених прикладів, складним завданням. Загальних методів її рішення, очевидно, не може бути знайдено, хоча існують різні приватні рішення, засновані на певних допущеннях. У ході рішень широко застосовується обчислювальна техніка, причому можуть знадобитися дуже значні обчислювальні ресурси, які розроблювач не завжди має. Тому застосовують неформалізовані евристичні

алгоритми й процедури, отримані шляхом творчого пошуку, інтуїції й досвіду дослідника. Серед відомих евристичних методів можна вказати прийом, який полягає в тому, що інформаційні потоки між парами абонентів мережі направляються найменш завантаженими шляхами з мінімальним числом проміжних вузлів. Такий прийом, як правило, дає результат, що небагато відрізняється від оптимального рішення, одержуваного методами цілочисленого програмування.

Відома також процедура розподілу потоків, що може бути виконана відповідно до методу насичення перетину. Він полягає у наступному (рис. 13). Спочатку шляхами з мінімальним числом вузлів одночасно направляються максимально можливі для всіх пар вузлів потоки. Ці шляхи для кожної пари є «найкоротшими шляхами». «Насичені» лінії v_i, v_k (рис. 13, а), що визначають найкоротші шляхи, зі схеми мережі виключаються, а потоки направляються за лініями підмережі, що залишилася, які відповідають найкоротшим шляхам, наприклад v_2, v_3 (рис. 13, б). Цей процес триває доти, поки зі схеми мережі не буде вилучено стільки ліній, що вона виявиться роз'єднаною (рис. 13, в).

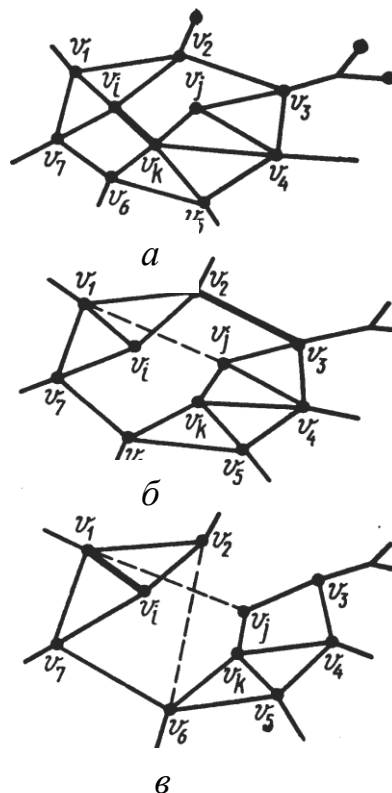


Рисунок 13 - Ілюстрація методу «насичення перетину»

Часто буває необхідно побудувати мережу мінімальної вартості, таку, щоб між вузлами v_i і v_j було хоча б r_{ij} не пересічних у вузлах шляхів. Остання

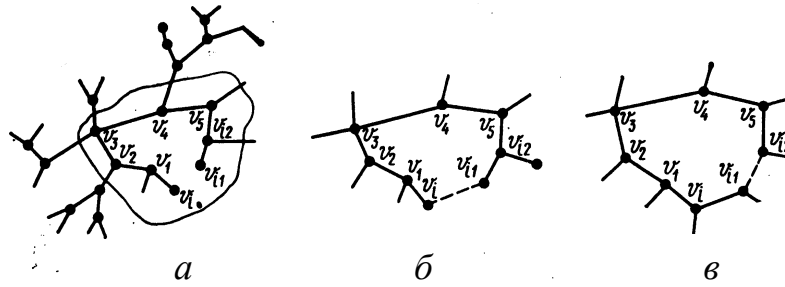
умова задається спеціальною матрицею надмірності $R = \|r_{ij}\|$, у якій вказуються необхідні для його виконання зв'язку. Число змінних і умов обмеження виявляється дуже велико навіть для порівняно невеликих мереж. Оптимізація полягає у пошуку топології мереж не мінімальної, а зниженої вартості, тобто у пошуку локального мінімуму. Рішення базується на методі заміни галузей, що також є евристичним.

Нехай у мережі є дві галузі $|i, k|$ й $|j, h|$, а галузі $|i, h|$ й $|j, k|$ у мережі відсутні. Шляхом вилучення галузей $|i, k|$ і $|j, k|$ й додавання галузей $|i, h|$ і $|j, h|$ можна побудувати нову мережу, якою перевіряється умова: $C_{ij} + C_{jk} < C_{ik} + C_{jh}$.

Якщо нова мережа буде мати меншу вартість, чим вихідна, то результат заміни приймається. Заміна галузей мережі може порушити вимоги розробки відносно зменшення надмірності між вузлами v_i й v_j . Тоді запропоноване рішення відхиляється. Таким чином, у процесі оптимізації методом заміни проводиться перевірка на відповідність умовам зв'язності для всіх вузлів мережі.

Гарною евристичною процедурою є процедура, реалізована за методом виключення замкнутих шляхів. Вихідною топологією служить довільне дерево (рис. 14, а). За допомогою відповідних перетворень можна одержати з одного дерева будь-яке інше. Ці перетворення полягають у наступному. У даному дереві вибирають вузол v_i і знаходять вузол v_i^1 , найближчий до v_i , але ще не з'єднаний з ним (рис. 14, б). До вихідного дерева додається галузь $(v_i - v_{i1})$ і створюється замкнутий ланцюг, що складається з галузей $(v_i - v_i^1)$, $(v_i - v_i^2)$.

Почерговим виключенням галузей $(v_1 - v_2)$, $(v_2 - v_3)$, ..., $(v_j - v_i)$ утворюються нові дерева (рис. 14, в). На кожному кроці ітерації вирішується завдання оптимального розподілу пропускних здатностей галузей, визначається відповідна вартість мережі й робиться необхідне додавання галузей між вузлами v_i й v_{j1} , найближчими до v_i , вузлами, для утворення дерев з більше низькою вартістю. Процес триває доти, поки не будуть досягнуті прийнятні варіанти. Для більшості завдань гарні результати виходять при кількості ітерацій k , яка дорівнює трьом [6].



a - вихідна структура; *б, в* - варіанти ітерацій

Рисунок 14 - Ілюстрація методу «виключення замкнутих шляхів»

Розглянуті ітераційні процедури, що використовують евристичні алгоритми, спочатку застосовувалися для оптимізації централізованих топологічних структур. Однак з деякими додатковими прийомами вони виявляються застосовні й для оптимізації децентралізованих мереж. Задається вихідна топологія, а потім у ході простих ітерацій, подібних тим, що були описані для централізованих ІМ, вона модифікується доти, поки не буде отриманий варіант із більше низькою вартістю, що задовольняє всім покладеним обмеженням.

Послідовність модифікацій топологічної структури являє собою деякий клас замінь, що полягають у виключенні або додаванні галузей до цієї структури, причому вони можуть вводитися або вилучатися з будь-якого місця в мережі.

Для мереж, структура яких містить контури, завдання проектування в її загальному виді спрощуються. Фізична структура мережі, топологія якої містить ланцюги й контури, звичайно відповідає конфігурації, що складається з декількох терміналів з буферними ЗУ й однієї або декількох ЕОМ, зв'язаних між собою. Завдання оптимізації топологічної структури даного типу полягає у розподілі потоку, що відповідає найменшій вартості. При постійному числі терміналів в ЕОМ розглянуте завдання може бути вирішена за два незалежних етапи: вибір швидкості передачі в ланцюзі на основі міркувань, пов'язаних з обмеженнями на довжину черг (мінімальні затримки в кільці); оптимізація структури ланцюга методом замінь галузей.

У цьому випадку зміст відповідає так званому «завданню комівояжера», що являє собою наступне.

Нехай заданий граф $G(V,U)$, дугам якого приписані різні ваги $\|u_{ij}\|$. Необхідно знайти такий контур гамільтона, що має найменшу загальну вагу, тобто

мінімальний контур гамільтона. Для рішення завдання знаходження мінімального контуру гамільтона користуються алгоритмом Литтла.

Багатоконтурні системи менш економічні в порівнянні з деревоподібними, однак при вимогах надійності оптимальний варіант може відповідати багатоконтурній структурі.

З іншого боку, багатоконтурні системи, у яких потрібно вибрати місце розташування пристроїв у кожному з контурів, є прикладом завдань «групування», і оптимізація таких структур може бути досягнута в рамках завдань при p -медіані.

Наведемо *приклад* оптимізації розподіленої мережі. На рис. 15, а зображена вихідна мережа, а на рис. 15, б - зазначені виключаючі гілки та гілки, що додають.

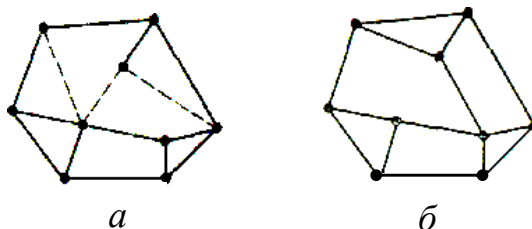


Рисунок 15 - Приклад оптимізації багатоконтурних структур у рамках завдання при p -медіані

Зі збільшенням розмірів мережі з'являється необхідність у розбивці структури мережі на окремі частини й потрібні додаткові евристичні прийоми. У цей час зазначені методи можна використати для побудови щодо невеликих мереж зі структурами загального виду, що містять кілька сотень вузлів. Однак для мереж великого розміру знадобляться інші процедури.

7 МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМ

Найважливішими із числа основних характеристик ІМ є економічні показники, характеристики якості й ефективності ІМ, наприклад, середня вартість доставки інформації між двома пунктами, тарифи за користування послугами мережі, ефективність ІМ та ін. Між цими показниками існує певний взаємозв'язок і залежність від інших характеристик: надійності від вартості, надійності від пропускну здібності, що, вірогідності переданої інформації від надійності й т.д. Надійність і вірогідність характеризують якість функціонування ІМ. Бажано при проектуванні мережі враховувати фактори, що визначають ефективність і якість, мати можливість оцінити й розрахувати відповідні характеристики.

Вихідними даними для аналізу ефективності і якості функціонування є: фінансові витрати на розробку, створення й експлуатацію системи, включаючи зарплату персоналу й витрати на обслуговування; параметри надійності окремих пристроїв системи, період безвідмовної роботи, час відновлення, імовірність відмови й т.д.; параметри вірогідності процесів перетворення інформації, можливість і способи виправлення помилок; параметри швидкодії системи, пропускна здатність пристроїв і ланок, швидкості уведення й зчитування інформації й т.д.; параметри вхідних інформаційних потоків, інтенсивність надходження документів, закони розподілу потоків, їхня структура.

Основний зміст методики можна розглянути на прикладі завдання вибору одного із двох можливих варіантів інформаційної мережі. На першому етапі дослідження виконується розрахунок економічної ефективності для кожного з розглянутих варіантів систем (методика аналізу економічних показників викладена докладно в п.1). При цьому покладається, що мережі ідеалізовані, тобто забезпечують стовідсоткову надійність функціонування, а ефективність кожної з них залежить тільки від економічних показників.

У результаті економічного розрахунку визначаються такі показники, як, наприклад, повні річні витрати на створення (капітальні вкладення) і витрати на функціонування системи (експлуатаційні витрати). Уводиться так званий відносний показник ефективності, що являє відношення повних витрат на одну й іншу системи.

На *першому* етапі вибір системи аналізу робиться на основі мінімуму витрат або за значенням відносного показника, який менше за одиницю.

На *другому* етапі визначається значення виправлення у величині відносного показника, для чого складається імітаційна програма. У результаті структурного аналізу технічних і програмних засобів досліджуваний ІМ визначається й устанавлюється співвідношення між її елементами й об'єктами системи моделювання.

На *третьому* етапі виробляється перевірка вірогідності моделі за показниками адекватності, точності й збіжності (див. п. 2). Це дає можливість оцінити, наскільки ефективні запропонована імітаційна програма й наскільки доцільно неї використати для аналізу системи. За зазначеною методикою оцінки ефективності і якості функціонування системи проводять ряд експериментів, що дозволяють визначити найважливіші показники (пропускну здатність, що результує надійність, вірогідність).

Визначимо можливе значення економії E_m , яку можна одержати при аналізі й оцінці ефективності і якості функціонування ІМ.

За винятком витрат на створення й використання програм і проведення їхніх випробувань ця економія складається із трьох основних складових:

$$E_m = E_1 + E_2 - E_3 - W_m,$$

де E_1 - ефект при виборі одного з декількох варіантів технічної реалізації ІМ; E_2 - ефект, одержуваний у результаті моделювання ІМ; E_3 - ефект від оптимізації ІМ.

Нехай E_i — сумарний річний економічний ефект, якому можна одержати при реалізації i -го варіанта системи. Він являє собою різницю між доходом D , одержуваним об'єктом у процесі роботи кожної із систем, і повними витратами на функціонування i -го варіанта: $E_i = D - W_i$.

Аналогічно для j -го варіанта системи: $E_j = D - W_j$.

Відносний показник ефективності ідеалізованої системи являє собою відношення повних витрат на кожен із систем:

$$\eta_{ij} = W_i / W_j = 1 / \eta_{ji}.$$

Додаткова річна економія при правильному виборі варіанта обумовлена зниженням повних витрат на цей варіант, тобто

$$E_l = E_i - E_j.$$

Це перша складова ефекту при впровадженні ІМ.

Друга складова E_2 обумовлена можливістю пошуку режиму погодженої роботи елементів і ланок системи, при якому втрати інформації, що переробляє ІМ, мінімальні в межах даного варіанта.

Значення відносного показника ефективності змінюється при зміні величини втрат інформації складним чином, але максимальна відносна його зміна виявляється пропорційним максимальним втратам, що мають місце в системі, тобто

$$\gamma_{\max} = \frac{\Delta \eta_{\max}}{\eta} = \frac{\Delta I_{\max}}{I}.$$

Якщо максимальне значення втрат інформації змінилося, наприклад зменшилося з $\Delta I_{\max H}$ до $\Delta I_{\max K}$, то відносний показник ефективності η збільшився до величини η' , яка дорівнює:

$$\eta' = \eta \left(1 - \frac{\Delta I_{\max H}}{I} + \frac{\Delta I_{\max K}}{I} \right).$$

Нижче потрібен висновок цієї формули.

Для системи без втрат маємо показник ефективності η . Облік втрат ΔI_{\max} приводить до результату:

$$\eta_1 = \eta - \eta \frac{\Delta I_{\max H}}{I} = \eta \left(1 - \frac{\Delta I_{\max H}}{I} \right).$$

Зменшення втрат відбувається на величину $\Delta I_{\max H} - \Delta I_{\max K}$.

Тоді

$$\eta'_1 = \eta \left(1 - \frac{\Delta I_{\max H} - \Delta I_{\max K}}{I} \right)$$

До зниження втрат інформації мав місце ефект

$$E_1 = W \left(\eta - 1 - \eta \frac{\Delta I_{\max}}{I} \right).$$

Зі зменшенням втрат реальний показник збільшився на величину

$$\frac{\Delta I_{\max}}{I},$$

і внаслідок цього змінився результуючий ефект до величини E_1' .

Звідси

$$E_2 = E_1 - E_1' = W\eta \frac{\Delta I_{max\ H} - \Delta I_{max\ K}}{I}.$$

Наступний етап складається у визначенні найбільшого значення показника в межах заданого вартісного класу ІМ, тобто оптимізації її структури й організації управління.

У такій системі втрати мінімальні, показник максимальний. Додатковий ефект E_3 , одержуваний при цьому, визначається у такий спосіб:

$$E_3 = W(\eta_{max} - \eta_i) \left(1 - \frac{\Delta I_{min}}{I} \right),$$

де η_{max} — показник ефективності оптимального варіанта; η_i — показник ефективності довільного i -го варіанта; ΔI_{min} — мінімальні втрати в системі.

Таким чином, методика дозволяє підвищити ефективність роботи ІМ за рахунок правильного варіанта системи, при якому забезпечується мінімум втрат інформації, тобто забезпечується необхідна якість функціонування, і одержання додаткової економії.

ВИСНОВОК

Очевидно, діапазон застосування ІМ надзвичайно широкий, однак щоб впровадження кожної з них у тій або іншій сфері було економічно доцільним і соціально виправданим, необхідне ґрунтовне наукове й інженерно-конструкторське пророблення, гарне техніко-економічне обґрунтування пропонованих рішень. У цьому плані цілком зрозуміла роль теорії ІМ, що дозволяє встановити закономірності, властивості й можливості розроблювальних мереж, основні положення якої викладаються в даному посібнику.

Для вивчення теорії основ інформаційних (обчислювальних) мереж необхідні знання вихідних понять і положень фундаментальних розділів теорії мереж, які йдуть в область математики. Це, зокрема, теорія графів, теорія матриць, теорія масового обслуговування й ін. Вони подані у посібнику у формі, орієнтованої на прикладне значення. У той же час, вивчивши основні поняття зараз і самостійно поглибивши свої знання по фундаментальними напрямками, можна навчитися надалі ефективно застосовувати їх в інженерних розрахунках і наукових дослідженнях, пов'язаних з розробками й побудовою інформаційних і обчислювальних мереж.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Морозов В.К. Основы теории информационных сетей: Учеб. для студентов вузов спец. “Автоматизация и механизация процессов обработки и выдачи информации” / В. К. Морозов, А. В. Долганов. - М.: Высш. шк. , 1987. - 271с.
- 2 Бери Нанс. Компьютерные сети. - М.: Биномб, 2001. - 440 с.
- 3 Технологии корпоративных сетей: Энциклопедия. - Спб.: Питер, 1994. - 304 с., ил.
- 4 Теория сетей связи / В.Н. Рогинский, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс. - М., 1981.
- 5 Нейлор Т. Имитационные эксперименты с моделями экономических систем. - М., 1975.
- 6 Вычислительные сети и сетевые протоколы / Д. Дэвис, А. Барбер, У. Прайс. - М., 1982.

ДОДАТОК А

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Вирішити завдання оптимального розміщення ОЦ і АП на території регіону із заданою площею:

- дати рекомендації щодо вибору технічні засоби інформаційної мережі;
- синтезувати топологію мережі;
- провести функціонально-вартісний аналіз спроектованої мережі.

Вихідні дані до завдання подані в табл. А.1.

Таблиця А.1 - Вихідні дані для рішення завдання розміщення ОЦ і АП

№ п\п	Площа регіону, S , км ²	Число абонентів мережі, N	Капітальні витрати на устаткування одного ОЦ, W_1 , тис. грн.	Капітальні витрати на устаткування одного АП, W_2 , тис. грн.	Вартість 1км каналу зв'язку між ОЦ, W_3 , тис. грн. /км	Вартість 1км каналу зв'язку між АП і ОЦ, W_4 , тис. грн. /км	Питомі витрати на передачу інформації на одиницю довжини, W_5 , тис. грн. /км	Сумарні виділені кошти, W_{Σ} , тис. грн.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	100	10000	500	20	20	10	0,1	10000
2	100	8000	500	20	20	10	0,1	10000
3	100	7000	500	20	20	10	0,1	10000
4	100	6000	500	20	20	10	0,1	10000
5	100	5000	500	20	20	10	0,1	10000
6	100	4000	500	20	20	10	0,1	10000
7	100	3000	500	20	20	10	0,1	10000
8	100	2000	500	20	20	10	0,1	10000
9	100	1000	500	20	20	10	0,1	10000
10	100	500	500	20	20	10	0,1	10000
11	80	10000	350	15	20	10	0,25	50000
12	80	8000	350	15	20	10	0,25	50000
13	80	7000	350	15	20	10	0,25	50000
15	80	5000	350	15	20	10	0,25	50000
16	80	4000	350	15	20	10	0,25	50000
17	80	3000	350	15	20	10	0,25	50000
14	80	6000	350	15	20	10	0,25	50000
18	80	2000	350	15	20	10	0,25	50000
19	80	1000	350	15	20	10	0,25	50000
20	80	500	350	15	20	10	0,25	50000
21	50	10000	250	10	20	10	0,15	30000
22	50	8000	250	10	20	10	0,15	30000
23	50	7000	250	10	20	10	0,15	30000
24	50	6000	250	10	20	10	0,15	30000
25	50	5000	250	10	20	10	0,15	30000
25	50	4000	250	10	20	10	0,15	30000

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
27	50	3000	250	10	20	10	0,15	30000
28	50	2000	250	10	20	10	0,15	30000
29	50	1000	250	10	20	10	0,15	30000
30	50	500	250	10	20	10	0,15	30000
31	75	10000	300	25	20	10	0,2	20000
32	75	8000	300	25	20	10	0,2	20000
33	75	7000	300	25	20	10	0,2	20000
34	75	6000	300	25	20	10	0,2	20000
35	75	5000	300	25	20	10	0,2	20000

Методика рішення завдання оптимального розміщення наступна.

1 Рекомендації з вибору технічних засобів інформаційної мережі.

Вони базуються на підставі аналізу вихідної топологічної структури й вибору вартісного класу мережі, що дозволяє встановити функціонально-вартісні співвідношення й визначитися з вибором технічних засобів.

2 Рішення завдання оптимального розміщення вузлів мережі.

У завданні розміщення потрібно визначити оптимальну кількість і місця розташування ЕОМ і АП при заданій кількості споживачів інформації для об'єктів управління у великому регіоні із заданим обсягом інформаційно-обчислювальних робіт. При цьому приймають наступні допущення: різні зони ОЦ не мають загальних абонентів; характеристики потоків інформації в мережі незмінні; стохастична природа потоків не міняється.

3 Проведення топологічного аналізу мережі шляхом рішення завдання розподілу мережних потоків.

Мета аналізу - одержання максимально можливої ефективності зв'язку - досягається рішенням завдання про максимальний потік, у якій ув'язана топологія мережі, пропускні здатності каналів зв'язку й розподіл мережних потоків.

4 Функціонально-вартісний аналіз мережі.

Виконується розрахунок витрат на створення й функціонування мережі й визначення шляхів оптимізації цих витрат. За критерій оптимізації, отже, приймають наведені витрати на створення й функціонування мережі. Для спрощення завдання вводять ряд допущень, що дозволяє вирішити завдання в аналітичному виді: користувачі по регіоні розміщені з рівною щільністю; запити користувачів однорідні, а їхні потоки мають постійну інтенсивність у часі; збір, проміжне зберігання й перетворення інформації здійснюється в ОЦ і АП; споживачі пов'язані з АП і ОЦ радіально.

ДОДАТОК Б

ПРИКЛАД РІШЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ЗАВДАННЯ

Задача.

Вирішити завдання оптимального розміщення обчислювальних центрів (ОЦ) і абонентських пунктів (АП) на території регіону з заданою площею. Вихідні дані для розрахунку:

- D, L - ширина й довжина регіону, обумовлена відповідно до площі регіону ($S = D \cdot L$). Приймаємо $D=10, L=8$ км;
- $N=8000$ - число абонентів мережі;
- $W_1=350$ - капітальні витрати на установку одного ОЦ, тис. грн.;
- $W_2=15$ - капітальні витрати на установку одного АП, тис. грн.;
- $W_3=20$ - вартість 1 км каналу зв'язку між ОЦ, $\frac{\text{тис.грн.}}{\text{км}}$;
- $W_4=10$ - вартість 1 км каналу зв'язку між АП і ОЦ, $\frac{\text{тис.грн.}}{\text{км}}$;
- $W_5=5$ – питомі витрати на передачу обсягу інформації на одиницю довжини каналу зв'язку між ОЦ, $\frac{\text{тис.грн.}}{\text{км}}$;
- $W_\Sigma = 15000$ - сумарні витрати на виробництво й обслуговування мережі, тис. грн.

Рішення.

1 Дано рекомендації з вибору технічних засобів проектованої інформаційної мережі.

Визначимося, що задано комунікаційну мережу з каналами середньої довжини й рівномірним розподілом витрат. На підставі аналізу початкових умов проектування вибирається один з можливих варіантів вихідної топологічної структури або вартісний клас мережі (рис. 1). Для неї складаються відповідні розрахункові співвідношення.

Якщо задано комунікаційну мережу з каналами середньої далекості й рівномірним розподілом витрат, то цьому випадку відповідає клас із індексами W_{222} . Загальне вираження для повних витрат, включаючи витрати на створення мережі, експлуатаційні витрати для будь-якої ІМ даного класу W_Σ має вигляд:

$$W_{\Sigma}(T) = n_T(C_T + R_T T) + n_K(C_K + R_K T) + n_V(C_V + R_V T),$$

де $W_{\Sigma}(T)$ - повні сумарні витрати на створення мережі й обслуговування її функціонування протягом часу T ; n_T, n_K, n_V - кількість у мережі терміналів, каналів і вузлів відповідно; C_T, C_K, C_V - початкова вартість одного терміналу, каналу й вузла відповідно; R_T, R_K, R_V - витрати коштів в одиницю часу на експлуатацію терміналу, каналу й вузла відповідно; T - термін дії мережі з початку функціонування.

Для мережі з рівномірно розподіленим вартісним класом W_{222} , з нього випливає ряд наступних співвідношень:

$$\begin{aligned} n_T(C_T + R_T T) &\approx n_K(C_K + R_K T) \approx n_V(C_V + R_V T), \\ C_T = R_T T; C_K = R_K T; C_V = R_V T &, \end{aligned}$$

звідки вираження сумарних витрат:

$$W_{\Sigma}(T) \approx 6n_T C_T \approx 6n_K C_K \approx 6n_V C_V.$$

Далі процес проектування триває вибором вихідного варіанта топологічної структури ІМ, терміналів n_T , каналів зв'язку й устаткування мережних вузлів, вартість яких відома й наступний перевіірочний розрахунок відповідний до отриманих співвідношень.

Якщо вартісні логічні умови виконуються, то можна зупинитися на зробленому виборі; якщо ні, то рішення має бути переглянуте, тобто мають бути змінені або вартість терміналу, каналів зв'язку й устаткування мережних вузлів, або їхнє число.

2 Рішення завдання оптимального розміщення вузлів мережі.

Уведемо ряд допущень, які дозволять одержати рішення в аналітичному виді - користувачі розміщені по території регіону з рівною щільністю; запити користувачів однорідні, а їхній потік має постійну інтенсивність у часі; перетворення, збирання і проміжне зберігання інформації здійснюються в ОЦ і АП; споживачі з АП і ОЦ зв'язані радіально.

Загальна схема розміщення ОЦ у мережі подана на рис. 2, де колами позначені зони дії кожного ОЦ.

Пошук R здійснюється у такий спосіб: на великому інтервалі із заданим кроком беруться точки (значення R). Виробляється підстановка R у вираження мінімізації витрат:

$$W = W_1 \cdot \frac{S}{R^2} + \frac{S}{r^2} (W_2 + 0,35 \cdot W_3 \cdot R) + \\ + W_3 \left[2,82 \frac{S}{R} + 0,82 \cdot R - 1,82(D + L) \right] + 0,35 \cdot W_4 \cdot N \cdot r$$

Знаходимо частки похідні від повних витрат W за змінними R і r з метою визначення екстремальних значень цих величин для функції W і дорівнявши їхньому нулю, вирішуємо спільно отримані рівняння. Визначаємо корінь отриманого алгебраїчного рівняння. Для заданих значень коефіцієнтів знайдемо безліч значень коренів $R_{01}..R_{0i}$. Із цієї безлічі, природно, виключаються елементи, що визначають мнимі й негативні значення, інші перевіряються на відповідність фізичному змісту завдання.

Отримані значення витрат сортуються за зростанням, найменші значення виводяться в списку знайдених значень. Зробивши обчислення, наприклад, за допомогою програми MathCad, одержуємо масив значень:

$$R = \{5,120 \ 5,200 \ 5,280 \ 5,360 \ 5,440 \ 5,520 \ 5,600 \ 5,680 \ 0,960 \ 5,760 \dots\}.$$

Вибравши одне з найбільш відповідних значень $R=5,12$ км, знаходимо далі відповідному цьому значенню величини, що визначають оптимальний розподіл витрат для синтезованої мережі:

- r_{CP} - середня відстань між АП і ОЦ:

$$r_{CP} = \frac{R}{2\sqrt{2}} = 1.81 \text{ км};$$

- n_{yO} - оптимальне число вузлів (ОЦ):

$$n_{yO} = \frac{S}{4 \cdot r_{CP}^2} = 7;$$

- $n_{АП}$ - середнє число АП, приєднаних до кожного вузла:

$$n_{АП} = \frac{N}{m \cdot n_{yO}} = 23,$$

де m - середнє число абонентів на 1 АП,

$$m = N / (n_{yO} \cdot n_{АП}) = 50.$$

Після розрахунку основних параметрів необхідно приступитися до синтезу топології ІМ (рис Б.1.).

Для топологічного проектування з перелічених параметрів найбільш важливим є оптимальна кількість вузлів у мережі. У тих випадках, коли вартість є

головним критерієм, синтез топологічної структури може бути проведений за мінімумом цього критерію.

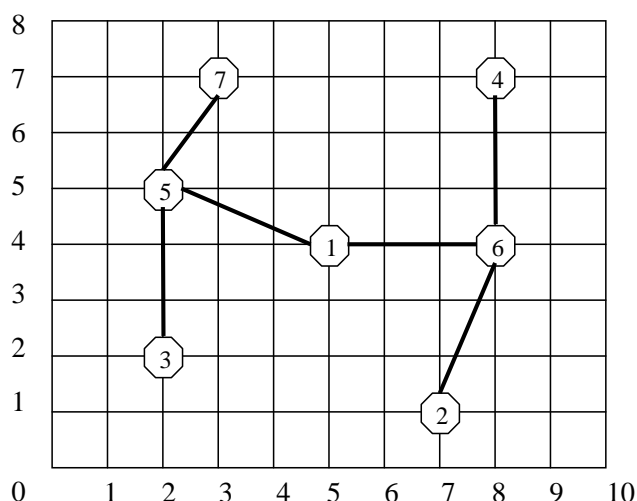


Рисунок Б.1 - Синтез топології ІМ

При рішенні поставленого завдання можна для пунктів розташування абонентів побудувати мінімальне покриваюче дерево, що забезпечує мінімальне значення сумарної довжини ліній передачі повідомлень між ОЦ, для цього застосовується, як правило, алгоритм Литтла [1]. У деяких випадках, коли задана вихідна матриця відстаней, вона може бути прийнята як вагові значення дуг.

Координати ОЦ відповідно до отриманої топологічної структури мережі зводимо до таблиці (табл. Б.1).

Таблиця Б.1 - Координати ОЦ

Номер ОЦ	X, км	Y, км
1	5	4
2	7	1
3	2	2
4	8	7
5	2	5
6	8	4
7	3	7

3 Проведемо найпростіший топологічний аналіз отриманої мережі.

При аналізі мережних топологічних структур виділяють особливості їхньої побудови, що характеризують функціонування мережі: визначають центральний вузол мережі й оптимально розміщують комутаційні вузли.

Центр мережі повинен розташовуватися в такому вузлі, від якого сума значень шляхів до всіх інших (комутаційних) була б мінімальною. Визначивши «вершину» мережі, визначаємо функції вузлів у рамках отриманої топології мережі - визначаємо так звані полярні пари типу «периферія-центр», «керуючий-підлеглий». Це дозволяє розглядати напрям обміну даними, знаходити максимальні значення потоків і їхній розподіл у прийнятій топології мережі. Досягнення мети топологічного аналізу здійснюється рішенням завдання про максимальний потік (отримання максимально можливої ефективності зв'язку).

Зазначимо функції вузлів у рамках прийнятої топології, як показано на рис. Б. 2 і визначимо обсяг оброблюваних запитів (вихідний розподіл потоків по дугах мережі) або обсяг інформаційно-обчислювальних робіт, виконуваних кожним ОЦ для групи m_i абонентів, що належать до зони i -го ОЦ. Якщо визначити приналежність запитів до зони дії ОЦ у такий спосіб:

$$q_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{при } m_j \in A_j \\ 0 & \text{при } m_j \notin A_j \end{cases},$$

де A_j - підмножина абонентів, що належать зоні i -го ОЦ, то обсяг запитів, що надходять в ОЦ із зони його дії, складе

$$Q_i = \sum_j m_j q_{ji}.$$

Тоді, відповідно до прийнятої топології мережі й проведених раніше розрахунків, отримаємо:

$$Q_1=100; Q_2=50; Q_3=50; Q_4=50; Q_5=150; Q_6=150; Q_7=50.$$

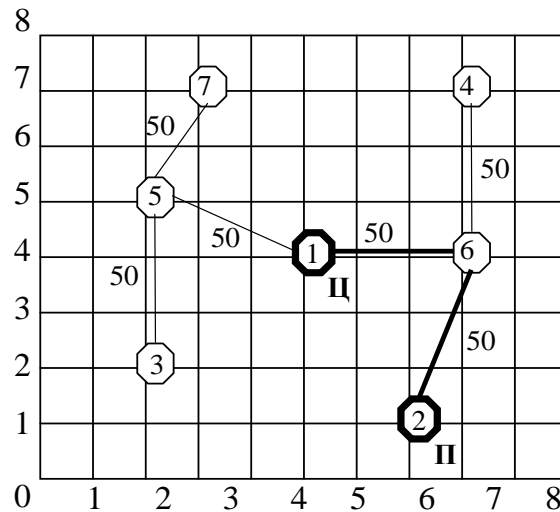
Очевидно, що значення m_i у цьому випадку здобуває значення не навантаження мінімальної пропускної здатності дуги (каналу).

Знайдемо максимальний потік для нашого графа (рис. Б. 2), на якому числа, зазначені поруч із дугами, позначають їх мінімальні пропускні здатності, які дорівнюють у нашому випадку m_i . По черзі будемо виділяти спрямовані шляхи графа, що ведуть від периферії (самого вилученого вузла) до центра.

У цьому випадку існує тільки один спрямований шлях, позначений жирною лінією. Тоді, мінімальна пропускна здатність M розрізу $П-Ц$ дорівнює:

$$M_{\Pi-\Pi} = m_{2-6} + m_{6-1} = 100.$$

Це й відповідає максимальному потоку.



Ц - центр, П – периферія

Рисунок Б.2 - Функції вузлів проектованої мережі

4 Проведемо функціонально-вартісний аналіз мережі.

Після одержання топології мережі необхідно розрахувати оптимальні витрати на установку мережі в регіоні і її функціонування. За критерій оптимізації беремо наведені витрати на створення й функціонування мережі

$$W = W' + W'',$$

де W' , W'' - витрати на виробництво і функціонування мережі відповідно.

Для цього будуються допоміжні матриці – матриця суміжності $|C_m|$ і матриця відстаней $|R|$.

Матриця суміжності заповнюється з наступних міркувань:

- $C_{m_{ij}} = 0$, якщо немає зв'язку між вузлами i і j ;
- $C_{m_{ij}} = 1$, якщо є зв'язок між вузлами i і j ;
- $C_{m_{ij}} = \langle - \rangle$, якщо $i = j$.

Матриця суміжності $|C_m|$:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \\
 1 \left| \begin{array}{ccccccc} - & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 2 \left| \begin{array}{ccccccc} 0 & - & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 3 \left| \begin{array}{ccccccc} 0 & 0 & - & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right. \\
 \end{array} \right. \\
 \end{array} \\
 = C_{m_{ij}} .
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c|ccccccc} 4 & 0 & 0 & 0 & - & 0 & 1 & 0 \\ 5 & 1 & 0 & 1 & 0 & - & 0 & 1 \\ 6 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & - & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & - \end{array}$$

Матриця $|R|$ показує відносну відстань між вузлами й заповнюється з наступних міркувань:

– $R_{ij} = 0$, якщо немає зв'язку між вузлами i і j ;

– $R_{ij} = \frac{Dist_{ij}}{R}$, якщо є зв'язок між вузлами i і j ,

де $Dist_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$ - відстань між вузлами i і j ;

– $R_{ij} = \langle - \rangle$, якщо $i = j$.

Матриця відстаней $|R|$:

$$\begin{array}{c|ccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1 & - & 0 & 0 & 0 & 0,62 & 0,70 & 0 \\ 2 & 0 & - & 0 & 0 & 0 & 0,62 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & - & 0 & 0,44 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0,59 & 0 \\ 5 & 0,62 & 0 & 0,44 & 0 & - & 0 & 0,44 \\ 6 & 0,70 & 0,62 & 0 & 0,59 & 0 & - & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,44 & 0 & - \end{array} = R_{ij} .$$

Результуючі витрати W' виходять як сума капітальних витрат на установку АП і ОЦ, і капітальних витрат на прокладку каналів зв'язку

$$W' = W_{КАП} + W_{КАН} ,$$

де:

– витрати на установку АП і ОЦ:

$$W_{КАП} = n_{УО} \cdot (W_1 + W_2 \cdot n_{АП}) = 4865 \text{ тыс. грн. ;}$$

– витрати на проведення каналів зв'язку:

$$W_{КАН} = \sum_{ij} \frac{R_{ij} \cdot R \cdot W_3}{2} + n_{УО} \cdot n_{АП} \cdot r_{СР} \cdot W_4 = 3262,456 \text{ тыс. грн.}$$

Отже,

$$W' = 4865 + 3262,456 = 8127,456 \text{ тис. грн.}$$

Визначимо витрати на функціонування мережі - W'' .

Відстань між i -м і k -м ОЦ позначимо R_{ik} , через Q_{ik} - середнє значення обсягу інформації, що циркулює між ОЦ із номерами i й k , а через $W_{ik} = W_5$ - питомі витрати на передачу обсягу інформації на одиницю довжини каналу зв'язку між цими ОЦ.

Розглянуте завдання ставиться до числа оптимізаційних завдань із детермінованими змінними, тобто необхідно мінімізувати витрати

$$W'' = \sum_{ik} W_{ik} Q_{ik} R_{ik} .$$

Очевидно, що відстані між ОЦ будуть визначені з матриці відстаней $|R|$, питомі витрати W_5 задані, а середнє значення обсягу інформації, що циркулює між ОЦ, визначається обсягом запитів, що надходять до ОЦ із зони його дії - Q_i і було розраховано раніше, тоді:

$$\begin{aligned} W'' &= W_5 \sum_{ik} Q_{ik} R_{ik} = 5 \times (100 \times (R_{15} + R_{16})) + \\ &+ 5 \times (50 \times (R_{35} + R_{26} + R_{75} + R_{46})) + \\ &+ 5 \times (150 \times (R_{53} + R_{62} + R_{57} + R_{64} + R_{51} + R_{61})) = 4047.5 \text{ тис.грн} \end{aligned}$$

Тобто, приведені витрати на створення й функціонування мережі будуть:

$$W = W' + W'' = 8127.456 + 4047.5 = 12174.956 \text{ тис.грн.}$$

Висновок.

За умовою завдання, сумарні витрати не повинні перевищувати $W_\Sigma = 15000$ тис. грн. Очевидно, що сумарні витрати не перевищують розрахункові на виробництво й забезпечення функціонування мережі:

$$W_\Sigma > W,$$

$$15000 > 12174.956,$$

отже, вибір устаткування й розрахунки мережі зроблені коректно.

Олег Володимирович Суботін

**АНАЛІЗ, СИНТЕЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ
ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ**

Методичний посібник до самостійної роботи
студентів денної і заочної форм навчання
спеціальності 7.092501

Редактор

Ірина Іванівна Дьякова

Підписано до друку
Ризограф. друк. Ум. др. арк.
Тираж прим.

Формат 60×84/16.
Обл.-вид. арк.

ДДМА. 84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72