

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
дипломної роботи

магістра  
(назва освітнього рівня)

|                 |  |
|-----------------|--|
| галузь знань    | <u>17 Електроніка та телекомунікації</u><br>(шифр і назва галузі знань)        |
| спеціальність   | <u>172 Телекомунікації та радіотехніка</u><br>(код і назва спеціальності)      |
| освітній рівень | <u>магістр</u><br>(назва освітнього рівня)                                     |
| кваліфікація    | <u>магістр з телекомунікацій та радіотехніки</u><br>(код і назва кваліфікації) |

На  
тему: «Дослідження структурної надійності радіотехнічних систем  
методом стохастичного моделювання»

Виконавець: студент 6 курсу, групи 172М-19З-1

Бондаренко Артем Вадимович

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище ім'я по-батькові)

| Керівники     | Прізвище, ініціали          | Оцінка | Підпис |
|---------------|-----------------------------|--------|--------|
| проекту       | к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю. |        |        |
| розділів:     |                             |        |        |
| спеціальний   | к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю. |        |        |
| економічний   | к.е.н., доц. Романюк Н.М.   |        |        |
| Рецензент     |                             |        |        |
| Нормоконтроль | к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю. |        |        |

Дніпро  
2020

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри

безпеки інформації та телекомунікацій

д.т.н., професор \_\_\_\_\_ Корнієнко В.І.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу магістра**

спеціальність \_\_\_\_\_ *172 Телекомунікації та радіотехніка*

(код і назва спеціальності)

студента \_\_\_\_\_ 172М-19з-1

(група)

\_\_\_\_\_ Бондаренко Артем Вадимович

(прізвище ім'я по-батькові)

Тема дипломного проекту «Дослідження структурної надійності радіотехнічних систем методом стохастичного моделювання»

Наказ ректора НТУ "ДП" від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

| Розділ                                     | Зміст   | Термін виконання |
|--|---|------------------|
| <i>Стан питання.<br/>Постановка задачі</i> | Аналітичний огляд літератури по темі проекту  | Вересень 2020    |
| <i>Спеціальна частина</i>                  | Розробка алгоритму оцінки структурної надійності радіотехнічних систем методом статистичного моделювання. Оформлення пояснювальної записки. | Жовтень 2020     |
| <i>Економічний розділ</i>                  | Розрахунок капітальних витрат   | Листопад 2020    |

Завдання видав \_\_\_\_\_

(підпис)

Гусев О.Ю.

(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв \_\_\_\_\_

до виконання \_\_\_\_\_

(підпис)

Бондаренко А.В.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: 03 вересня 2020 р.

Строк подання дипломного проекту до ДЕК:

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: с., рис., табл., додатків, джерел.

Об'єкт розробки: радіотехнічні системи.

Предмет розробки: стохастичне моделювання надійності радіотехнічних систем.

Мета дипломного проекту: розробка алгоритму оцінки структурної надійності

радіотехнічних систем методом статистичного моделювання.

У першому розділі виконаний аналітичний огляд літературних джерел по темі дипломної роботи. Здійснено постановку задачі роботи.

У другому розділі виконаний аналіз критеріїв оцінки структурної надійності радіотехнічних систем, розроблені алгоритм і програма оцінки, дано аналіз результатів дослідження структурної надійності радіотехнічних систем

У третьому розділі виконано розрахунок капітальних витрат на розробку алгоритму оцінки структурної надійності радіотехнічних систем.

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛЮВАННЯ, НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ,  
РАДІОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ, АЛГОРИТМ, ПРОГРАМА

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка с., рис., табл., прилож., источн.

Объект разработки: радиотехнические системы.

Предмет разработки: стохастическое моделирование надежности радиотехнических систем.

Цель дипломной работы: разработка алгоритма оценки структурной надежности радиотехнических систем методом статистического моделирования.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературных источников по теме дипломной работы. Осуществлена постановка задачи работы.

Во втором разделе выполнен анализ критериев оценки структурной надежности радиотехнических систем, разработаны алгоритм и программа оценки, дан анализ результатов исследования структурной надежности радиотехнических систем.

В третьем разделе выполнен расчет капитальных затрат на разработку алгоритма оценки структурной надежности радиотехнических систем.

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ,  
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, АЛГОРИТМ, ПРОГРАММА

## **ABSTRACT**

Explanatory note: p., fig., tables., appl., sources.

Development object: radio engineering systems.

Subject of development: stochastic modeling of the reliability of radio engineering systems.

The purpose of the thesis: development of an algorithm for assessing the structural reliability of radio engineering systems using statistical modeling.

The first chapter contains an analytical review of literary sources on the topic of the thesis. The task of the work was formulated.

In the second section, the analysis of criteria for assessing the structural reliability of radio engineering systems is carried out, an algorithm and an assessment program are developed, and the analysis of the results of the study of the structural reliability of radio engineering systems is given.

In the third section, the calculation of capital costs for the development of an algorithm for assessing the structural reliability of radio engineering systems is performed.

**STOCHASTIC MODELING, RELIABILITY OF SYSTEMS, RADIO  
ENGINEERING SYSTEMS, ALGORITHM, PROGRAM**

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

СРЗ - Системи радіозв'язку;

FSK - (Frequency Shift Keying) Частотна маніпуляція;

FHSS - ((Frequency Hopping Spread Spectrum) Розширення спектру стрибками частоти;

РЕБ - Радіоелектронна боротьба;

SNR - (Signal to Noise Ratio) Відношення сигнал-шум;

ЕОМ - Електронно обчислювальна машина

РЕП - Радіоелектронне придушення.

## ЗМІСТ

|   |  |
|---|--|
| ВСТУП .....   |  |
| 1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ .....   |  |
| 1.1. Класифікація структур радіотехнічних систем .....  |  |
| 1.2 Методи дослідження структурної надійності<br>радіотехнічних систем .....  |  |
| 1.2.1 Точний метод аналізу структурної надійності<br>радіотехнічних систем .....  |  |
| 1.2.2 Наближені методи аналізу структурної<br>надійності радіотехнічних систем .....                                    |  |
| 1.2.2.1 Метод розкладання .....   |  |
| 1.2.2.2 Метод перерізів або сукупності шляхів .....   |  |
| 1.2.2.3 Метод ітерацій (двосторонньої оцінки) .....   |  |
| 1.2.2.4 Метод статистичної оцінки структурної надійності .....  |  |
| 1.3 Постановка задачі.....  |  |
| 1.4 Висновки .....  |  |
| 2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА .....  |  |
| 2.1 Дослідження структурної надійності радіотехнічних систем<br>методом статистичного моделювання .....                 |  |
| 2.1.1 Критерії оцінки структурної надійності радіотехнічних<br>систем методом статистичного моделювання .....           |  |
| 2.1.2 Розробка алгоритму оцінки структурної надійності<br>радіотехнічних систем методом статистичного моделювання ..... |  |
| 2.1.3 Розробка програми оцінки структурної надійності<br>радіотехнічних систем методом статистичного моделювання .....  |  |
| 2.3 Результати дослідження структурної надійності<br>радіотехнічних систем .....  |  |
| 2.2 Висновки .....  |  |

|   |  |
|---|--|
| 3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....  |  |
| 3.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку імітаційної моделі<br>методу стохастичного моделювання надійності<br>радіотехнічних систем..... |  |
| 3.1.1 Визначення трудомісткості розробки моделі .....   |  |
| 3.1.2 Розрахунок витрат на розробку моделі .....  |  |
| 3.1.3 Розрахунок капітальних витрат .....   |  |
| 3.2 Висновки .....  |  |
| ВИСНОВКИ .....  |  |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....  |  |
| Додаток А .....   |  |
| Додаток Б .....   |  |
| Додаток В .....   |  |
| Додаток Г .....   |  |



## ВСТУП

Розробка сучасних інформаційних систем зв'язку включає в якості одного з обов'язкових етапів проектування аналіз їх надійності. Проблема ускладнюється тим, що комутаційні мережі, до аналізу яких в кінцевому підсумку зводиться дана задача, є сильно зв'язаними структурами (міжміські мережі зв'язку, системи управління та ін.). Це ускладнює, а іноді робить неможливим розрахунок їх надійності строго аналітичними методами, як це має місце, наприклад, для паралельно-последовних мереж. Єдиним чисельним методом розрахунку надійності сильно зв'язаних мереж залишається метод повного перебору, який, проте, навіть із залученням швидкодіючих ЕОМ, не дозволяє аналізувати мережі, що містять більше 15-20 випадкових компонент.

У тих випадках, коли до складу інформаційної системи включені не тільки фізичні об'єкти (канали зв'язку, транспортні засоби, релейно-контактні елементи і т.п.), але й об'єкти, які означають такі поняття, як "логічний зв'язок", "операція" та т.п., одним із способів підвищення надійності таких мереж є просте дублювання складових їх елементів. Однак через обмеженість ресурсів такий шлях в більшості випадків нерациональний. До теперішнього часу аналітичний апарат синтезу оптимальних структур комунікаційних мереж практично ще не розроблений внаслідок виняткової складності самої задачі. В інженерній практиці при вирішенні подібного роду завдань часто вдаються до методу часткового перебору. Так, наприклад, при виборі оптимальної структури мережі зв'язку в якості приватних варіантів можуть аналізуватися деякі типові схеми з'єднання вузлових пунктів. Застосовується так званий радіальний принцип з'єднання вузлів, принцип зв'язку "кожного з кожним" або "кожного з найближчим", ієрархічний принцип з'єднання і т. д. Одним з основних критеріїв оцінки цих варіантів є перш за все надійність передачі повідомлення в мережі.

Серед методів імовірнісного аналізу комунікаційних мереж будемо розрізняти алгоритмічні, що є по суті програмами для вирішення завдань на ЕОМ, і методи аналого-ймовірнісного моделювання.

Одним з основних методів вирішення поставлених завдань є метод статистичного моделювання. Критерієм оцінки структурної надійності мереж зв'язку за цим методом є ймовірність настання події - мережа зв'язана.

## 1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

### 1.1. Класифікація структур радіотехнічних систем

Одними з основних характеристик мереж зв'язку, незалежно від систем передачі інформації, є: структура, топологія і структурна надійність.

Структура мережі зв'язку - взаємне розташування вузлів комунікацій і ліній зв'язку без урахування їх розташування на місцевості.

Топологія мережі зв'язку - структура мережі зв'язку з урахуванням реального розташування вузлів зв'язку на місцевості.

Мережа вважається зв'язаною, якщо всі вузли комунікацій можна з'єднати між собою ланцюгом ліній зв'язку, які примикають одна до одної.

Структурна надійність мережі зв'язку - властивість мережі забезпечувати зв'язність мережі в умовах виходу з ладу її елементів.

У якості кількісних оцінок структури мережі зв'язку, як правило, використовуються 'S' - кількість вузлів комунікацій; 'M' - кількість ліній зв'язку; 'K<sub>ij</sub>' - кількість каналів в лінії зв'язку, що з'єднує ('i' - й і 'j' - й) вузли комунікацій; 'R<sub>i</sub>' - ступінь вузлів комунікацій, яка показує загальну кількість ліній зв'язку від даного вузла до сусідніх ( $i, j = 1 \dots S, i \neq j$ ); U - перетин мережі - мінімальне число ліній зв'язку, одночасна відмова яких призводить до незв'язної мережі.

На сьогоднішній день існує велика кількість структур мереж, які об'єднують задану множину вузлів комунікацій, проте серед них можна виділити три типи: мережеподібні, деревовидні і кільцеві (таблиця 1).

Кільцеві структури мають 'S' вузлів комунікацій, 'M' ліній зв'язку та  $R_i = U$ . Капітальні витрати для створення мережі зв'язку кільцевої структури

відносно невеликі. Однак, і структурна надійність такої мережі також невисока. Так при виході з ладу всього двох несусідніх вузлів комунікацій мережу залишається не зв'язною.

До деревовидних структур мереж зв'язку відносяться всі структури, що мають  $M = S-1$ . Це зіркоподібні ( $U = 1$ ), лінійні ( $U = 1, R_i = 2$ ) і ієрархічні ( $U = 1$ ) структури (таблиця 1.1).

Відмітна особливість деревовидних структур - мінімальні капітальні витрати на їх створення.

У лінійних структурах все вузли комунікацій, крім кінцевих, виконують комутаційні функції. Прикладом побудови таких мереж є локальні мережі ЕОМ типу ETHERNET (США).

Зіркоподібна структура використовується на рівні абонентських ліній телефонних мереж зв'язку, в термінальному комплексі NASDAQ (США) і в обчислювальних мережах SNA (США).

Мережеподібні структури, в залежності від їх зображення на площині, розрізняються на плоскі, які не мають ліній зв'язку, що перетинаються; об'ємні, які не можна уявити без перетину ліній зв'язку.

Об'ємні, в залежності від ступеня кожного вузла комутацій, можуть бути повнозв'язними і неповнозв'язними.

У повнозв'язних структурах кожна пара вузлів комутацій з'єднана з лінією зв'язку, отже,  $R_i = U = S-1$ . Для її побудови необхідно мати  $M = S(S-1)/2$  ліній зв'язку. Структурна надійність таких мереж, в порівнянні з іншими (при рівних  $S$  і ймовірності відмови кожного елемента мережі), найвища. Однак, основним недоліком повнозв'язних мереж є великі капітальні витрати. Прикладом побудови таких мереж служить: міжнародна мережа зв'язку Поштового відомства ФРН або локальна мережа MERIT (США).

У неповнозв'язній структурі не кожна пара вузлів комунікацій з'єднана

лінією зв'язку. Для побудови при  $S$  вузлів комунікацій необхідно  $M = S * R_{сер.} / 2$ , де  $R_{сер.}$  - середній ступінь вузлів комунікацій мережі. За кількісними показниками (кількість вузлів комутацій, ліній зв'язку, величина капітальних вкладень на створення мережі, структурна надійність і  $U$ ) неповнозв'язні і повнозв'язні структури схожі. Прикладом застосування неповнозв'язних структур є мережі ПДС.

Плоскі мережеподібні структури розпадаються на коміркові і радіально-кільцеві. Останні мають високу ступінь концентрації вузлів комунікацій в центрі мережі. При цьому ступінь центрального вузла комутацій по відношенню до решти буде найвищою.

Радіально-кільцеві структури, як правило, застосовуються в мережах з явно вираженим характером тяжіння віддалених вузлів комунікацій до центру. Структурна надійність таких мереж, зважаючи на велике число маршрутів між довільною парою вузлів комунікацій, досить висока. При цьому капітальні витрати відносно невеликі.

Прикладом побудови нерегулярних радіально-кільцевих структур (таблиця 1.1) є внутрішньодержавні телефонні мережі зв'язку великих міст.

Коміркові структури (таблиця 1.1) на відміну від радіально-кільцевих мають відносно рівномірний розподіл вузлів комунікацій по всій площі мережі зв'язку. Кожен вузол комунікацій має мережу ліній зв'язку тільки з невеликим числом інших вузлів комунікацій, як правило, ближніх по відстані або мають велике тяжіння. Через наявність великої кількості маршрутів між довільною парою вузлів комунікацій пористі структури мають досить високу структурну надійність при невеликих капітальних витратах, в порівнянні з об'ємними.

Коміркові структури розрізняють регулярні і нерегулярні (таблиця 1.1). До останніх відносяться структури, в яких ступінь  $R_i$  кожного вузла комунікацій різна. Для них кількість ліній зв'язку  $M = S * R_{сер.} / 2$ .

Прикладом таких мереж є: обчислювальні мережі ARPA (США), CYCLADES (Франція), DATAPAC (Канада) та інші.

У коміркових регулярних структурах кожен вузол комунікацій має ступінь:  $R_i = 3$  (стілникові),  $R_i = 4$  (квадратні) і  $R_i = 6$  (трикутні). Для їх створення необхідно  $M = R_i \cdot S / 2$  ліній зв'язку.

Були розглянуті основні структури мереж зв'язку, до яких можна звести довільні шляхом виділення окремих фрагментів, або шляхом незначних спрощень. Однак, реальні мережі, як правило, мають змішані структури.

Таблиця 1.

| Типи структур мереж зв'язку. |                    |                |                |                      |                |                |                           |                       |               |                       |               |                 |
|------------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|---------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------|
|                              | Мережеподібні      |                |                |                      |                |                |                           | Деревовидні           |               |                       |               |                 |
|                              | Плоскі (планарні). |                |                |                      |                |                | Об'ємні непланарні        |                       |               |                       |               |                 |
|                              | Коміркові          |                |                | Радіально - кільцеві |                |                |                           |                       |               |                       |               |                 |
|                              | Регулярні          |                |                |                      |                |                |                           |                       |               |                       |               |                 |
|                              | Сотові             | Квадратні      | Трикутні       | Нерегулярні          | Регулярні      | Нерегулярні    | Повозв'язні               | Неповнозв'язні        | Зіркоподібні  | Линейні               | Ієрархичні    | Кільцеві        |
| Характеристики мережі        | $M=3S/2$ $R_i=4$   | $M=2S$ $R_i=4$ | $M=3S$ $R_i=6$ | $M=SR_{ср.}/2$       | $M=SR_i/4 - 1$ | $M=SR_{ср.}/2$ | $M=S(S-1)/2$<br>$R=U=S-1$ | $M=R_{ср.} \cdot S/2$ | $M=S-1$ $U=1$ | $M=S-1$ $U=1$ $R_i=2$ | $M=S-1$ $U=1$ | $S=M$ $U=R_i=2$ |
| Приклад побудовання          |                    |                |                |                      |                |                |                           |                       |               |                       |               |                 |

## 1.2 Методи дослідження структурної надійності радіотехнічних систем

### 1.2.1 Точний метод аналізу структурної надійності

Надійність є одним з основних критеріїв, яким повинні задовольняти

сучасні мережі комутації. Врахувати безпосередньо показники надійності в ході синтезу мережі зазвичай не вдається, тому, на етапі синтезу, необхідні передумови для забезпечення надійності, які закладаються в непрямому вигляді, наприклад, як топологічна вимога забезпечення між деякими підмножинами пар вузлів не менше заданого числа незалежних шляхів (вимога  $v$ -зв'язності). Отримувані варіанти побудови мережі потім перевіряються на відповідність заданим показникам надійності. Якщо при обраному числі незалежних шляхів не вдається виконати задані вимоги, то підвищують ступінь зв'язності розглянутих в процесі синтезу варіантів структури майбутньої мережі.

Таким чином, завдання побудови надійної мережі зводиться до задачі аналізу різних варіантів її структури за заданими показниками, які залежать як від надійності її елементів, так і від способу їх взаємного з'єднання. Найбільші труднощі при розрахунку зазвичай пов'язані з урахуванням способу взаємного з'єднання елементів (структури мережі), тому в подальшому основну увагу ми приділимо оцінці саме структурної надійності.

Елементами мереж комутації вважатимемо напрямки зв'язку, а також технічні засоби, що входять до складу, вузлів комутації, концентраторів навантаження і комплексів мережевого доступу абонентів. При цьому основними компонентами, показники надійності яких проектувальник мережі змінити не може, є канали зв'язку і процесори. Зв'язок між суміжними вузлами мережі організовується за допомогою послідовно і паралельно включених каналів, а технічні засоби на вузлах зв'язку складаються з послідовно і паралельно включених процесорів.

Звернемося спочатку до визначення показників надійності компонентів мережі. Для визначення будь-якого з них перш за все необхідно сформулювати поняття відмови. Незважаючи на гадану очевидність цього поняття, в ряді випадків його формулювання має певні складнощі. Візьмемо для прикладу канал зв'язку. Найчастіше якість каналу погіршується

поступово, і встановити момент, починаючи з якого слід констатувати відмову каналу, досить складно. Більш того, окремі показники якості каналу (наприклад, ймовірність спотворень) мають статистичну природу, і потрібен якийсь час спостереження за каналом, перш ніж з певною упевненістю можна буде оголосити канал несправним. Припустимо тільки, що завжди можна задати деякий час переривання зв'язку, після закінчення якого канал визнається несправним. Зазвичай цей час лежить в межах від одиниць до десятків секунд і залежить від призначення мережі та обраної системи її контролю і управління.

Припустимо, що поняття відмови сформульовано.

Тоді можна експериментально визначити середній час перебування компоненту в справному стані  $T_i$  і середній час його відновлення  $\tau_v$ . Ці показники надійності в великій мірі залежать від обраного часу перерви зв'язку, після закінчення якого канал визнається несправним. За цими характеристиками можна визначити ймовірність того, що компонент знаходиться в справному стані, або його коефіцієнт готовності

$$K_r = T_i / (T_i + \tau_v) \quad (1.1)$$

і коефіцієнт простою

$$K_p = 1 - K_r = \tau_v / (T_i + \tau_v). \quad (1.2)$$

Досвід показує, що коефіцієнти готовності і простою в значно меншому ступені залежать від критичного часу перерви зв'язку і, крім того, допускають узагальнення на мережу в цілому. Тому при оцінках структурної надійності в якості вихідних даних приймемо коефіцієнти готовності (простою) компонентів мережі.

При послідовному з'єднанні  $n$  компонентів мережі, наприклад, каналів зв'язку, результуючий ланцюжок буде справний лише в разі справності всіх його складових. Припускаючи незалежність відмов послідовно з'єднаних компонентів, результуючий коефіцієнт готовності  $K_{rp}$  можна представити у



вигляді

$$K_{гр} = \prod_{i=1}^n K_{гi}, \quad (1.3)$$

де  $K_{гi}$  - коефіцієнт готовності  $i$ -го компонента.

Для підвищення надійності напрямків зв'язку і технічних засобів на вузлах зв'язку часто використовується паралельне включення  $n$  каналів або процесорів, при якому результуючий елемент мережі буде справний, якщо справний хоча б один з вхідних в нього компонентів. Відмова такого складового елемента настане лише в разі відмови всіх компонентів, які входять до його складу, і це трапиться з ймовірністю

$$K_{пэ} = \prod_{i=1}^n K_{пi}, \quad (1.4)$$

де  $K_{пэ}$ - коефіцієнт простою елемента;  $K_{пi}$ - коефіцієнт простою  $i$ -го компонента. Якщо

$$K_{пi} = K_{п}, \quad i = \overline{1, n}, \quad \text{то } K_{пэ} = K_{п}^n. \quad (1.5)$$

Формули (2.4) та (2.5) справедливі лише в тому випадку, коли відмови всіх розглянутих компонентів незалежні. Ця умова свідомо порушується, якщо канали зв'язку одного напрямку проходять по одній лінії зв'язку або, тим більше, знаходяться в одній системі передачі. Тому в подальшому будемо вважати, що всі канали зв'язку кожного напрямку мережі проходять по географічно рознесеним лініям зв'язку.

Вираз для результуючого коефіцієнта простою елемента  $K_{пэ}$ , що складається з  $n$  паралельно включених ідентичних компонентів, можна отримати й іншим способом, користуючись формулою Енгсета. Дійсно, сукупність компонентів можна розглядати як  $n$  кінцевих джерел, причому заявка на обслуговування - це вимога ремонту (відновлення). Для визначення

коефіцієнта простою елемента досить визначити ймовірність того, що всі  $n$  джерел будуть перебувати на обслуговуванні. Відповідно до формули Енгсета ця ймовірність

$$K_{\text{пз}} = C_n^n A^n / \sum_{i=0}^n C_n^i A^i, \quad (1.6)$$

де  $A = \tau_B / T_H$ . Легко встановити еквівалентність виразів (1.6) і (1.5). Дійсно,

$$C_n^n A^n / \sum_{i=0}^n C_n^i A^i = (\tau_B / T_H)^n / (1 - \tau_B / T_H)^n = K_{\text{пз}}$$

Іноді продуктивності одного компонента недостатньо для нормальної роботи елемента мережі, і, щоб обслужити навантаження, що надходить, необхідна одночасна робота, принаймні,  $s$  компонентів. У цьому випадку елемент мережі (наприклад, напрямок зв'язку) визнається несправним в разі відмови  $s+1$  і більше компонентів. Імовірність цієї події можна відразу записати як ймовірність того, що одночасно  $s+1$  або більше джерел (компонентів) жадають обслуговування (відновлення), виходячи з формули Енгсета

$$K_{\text{пз}}(s) = \sum_{i=s+1}^n C_n^i A^i / \sum_{i=0}^n C_n^i A^i \quad (1.7)$$

Якщо розглянутий елемент мережі є вузлом комутації, що складається з  $n$  паралельно включених процесорів, причому мінімально необхідну продуктивність вузла можуть забезпечити не менше ніж  $s$  процесорів, то при відмові  $(s+1)$ -го процесора вузол комутації може виключатися і ресурс  $n-s-1$  процесорів, що залишилися, витратиться не буде. Для знаходження коефіцієнта простою такого елемента можна скористатися формулою Енгсета і мнемонічним правилом. Згідно з цим правилом можна відразу записати коефіцієнт простою елемента, що цікавить нас

$$K_{\text{пз}}(s+1) = C_n^{s+1} A^{s+1} / \sum_{i=0}^{s+1} C_n^i A^i \quad (1.8)$$

Тут в чисельнику наводиться число ситуацій, сприятливих для відмови елемента, а в знаменнику - загальне число ситуацій, відповідних відмові 0, 1, ..., s+1 компонентів. Відмова більш ніж s+1 компонентів тут не враховується, так як за умовою в цьому випадку вузол комутації відключається і ресурс компонентів, що залишилися, не витрачається. Надалі ми вже не будемо цікавитися внутрішньою структурою елементів мережі, вважаючи, що їх показники надійності  $p = 1 - K_{\text{пе}}$  визначені по одній з наведених формул.

### 1.2.2 Наближені методи аналізу структурної надійності радіотехнічних систем

Сучасні мережі комутації мають досить складну структуру, яка в загальному випадку не зводиться до послідовно-паралельних з'єднань, тому для розрахунку надійності таких мереж не можна застосовувати методи, розглянуті в §1.1. Перш за все необхідно сформулювати критерій відмови мережі. Через мережу обмінюється інформацією велике число пар абонентів, причому часто потрібно, щоб ймовірність наявності зв'язку між кореспондентами виділеної пари  $(r, l)$  була не менше заданої  $P_{rl}$ . Під наявністю зв'язку розуміється існування, принаймні, одного справного шляху між відповідними вузлами. Звичайно, в складній мережі наявність справного шляху ще не гарантує негайного встановлення з'єднання, так як елементи цього шляху можуть бути зайняті для обміну інформацією інших кореспондентів. Якщо припустити, що термін "наявність зв'язку" відноситься тільки до інформації вищої категорії, частка якої в реальних мережах зазвичай дуже мала, і елементи будь-якого справного шляху здатні забезпечити обмін цією інформацією в інтересах всіх кореспондентів, які їм можуть скористатися, то виникає можливість розглядати всі пари кореспондентів незалежно з точки зору наявності зв'язку між ними. В

елементах мережі, продуктивність яких недостатня для обслуговування сумарного навантаження вищої категорії, можна передбачити згідно (1.7) або (1.8) більше число  $s$  робочих компонентів.

Таким чином, мережа має задану надійність, якщо ймовірність наявності зв'язку або, як кажуть, ймовірність зв'язності  $H_{rl}$  для кожної пари вузлів не менше заданої  $P_{rl}$ . У цих умовах розрахунок структурної надійності мережі зводиться до розрахунку ймовірності зв'язності між вузлами. Надалі розглянемо і деякі інші критерії надійності мережі.

Отже, задана структура деякої мережі, що складається з  $N$  елементів, причому надійність  $p_i$  кожного елемента відома ( $i=\overline{1, N}$ ). Необхідно визначити ймовірність зв'язності щодо виділеної пари вузлів  $r, l$ . Кожен елемент мережі може перебувати тільки в двох станах - справний (I) або несправний (H). При цьому мережа може, очевидно, перебувати в будь-якому з  $S=2^N$  станів. У деяких з цих станів мережу буде зв'язує. ( $C_{rl}$ ) щодо розглянутих вузлів. Якщо позначити через  $E_s$  ймовірність того, що мережа знаходиться в стані  $s, s=\overline{1, S}$ , то шукана ймовірність зв'язності мережі

$$H_{rl} = \sum_{s \in C_{rl}} E_s \quad (1.9)$$

$$\text{де } E_s = \prod_{i \in b} p_i \prod_{j \in h} (1-p_j).$$

При цьому, як і раніше, передбачається, що відмови всіх елементів мережі - події незалежні.

Розглянутий метод розрахунку структурної надійності мережі, пов'язаний з повним перебором її станів і при збільшенні розмірів мережі, швидко стає нереальним навіть на сучасних швидкодіючих ЕОМ.

### 1.2.2.1 Метод розкладання

Трохи менш трудомістким є метод, заснований на розкладанні структури мережі щодо якогось її елемента (метод розкладання Шеннона-Мура). Ідея цього методу полягає в тому, щоб звести структуру, що аналізується, до послідовно-паралельних з'єднань і тим самим уникнути повного перебору станів. Для прикладу розглянемо мережу найпростішої структури у вигляді містка (рис.1.1).

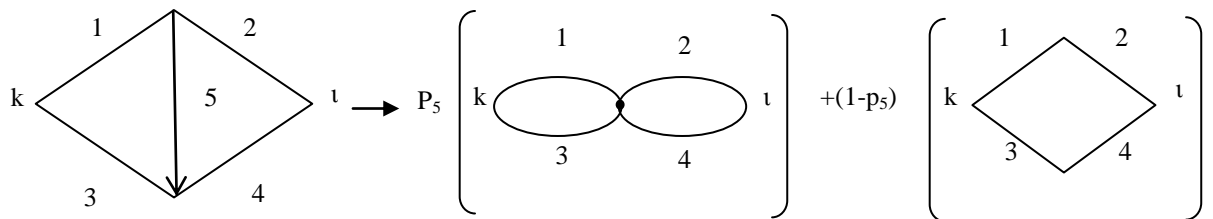


Рисунок 1.1 – Метод розкладання

Для простоти припустимо, що вузли цієї мережі ідеально надійні, а гілки мають кінцеву надійність  $p_i$ ,  $i=\overline{1,5}$ . Нумерація гілок приведена на малюнку. Проробимо з елементом під номером 5 ("перемичка" містка) два досвіди - "короткого замикання", відповідний справному стану елемента, і "холостого ходу", відповідний його несправному стану. Якщо перемичка знаходиться в справному стані, що трапляється з ймовірністю  $p_5$ , то з'єднувані нею вузли можна "стягти" в сенсі надійності (див. рис.1.1) і мережа буде мати вигляд двох послідовно з'єднаних і паралельно включених пар гілок. Якщо перемичка знаходиться в непрацездатному стані, що трапляється з ймовірністю  $1-p_5$ , то решта мережі матиме вигляд паралельного з'єднання ланцюжків.

Таким чином, ми "розклали" мережу щодо елемента 5, в результаті чого отримали дві підмережі з числом елементів на одиницю менше, ніж у

вихідній мережі. Оскільки обидві підмережі є послідовно-паралельні структури, то, користуючись формулами (1.3) і (1.4), можна відразу записати шуканий вираз для ймовірності зв'язності мережі щодо вузлів  $r, l$ , використовуючи для компактності позначення  $q_i = 1 - p_i$

$$H_{rl} = p_5 (1 - q_1 q_3) (1 - q_2 q_4) + q_5 [1 - (1 - q_1 q_2) (1 - q_3 q_4)].$$

У більш складних структурах може знадобитися неодноразове застосування теореми розкладання. Так, на рис.2.2 показано розкладання щодо елемента 7 (верхній рядок), а потім по елементу 8 (нижній рядок). Утворені чотири підмережі мають послідовно-паралельні структури і більше не вимагають розкладів. Легко бачити, що на кожному кроці число елементів, які утворюються в підмережах, зменшується на одиницю а число підмереж, які потребують подальшого розгляду, подвоюється. Тому описаний процес в будь-якому випадку кінцевий, а число результуючих послідовно-паралельних структур складе  $2^m$ , де  $m$  - число елементів, за якими довелося провести розкладання. Трудомісткість цього методу можна оцінити величиною  $2^m$ , що менше трудомісткості повного перебору, але тим не менше все ще неприйнятне для розрахунку надійності реальних мереж комутації.

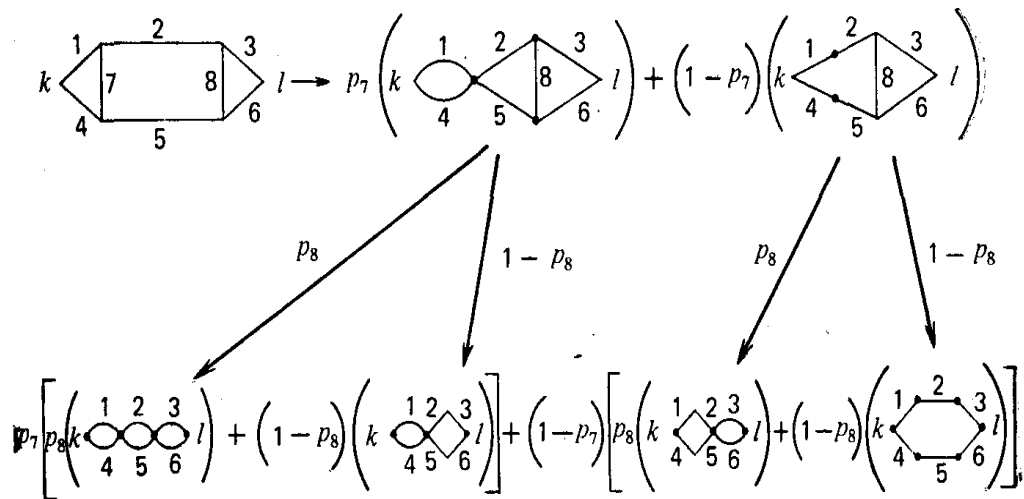


Рисунок 1.2 – Послідовне розкладання мережі

### 1.2.2.2 Метод перерізів або сукупності шляхів

Розглянемо ще один метод розрахунку структурної надійності мереж. Припустимо, як і раніше, що необхідно визначити ймовірність зв'язності мережі між заданою парою вузлів А, В. Критерієм справної роботи мережі в даному випадку є наявність хоча б одного шляху передачі інформації між розглянутими вузлами. Припустимо, що є список можливих шляхів у вигляді переліку елементів (вузлів і напрямків зв'язку), що входять в кожен шлях. У загальному випадку шляхи будуть залежні, оскільки будь-який елемент може входити в кілька шляхів. Надійність  $R_s$  будь-якого  $s$ -го шляху можна обчислити за формулою послідовного з'єднання  $R_s = p_{1s} p_{2s} \dots p_{ts}$ , де  $p_{is}$  - надійність  $i$ -го елемента  $s$ -го шляху.

Шукана надійність  $H_{AB}$  залежить від надійності кожного шляху і варіантів їх перетинів по загальним елементам. Позначимо надійність, яка забезпечується першими  $r$  шляхами, через  $H_r$ . Додавання чергового  $(r+1)$ -го шляху з надійністю  $R_{r+1}$ , очевидно, призведе до збільшення структурної надійності, яка тепер буде визначатися об'єднанням двох подій: справний хоча б один з перших  $r$  шляхів або справний  $(r+1)$ -й шлях. Імовірність настання цієї об'єднаної події з урахуванням можливої залежності відмов  $(r+1)$ -го і інших шляхів

$$H_{r+1} = H_r + R_{r+1} - R_{r+1} H_{r/(r+1)}, \quad (1.10)$$

де  $H_{r/(r+1)}$  - ймовірність справності хоча б одного з перших  $r$  шляхів за умови, що справний  $(r+1)$  - й шлях.

З визначення умовної ймовірності  $H_{r/(r+1)}$  випливає, що при її розрахунку ймовірність справної роботи всіх елементів, що входять в  $(r+1)$  - й шлях, необхідно покласти дорівнюючим одиниці. Для зручності подальших розрахунків представимо останній член виразу (1.10) в наступному вигляді:

$$R_{r+1} H_{r/(r+1)} = R_{r+1} \varpi H_r \quad (1.11)$$

де символ  $(\varpi)$  означає, що при перемножуванні показники надійності всіх елементів, що входять в перші  $r$  шляхів і спільних з  $(r+1)$  - м шляхом, замінюються одиницею. З урахуванням (1.11) можна переписати (1.10):

$$\Delta H_{r+1} = R_{r+1} \varpi Q_r \quad (1.12)$$

де  $\Delta H_{r+1} = H_{r+1} - H_r$  - приріст структурної надійності при введенні  $(r+1)$  - го шляху;  $Q_r = 1 - H_r$  - ймовірність того, що відбудеться одночасна відмова перших  $r$  шляхів.

З огляду, що приріст надійності  $\Delta H_{r+1}$  чисельно дорівнює зменшенню ненадійності  $\Delta Q_{r+1}$ , отримуємо наступне рівняння в кінцевих різницях:

$$\Delta Q_{r+1} = R_{r+1} \varpi Q_r \quad (1.13)$$



Легко перевірити, що рішенням рівняння (1.13) є функція

$$Q_r = (1-R_1) \cap (1-R_2) \cap \dots \cap (1-R_r). \quad (1.14)$$

У разі незалежних шляхів операція символічного множення збігається зі звичайним множенням і вираз (1.14) аналогічно (1.4) дає коефіцієнт простою системи, що складається з паралельно включених елементів. У загальному випадку необхідність врахування загальних елементів шляхів змушує виробляти множення згідно (1.14) в алгебраїчному вигляді. При цьому число членів в результуючій формулі з множенням на кожен черговий двочлен подвоюється і остаточний результат буде мати  $2^r$  членів, що еквівалентно повному перебору сукупності всіх  $r$  шляхів. Наприклад, при  $r=10$  число членів в остаточній формулі перевищує 1000, що вже виходить за рамки ручного рахунку. З подальшим збільшенням кількості шляхів досить швидко вичерпуються і можливості сучасних ЕОМ.

Однак властивості введеної вище операції символічного множення дозволяють різко скоротити трудомісткість розрахунків. Розглянемо ці властивості більш докладно. Згідно операції символічного множення для показника надійності  $p_i$  будь-якого елемента справедливо наступне правило

$$p_i \cap p_i = p_i. \quad (1.15)$$

Нагадаємо, що другий співмножник (1.15) має сенс ймовірності справної роботи  $i$ -го елемента за умови його справності, яка, очевидно, дорівнює одиниці.

Для скорочення подальших викладок введемо наступне позначення ненадійності  $i$ -го елемента:

$$\bar{p}_i = 1 - p_i \quad (1.16)$$

З урахуванням (1.15) і (1.16) можна записати наступні прості правила перетворення виразів, що містять  $p_i$  і  $\bar{p}_i$ :

$$\begin{aligned}
 p_i \cap \bar{p}_i &= 0 \\
 \bar{p}_i \cap \bar{p}_i &= \bar{p}_i \\
 p_i \cap p_j &= p_i p_j \\
 \bar{p}_i \cap \bar{p}_j &= \bar{p}_i \\
 p_i p_j \cap \overline{p_i p_j} &= p_i p_j - p_i p_j \\
 \overline{p_i p_j} - p_i p_j &= \bar{p}_i
 \end{aligned}
 \tag{1.17}$$

Для прикладу використання цих правил при розрахунку надійності розглянемо найпростішу мережу зв'язку, зображену на рис.1.3. Літери, які стоять у ребер графа, позначають показники надійності відповідних ліній зв'язку.

Вузли для простоти будемо вважати ідеально надійними. Припустимо, що для зв'язку між вузлами А і В можна використовувати всі шляхи, що складаються з трьох і менш послідовно включених ліній, тобто слід врахувати підмножину шляхів  $\{\mu\} = \{ab, cdf, cgb, ahf\}$ . Визначимо приріст надійності, що забезпечується кожним наступним шляхом, по формулі (1.12) з урахуванням (1.14):

$$\Delta H_{r+1} = R_{r+1} \cap (\bar{R} \cap \bar{R}_2 \cap \dots \cap \bar{R}_r).
 \tag{1.18}$$

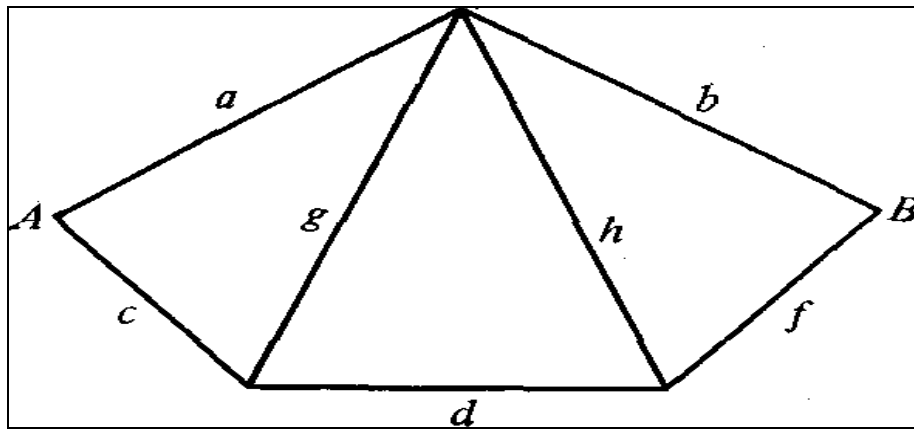


Рисунок 2.3 - Приклад мережі розрахунку на обмеженій підмножині шляхів

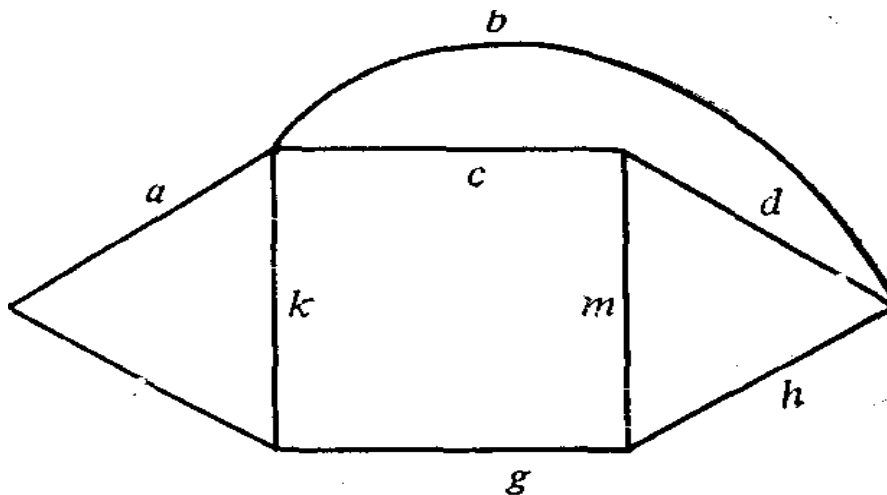


Рисунок 2.4 - Приклад мережі для розрахунку надійності по повній сукупності шляхів, де  $R_i=1-R_1$  аналогічно (1.16).

Застосовуючи послідовно формулу (1.18) і правила символічного множення (1.17). до даної мережі, отримуємо

$$\Delta H_1 = \overline{ab};$$

$$\Delta H_2 = cdf \cap (\overline{ab}) = cdf * \overline{ab};$$

$$\Delta H_3 = cgb \cap (\overline{a} \cap \overline{df}) = cgb * \overline{a} * \overline{df};$$

$$\Delta H_4 = ahf \cap (\overline{b} \cap \overline{cd} \cap \overline{cgb}) = ahf * \overline{b} * \overline{cd}.$$

При розрахунку останнього збільшення ми використовували правило 4, яке можна назвати правилом поглинання довгих ланцюгів короткими; в даному випадку його застосування дає  $b \circ c g b = b$ . Якщо дозволено використання інших шляхів, наприклад шляху  $cdhb$ , то не становить труднощів розрахувати забезпечуваний їм приріст  $\Delta H_5 = cdhb \circ (a \circ f \circ g \circ af) = = cdfb * a * f * g$ . Результируючу надійність мережі можна тепер обчислити як суму приростів, які забезпечуються кожним з розглянутих шляхів:

$$H_R = \sum_{i=1}^r \Delta H_i. \quad (1.19)$$

Так, для розглянутого прикладу в припущенні, що надійність всіх елементів мережі однакова, тобто  $a=b=c=d=f=h=g=p$ , одержуємо  $H_5 = p^2 + p^3 (1 - p^2) + 2p^3 (1 - p) (1 - p^2) + p^4 (1 - p)^3$ . При машинній реалізації в основу розрахунку можна також покласти формулу (1.13), з урахуванням того, що

$$Q_r = \sum_{i=1}^r \Delta Q_i. \quad (1.20)$$

Згідно (1.13) маємо наступне рекурентне співвідношення

$$Q_{r+1} = Q_r - R_{r+1} \circ Q_r. \quad (1.21)$$

При початковій умові  $Q_0 = 1$  на кожному наступному кроці з отриманого раніше вираза для  $Q_r$  слід відняти перемноження надійності чергового  $(r+1)$  - го шляху на цей же вираз, в якому тільки показники надійності всіх елементів, що входять в  $(r+1)$  - й шлях, потрібно покласти рівними одиниці.

Як приклад розрахуємо надійність мережі, зображеної на рис. 1.4, щодо вузлів А і В, між якими є 11 можливих шляхів передачі інформації. Всі розрахунки зведені в табл. 1.1: перелік елементів, що входять в кожен шлях, результат множення надійності даного шляху на значення  $Q_r$ , отримане при

розгляді всіх попередніх шляхів, і результат спрощення вмісту третього стовпчика за правилами (1.17). Остаточна формула для  $Q_{AB}$  міститься в останній колонці, якщо її читати зверху вниз. У таблиці повністю приведені всі викладки, необхідні для розрахунку структурної надійності даної мережі.

Таблиця 1.1 Результати розрахунку надійності мережі, зображеної на рис.1.4

| Номер шляху | $R_{r+1}$ | $R_{r+1}Q_r$  | $Q_{r+1}$  |
|-------------|-----------|---|--|
| 1           | ab        | $\overline{ab}$   | $\overline{ab}$  |
| 2           | fgh       | $\overline{fgh}$  | $\overline{fgh}$   |
| 3           | acd       | $acd * b * \overline{fgh}$  | $acd * \overline{b} * \overline{gh}$   |
| 4           | frb       | $\overline{frb} * a * \overline{gh}$  | $\overline{frb} * \overline{a} * \overline{gh}$  |
| 5           | argh      | $argh ( \overline{b} * \overline{f} - cd * \overline{b} * \overline{f} )$   | $argh \overline{b} * \overline{f} * \overline{cd}$                                       |
| 6           | acmh      | $acmh ( b * \overline{fg} - d * \overline{b} * \overline{fg} - rg \overline{b} * \overline{f} * \overline{d} )$   | $acmh \overline{b} \overline{d} ( fg - rg * \overline{f} ) -$                            |
| 7           | frcd      | $frcd ( \overline{ab} * \overline{gh} * - \overline{ab} * \overline{gh} - b * \overline{a} * \overline{gh} )$   | $frcd * \overline{gh} * \overline{a} * \overline{b}$                                     |
| 8           | fgmd      | $fgmd ( \overline{ab} * \overline{h} - ac * \overline{b} * \overline{h} - rb * \overline{a} * \overline{h} - rc * \overline{h} * \overline{a} * \overline{b} )$               | $fgmdh ( \overline{ab} - ac * \overline{b} - rb * \overline{a} - rc * \overline{ab} ) -$ |
| 9           | argmd     | $argmd [ \overline{b} * \overline{fh} - c * \overline{b} * \overline{fh} - h \overline{b} * \overline{f} * \overline{c} - f \overline{h} ( \overline{b} - c \overline{b} ) ]$ | $argmd \overline{b} * \overline{c} * \overline{f} * \overline{h}$                        |
| 10          | frcmh     | $frcmh ( \overline{ab} * \overline{g} - ad * \overline{b} * \overline{g} - b * \overline{ag} - a$   | $frcmh * \overline{g} * \overline{b} * \overline{a} * \overline{d}$                      |

|    |       |   |   |
|----|-------|---|---|
|    |       | $\bar{b} * \bar{d} * \bar{c} * \bar{d} * \bar{g} * \bar{a}$<br>$* \bar{b}$ )                    |   |
| 11 | fgmcd | fgmcd [ $\bar{a} * \bar{h} - r * \bar{a} * \bar{h} - d * \bar{h} ( \bar{a} - r$<br>$\bar{a} )]$ | fgmcd * $\bar{a} * \bar{h} * \bar{r} * \bar{d}$ |

Для зменшення обсягу обчислень не слід без необхідності розкривати дужки; якщо проміжний результат допускає спрощення (приведення подібних членів, винесення за дужки загального множника і т.д.), їх слід виконати.

Пояснимо кілька кроків розрахунку. Оскільки  $Q_0 = 1$  (при відсутності шляхів мережу розірвано), то для  $Q_1$  из (2.21)  $Q_1 = 1 - ab = ab$ . Робимо наступний крок (1.21) для  $Q_2 = ab - fghab = ab * fgh$  і т.д.

Розглянемо докладніше крок, на якому враховується внесок шляху 9. Перемноження показників надійності складових його елементів, записане в другому стовпці табл.1.1, переноситься в третій. Далі в квадратних дужках записана ймовірність розриву всіх попередніх восьми шляхів, накопичена в четвертому стовпці (починаючи з першого рядка), з урахуванням правила (1.15), згідно з яким показники надійності всіх елементів, які увійшли в шлях 9, замінюються одиницями. Внесок четвертого, шостого та сьомого рядків виявляється рівним нулю за правилом 1. Далі вираз, що стоїть в квадратних дужках, спрощується за правилами (1.17) наступним чином  $b [fh - cfh - hfc - fhc] = b (fhc - hfc - fhc) = bc (h - fh) = bchf$ . Аналогічно проводиться розрахунок щодо всіх інших шляхів.

Використання даного методу дозволяє отримати загальну формулу структурної надійності, що містить в розглянутому випадку всього 15 членів замість максимального числа  $2^{11} = 2048$ , що виходить при безпосередньому перемноженні ймовірностей відмов цих шляхів. При машинній реалізації

методу зручно представити всі елементи мережі в позиційному коді рядком біт і використовувати вбудовані булеві функції для реалізації логічних елементів перетворень (1.17).

До сих пір ми розглядали показники структурної надійності мережі щодо виділеної пари вузлів. Сукупність таких показників для всіх або деякої підмножини пар може досить повно характеризувати структурну надійність мережі в цілому. Іноді використовується інший, інтегральний, критерій структурної надійності. За цим критерієм мережу вважається справною, якщо є зв'язок між усіма її вузлами і задається вимога на ймовірність такої події.

Для розрахунку структурної надійності за цим критерієм досить ввести узагальнення поняття шляху у вигляді дерева, що з'єднує всі задані вузли мережі. Тоді мережа буде пов'язана, якщо існує, принаймні, одне зв'язуюче дерево, і розрахунок зводиться до перемножування ймовірностей відмови всіх розглянутих дерев з урахуванням наявності загальних елементів. Ймовірність  $Q_s$  відмови  $s$ -го дерева визначається аналогічно ймовірності відмови шляху

$$Q_s = 1 - \prod_{i=1}^{n_s} p_{is},$$

де  $p_{is}$  - показник надійності  $i$ -го елемента, що входить в  $s$ -е дерево;  $n_s$  - число елементів в  $s$ -му дереві.

Розглянемо для прикладу найпростішу мережу у вигляді трикутника, сторони якого зважені показниками надійності  $a$ ,  $b$ , з відповідних гілок. Для зв'язності такої мережі досить існування, принаймні, одного з дерев  $ab$ ,  $bc$ ,  $ca$ . Використовуючи рекурентне співвідношення (1.12), визначаємо ймовірність зв'язності цієї мережі  $H_{cb} = ab + bca + cab$ . Якщо  $a = b = c = p$ , отримуємо таке значення ймовірності зв'язності, яке легко перевірити перебором:  $H_{cb} = 3p^2 - 2p^3$ .

Для расчета вероятности связности достаточно разветвленных сетей

вместо перечня связывающих деревьев, как правило, удобнее пользоваться перечнем сечений  $\{\sigma\}$  которые приводят к потере связности сети по рассматриваемому критерию. Легко показать, что для сечения справедливы все введенные выше правила символического умножения, только вместо показателей надежности элементов сети в качестве исходных данных следует использовать показатели ненадежности  $q=1-p$ . Действительно, если все пути или деревья можно считать включенными "параллельно" с учетом их взаимозависимости, то все сечения включены в этом смысле "последовательно". Обозначим вероятность того, что в некотором сечении  $s$  нет ни одного исправного элемента, через  $\pi_s$ . Тогда можно записать

Для розрахунку ймовірності зв'язності досить розгалужених мереж замість переліку зв'язуючих дерев, як правило, зручніше користуватися переліком перетинів  $\{\sigma\}$  які призводять до втрати зв'язності мережі по критерію, що розглядається. Легко показати, що для перетину справедливі всі введені вище правила символічного множення, тільки замість показників надійності елементів мережі в якості вихідних даних слід використовувати показники ненадійності  $q=1-p$ . Дійсно, якщо всі шляхи або дерева можна вважати включеними "паралельно" з урахуванням їх взаємозалежності, то всі перетини включені в цьому сенсі "послідовно". Позначимо ймовірність того, що в деякому перетині  $s$  немає жодного справного елемента, через  $\pi_s$ . Тоді можна записати

$$\pi_s = q_{1s} q_{2s} \dots q_{ms}, \quad (1.22)$$

де  $q_{is}$  - показник ненадійності  $i$ -го елемента, що входить в  $s$ -й перетин.

Ймовірність  $H_{cb}$  зв'язності мережі можна тоді уявити аналогічно (1.14) в символічному вигляді

$$H_{cb} = (1-\pi_1) \quad \square \quad (1-\pi_2) \quad \square \dots \square \quad (1-\pi_r), \quad (1.23)$$



де  $r$  - число розглянутих перетинів. Іншими словами, для того щоб мережа була зв'язна, необхідно, щоб одночасно були справні хоча б по одному елементу в кожному перетині з урахуванням взаємної залежності перетинів по загальним елементам. Формула (1.23) є в деякому сенсі двоїстою по відношенню до формули (2.14) і виходить з останньої заміною шляхів на перетини і ймовірностей справної роботи на ймовірності перебування в стані відмови.

Аналогічно двоїстим по відношенню до формули (1.21) є рекурентне співвідношення

$$H_{r+1} = H_r - \pi_{r+1} \circlearrowright H_r. \quad (1.24)$$

Розрахуємо для прикладу ймовірність зв'язності розглянутої вище трикутної мережі з набором перетинів  $ab$ ,  $bc$ ,  $ca$ . Згідно (1.23) при початковій умові  $H_0=1$  маємо  $H_{cd}=ab-bca-cab$ . При однакових показниках ненадійності елементів мережі  $a = b = c = q$  отримуємо  $H_{cb}=1-q^2-2q^2(1-q)$ . Цей результат збігається з раніше отриманими за методом перерахування дерев.

Метод перерізів можна, звичайно, застосовувати і для розрахунку ймовірності зв'язності мережі щодо виділеної пари вузлів, особливо в тих випадках, коли число перетинів в розглянутій мережі значно менше числа вузлів. Однак найбільший ефект в сенсі скорочення трудомісткості обчислень дає одночасне використання обох методів, яке буде розглянуто далі.

### 1.2.2.3 Метод ітерацій (двосторонньої оцінки)

При проектуванні реальних мереж пакетної комутації звичайно відсутня необхідність точного розрахунку надійності мережі, так як вихідні

дані по надійності елементів задаються, як правило, з деякою кінцевою точністю. Проектувальникам необхідно лише переконатися в тому, що надійність мережі, з одного боку, не нижче заданої і, з іншого боку, не має економічно необґрунтованого запасу. Іншими словами, на практиці досить гарантувати, що справжнє значення надійності  $H_0$  знаходиться в деяких межах  $H_{\min} < H_0 < H_{\max}$ .

Можна очікувати, що оцінка надійності мережі із заданою кінцевою точністю дозволить скоротити трудомісткість розрахунків в тим більшій мірі, чим нижче необхідної точність оцінки. Дійсно, при розрахунку надійності за сукупністю шляхів додавання кожного наступного шляху призводить до збільшення надійності, а при розрахунку за сукупністю перетинів додавання кожного наступного перетину призводить до зменшення структурної надійності, що створює передумови для двосторонньої оцінки структурної надійності з гарантованою точністю по обмеженим наборам шляхів і перетинів. Розглянемо цю можливість більш детально.

Позначимо через  $Q_{\mu}^{(r)}$  результат, отриманий при перемножуванні ймовірностей відмов  $1-R_s$  перших  $r$  із загального числа  $n$  шляхів. Тоді з урахуванням наступного  $(r+1)$  - го шляху отримаємо згідно (1.21) уточнену оцінку  $Q_{\mu}^{(r+1)}$ :

$$Q_{\mu}^{(r+1)} = Q_{\mu}^{(r)} \cdot R_{r+1} \cdot Q_{\mu}^{(r)} . \quad (2.25)$$

Функція  $H_{\mu}^{(r)} = 1 - Q_{\mu}^{(r)}$  є монотонно неспадною зі зростанням  $r$  та при  $r=n$  дає точне значення  $H_0 = H_{\mu}^{(n)}$ . Проміжні значення  $H_{\mu}^{(n)}$  при  $r < n$  можна розглядати, як оцінки  $H_0$  знизу. Аналогічно, виходячи з формули (1.23), можна отримати послідовність  $H_{\sigma}(R+1)$ , що монотонно не збільшується, і яку можна розглядати, як послідовність оцінок  $H_0$  зверху. Характер залежності  $H_{\mu}^{(r)}$  і  $H_{\sigma}^{(r)}$  від  $r$  представлений на рис.1.5. Досвід показує, залежності, що розглядаються, при малих  $r$  змінюються дуже круто, а з

подальшим збільшенням  $g$  дуже повільно наближаються до загальної межі  $H_0$ . Цю властивість можна використовувати для скорочення трудомісткості оцінок надійності із заданою точністю. Дійсно, для вирішення завдання досить послідовно переглядати шляхи  $\mu$ , поки не виконається умова  $H_\mu^{(m)} \geq H_{\min}$  і потім переглядати перетини  $\sigma$ , поки не виконається умова  $H_\sigma^{(r)} \leq H_{\min}$ . Якщо для деякого  $m$  виявиться, що  $H_\mu^{(m)} > H_{\max}$ , то можна припинити розрахунки і прийняти рішення, що в мережі закладена зайва надмірність, а якщо для деякого  $g$  виявиться, що  $H_\sigma^{(r)} < H_{\min}$ , то це означає, що вимоги до надійності мережі не виконуються. Число вимагаючих перегляду шляхів  $m$  і перетинів  $g$  зазвичай набагато менше загального числа шляхів  $n$  і загального числа перетинів  $k$  ( $m \ll n$ ,  $g \ll k$ ), чим і досягається скорочення трудомісткості оцінки. Одночасно гарантується, що справжнє значення надійності мережі лежить в заданих межах  $H_{\min} \leq H_0 \leq H_{\max}$ .

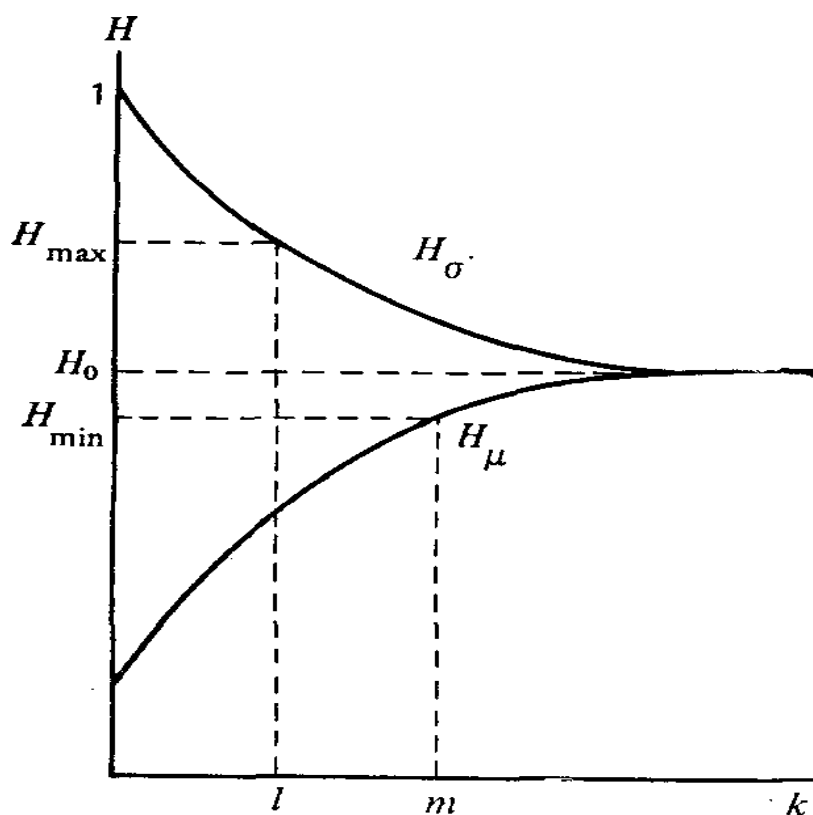


Рисунок 1.5 – Характер зміни оцінок структурної надійності за сукупністю шляхів і перетинів

Точність оцінки може бути задана у вигляді допустимих відхилень від істинного значення  $N_b^{+a}$ . В цьому випадку перегляд шляхів і перетинів слід вести до тих пір, поки не виконається умова  $|N_\mu^{(m)} - N_\sigma^{(r)}| \leq a+b$ . Зокрема, якщо  $a = b$ , то умова припинення розрахунків має вигляд  $|N_\mu^{(m)} - N_\sigma^{(r)}| \leq 2a$ , а в якості оцінки надійності слід прийняти величину  $N = (N_\mu^{(m)} - N_\sigma^{(r)}) / 2$ . В ході розрахунків рішення про розгляд на наступному кроці чергового шляху або перетину доцільно приймати за критерієм більшого абсолютного приросту надійності за відповідним параметром ( $m$  або  $r$ ).

Для розгалужених мереж зв'язку використання запропонованого методу дозволяє значно скоротити трудомісткість розрахунків в порівнянні з методом повного перебору шляхів або перетинів. При цьому метод гарантує будь-який заданий рівень точності оцінки ймовірності зв'язності мережі.

#### 1.2.2.4 Метод статистичної оцінки структурної надійності

Широко поширеним методом оцінки надійності складних технічних систем є метод статистичних випробувань. Однак для отримання статистично достовірних результатів, особливо при високій вихідній надійності елементів системи і її великій структурній надлишковості, потрібні значні витрати машинного часу.

Досвід показує, що основні витрати часу при статистичних випробуваннях складної системи пов'язані з перевіркою її працездатності в кожній реалізації. При високій вихідній надійності  $p_i$  елементів або великій структурній надмірності, характерній для розгалужених мереж комутації, перевірка на працездатність переважної більшості реалізацій дає позитивний результат, що обумовлює їх малу інформативність. Тому виникає природне бажання знайти якесь перетворення мережі, що дозволяє штучно зменшити вихідну надійність її елементів, щоб швидше набрати необхідну статистику відмов і отримати зворотне перетворення, що дозволяє перераховувати

отримані результати на реальні показники надійності елементів мережі. Покажемо, що така можливість дійсно існує.

Назвемо розрізом підмножину елементів системи, видалення яких призводить до втрати працездатності. Розглянемо деякий розріз  $u$ , в який входить рівно  $z$  елементів. Частота випадання такого розрізу при статистичних випробуваннях прагне по ходу випробувань до її ймовірності:

$$P_u = \prod_{i \in u} p_i \prod_{i \in u} (1-p_i).$$

Якщо позначити через  $N$  загальне число елементів мережі, то ймовірність  $P_u$  можна записати у вигляді

$$P_u = \left( \prod_{i=1}^n p_i \right) \prod_{j \in u} (1-p_j) / p_j.$$

Змінимо початкові показники надійності системи таким чином, щоб кожен співмножник  $(1-p_i) / p_j$  другого перемноження збільшився в  $\gamma$  разів. Іншими словами, замість елемента з надійністю  $p_j$  введемо елемент з надійністю  $p'_j$  такий, щоб задовольнялася умова

$$(1-p'_j) / p'_j = \gamma (1-p_j) / p_j. \quad (1.27)$$

При цьому з (1.27) надійність нового елемента

$$p'_j = p_j [p_j + \gamma (1 - p_j)]^{-1}. \quad (1.28)$$

Якщо зробити перетворення (1.27) для всіх елементів мережі, то ймовірність випадання розрізу  $u$  в процесі випробувань зміниться і складе

$$P_u = \prod_{i=1}^n p_j [p_j + \gamma (1 - p_j)]^{-1} \prod_{j \in u} \gamma (1 - p_j) / p_j$$

Введемо коефіцієнт  $\delta$  збільшення частоти випадання розрізу

$$\delta = P'_u / P_u. \quad (1.29)$$

Підставляючи в (1.29) старе і нове значення частоти випадання розрізу  $u$ , отримуємо

$$\delta = \prod_{i=1}^n p_j [p_j + \gamma (1 - p_j)]^{-1} \prod_{j \in u} \gamma.$$

Якщо в розріз  $u$  входить рівно  $z$  елементів, то

$$\delta = \gamma^z \prod_{i=1}^n p_j [p_j + \gamma (1 - p_j)]^{-1}$$

де другий співмножник  $\prod_{i=1}^n p_j [p_j + \gamma (1 - p_j)]^{-1} = K$  константа для вихідної системи. Коефіцієнт прискорення можна представити у вигляді  $\delta = \gamma^z K$ . Звідси випливає, що запропоноване перетворення показників надійності не приводить до порушення відносної частоти появи розрізів фіксованої ваги  $z$ , так як коефіцієнт прискорення для всіх цих розрізів однаковий. Однак відносна частота появи розрізів ваги  $z+w$  в порівнянні з розрізами ваги  $z$  збільшується в  $\gamma^w$  разів. Тому в ході статистичних випробувань перетвореної системи можна набрати достатню статистику по розрізах більшої ваги, ймовірність появи яких у вихідній системі буває зазвичай дуже малою.

Перерахунок імовірності появи розрізу  $u$  з перетвореної системи в вихідну проводиться відповідно до (1.29):

$$P_u = P'_u / \delta = P'_u \gamma^{-z} K^{-1}. \quad (1.30)$$

Для виконання зворотного перетворення (1.30) крім факту відмови системи необхідно фіксувати і вагу  $z$  відповідного розрізу.

З (1.30) випливає, що кожен випадок появи розрізу  $u$  з вагою  $z$  в реформованій системі відповідає  $\gamma^{-z} K^{-1}$  випадків появи такого ж розрізу в вихідній системі. При цьому якщо в перетвореній системі за час випробувань сталося  $m$  відмов, то для вихідної системи еквівалентне число відмов

$$m_{\text{екв}} = K^{-1} \sum_{i=1}^m \gamma^{-z_i},$$

де  $z_i$  - число елементів, що вийшли з ладу при  $i$ -й відмові системи.

При виникненні чергової  $m$ -й відмови в перетвореній системі оцінки надійності  $P_m$  вихідної системи уточнюються відповідно до виразу

$$P_m = 1 - m_{\text{екв}} / M = 1 - (MK)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^m \gamma^{-z_i},$$

де  $M$  - загальне число переглянутих реалізацій станів перетвореної системи.

Виникає питання, яким слід вибирати параметр перетворення  $\gamma$  для максимального прискорення процесу статистичних випробувань конкретної системи? З (1.28) випливає, що при  $\gamma=1$  зміна вихідної надійності не відбувається і прискорення відсутнє. Якщо вибрати  $\gamma$  занадто великим, то в реформованій системі будуть в основному виникати розрізи великої ваги, не

характерні для вихідної системи, причому їх внесок в результуючу надійність при великих  $z$  відповідно до (1.30) буде невеликий. Тому параметр  $\gamma$  слід вибирати таким чином, щоб максимізувати ймовірність виникнення найбільш "вірогідних" розрізів.

Розглянемо це питання більш детально.

Для простоти припустимо, що показники надійності всіх елементів системи однакові і рівні  $p$ . Позначимо через  $P(z)$  ймовірність виникнення відказних станів ваги  $z$ . Очевидно, що ймовірність втрати працездатності системи

$$Q = \sum_{z=1}^n P(z). \quad (1.31)$$

Зазвичай для реальних систем значення  $P(z)$  досить плавно змінюється зі збільшенням ваги розрізу, тому в якості найбільш ймовірного розрізу можна вибрати клас розрізів середньої ваги.

$$Z_{cp} = \left[ \sum_{z=1}^n zP(z) \right] / \sum_{z=1}^n P(z).$$

Для надійних систем у виразі (1.31) можна знехтувати всіма членами, крім першого ненульового, що відповідає мінімальному розрізу ваги  $z_0$ , який і буде найбільш імовірним. Таким чином, завдання полягає в тому, щоб максимізувати коефіцієнт прискорення для найбільш ймовірного розрізу, тобто знайти максимум функції  $\delta_{(\gamma)}$  при  $z=z_0$ ,  $p_i=p$ , ( $i=1,2,\dots,N$ ):

$$\delta_{(\gamma)} = \gamma^{z_0} [p + \gamma(1-p)]^{-N}. \quad (1.32)$$

З умови  $\partial \delta_{(\gamma)} / \partial \gamma = 0$  отримуємо оптимальне значення



$$\gamma_0 = z_0 p [(N - z_0) / (1 - p)]^{-1}. \quad (1.33)$$

Підставляючи (1.33) в (1.28), неважко переконатися, що оптимальне значення  $\gamma_0$  відповідає перерахованим значенням надійності елемента системи  $p' = 1 - z_0/N$ . Іншими словами, для максимального прискорення процедури статистичних випробувань необхідно таким чином перерахувати надійність елементів системи, щоб середня вага відмов в реформованій системі відповідала вазі найбільш ймовірного розрізу.

Прискорення темпу набору статистики відмов відповідно до (1.32) складе

$$\delta_m = \{ z_0 / [(1 - p) N] \}^{z_0} [(N - z_0) / (pN)]^{N - z_0}.$$

Так, для системи з параметрами  $p = 0,99$ ,  $N = 20$ ,  $z_0 = 3$  час випробувань можна скоротити приблизно в 150 разів для достовірності отриманих результатів не гірше, ніж в разі прямого набору статистики відмов системи.

Проведені на ЕОМ порівняльні статистичні випробування конкретних мереж за звичайним і пропонованим методами показали, що прискорення збіжності результатів випробувань відповідає наведеним теоретичним оцінкам.

### 1.3 Постановка задачі

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- 1 Виконати аналітичний огляд методів оцінки структурної надійності радіотехнічних систем.
- 2 Сформулювати критерії оцінки структурної надійності.
- 3 Розробити алгоритм оцінки структурної надійності.

4 Розробити програму оцінки структурної надійності.

5 Виконати аналіз результатів.

#### 1.4 Висновки

1 Розглянуто класифікація структур радіотехнічних систем

2 Розглянуто методи дослідження структурної надійності

3 Сформульовано постановка задачі

## 2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Дослідження структурної надійності радіотехнічних систем методом статистичного моделювання

2.1.1 Критерії оцінки структурної надійності радіотехнічних систем методом статистичного моделювання

Критерієм оцінки структурної надійності мереж зв'язку методом статистичного моделювання є ймовірність настання події - мережа зв'язана.

На сьогоднішній день в літературі відомо кілька методів перевірки мереж на зв'язність: "пошук в глибину", "розростання" і "згортки".

Відомо, що метод "згортки" дозволяє зменшити до 50% (в порівнянні з іншими методами) витрати часу ЕОМ для даної процедури. Суть даного методу полягає в одночасному з'єднанні інцидентних вершин з довільно обраною вершиною до тих пір, поки мережа не буде представлена у вигляді однієї точки (якщо мережа зв'язна) або множини точок (якщо мережа незв'язна).

Однак цьому методу, як і іншим, притаманний недолік - різке (нелінійне) збільшення витрат часу ЕОМ (в порівнянні з іншими методами) на процедуру перевірки графа мережі на зв'язність.

Метод "розбиття". Суть методу "розбиття" полягає в наступному. Граф мережі розбивається на підграфи, кожен з яких окремо перевіряється на зв'язність методом "згортки". В результаті отримуємо новий граф - суперграф, який в свою чергу перевіряється на зв'язність. Якщо суперграф зв'язний, то робиться висновок, що вихідний граф мережі зв'язний. За рахунок "розбиття" вихідного графа мережі на підграфи з'являється

можливість працювати на пологій ділянці кривої, що відображає залежність витрат часу ЕОМ від розмірності графа.

Оцінка складності методу "розбиття". Розглянемо граф мережі у вигляді квадратної решітки. Звичайно, навряд чи варто очікувати, що граф реальної мережі матиме структуру з квадратною коміркою. Однак оцінки, отримані для даної ситуації, дадуть уявлення про складність пропонованого методу перевірки графа мережі на зв'язність. Вкладемо даний граф в прямокутну систему координат. Припустимо, число вершин по осях  $x$  і  $y$  однаково і дорівнює  $L$ . Загальна кількість вершин у графі дорівнюватиме  $S=L^2$ .

В даному випадку за методом "згортки" досить виконати

$$L-1=\sqrt{S-1}$$

ітерацій для визначення зв'язності графа. Тоді складність методу "згортка" буде визначатися

$$Q=M(\sqrt{S-1}),$$

де  $M$  - ступінь кожної вершини графа.

Припустимо, що граф розбитий на  $n$  рівних підграфів, тоді складність перевірки кожного підграфа складе

$$G_1=M\left(\sqrt{\frac{S}{n}}-1\right)$$

З огляду на перевірку на зв'язність отриманого суперграфа, розмірність якого дорівнює  $n$ , отримаємо оцінку складності методу "розбиття"

$$Q_n=M\left(\sqrt{\frac{S}{n}}-1\right)+M(\sqrt{n}-1).$$

## 2.1.2 Розробка алгоритму оцінки структурної надійності радіотехнічних систем методом статистичного моделювання

Мережу зв'язку задаємо у вигляді ймовірнісної матриці суміжності графа сети

$$P = \|p_{ij}\|_{s,s},$$

де  $p_{ij} = k_g(i,j)$  ( $i, j = 1 \dots S; i \neq j$ ).

Здійснюємо  $N_0$  незалежних випробувань, кожне з яких складається з двох етапів. На першому етапі вибираємо  $m$  незалежних, рівномірно розподілених в інтервалі  $(0,1)$  чисел  $X_i$ . Потім значення  $X_i$  послідовно порівнюємо з величинами  $k_g(i, j)$  за таким алгоритмом:

Якщо  $x_i \geq k_g(i,j)$ , то елемент мережі вважається несправним ( $A_{ij} = 0$ );

Якщо  $x_i < k_g(i,j)$ , то елемент мережі знаходиться в справному стані ( $A_{ij} = 1$ ).

Другий етап - перевірка структури, отриманої в результаті виходу її елементів з ладу, на зв'язність. Якщо мережа пов'язана, то результат випробувань відноситься до числа сприятливих. Відношення числа сприятливих результатів до загального числа випробувань  $N_0$  і буде оцінкою структурної надійності аналізованої мережі зв'язку.

Процедура перевірки мережі на зв'язність полягає в наступному. На мережі зв'язку, що аналізується, вибирається довільний вузол комутації. Далі одночасно з'єднують сусідні вузли комутацій зі спочатку вибраним. Ця процедура здійснюється до тих пір, поки мережа не випаде у вигляді самотньої точки (у випадку, якщо мережа зв'язна) або множини точок (якщо мережа не зв'язна). Даний метод отримав назви методу "З'єднання".

Алгоритм перевірки мережі на зв'язність методом "згортки", складається з наступних операцій:

Вибір довільного вузла комутацій (вектор-рядки  $a_p$ ) матриці  $A = \|a_{ij}\|_{s,s}$ .

Запис обраного номера вузла комутацій  $a_p$  в одновимірний масив  $P(1)$ , який має розмірність  $S$ .

Визначення сусідніх вузлів комутацій:  $a_1, \dots, a_R$ , де  $R$  - ступінь вузлів комутацій. Якщо сусідніх вузлів комутацій немає, то переходимо до кроку 7.

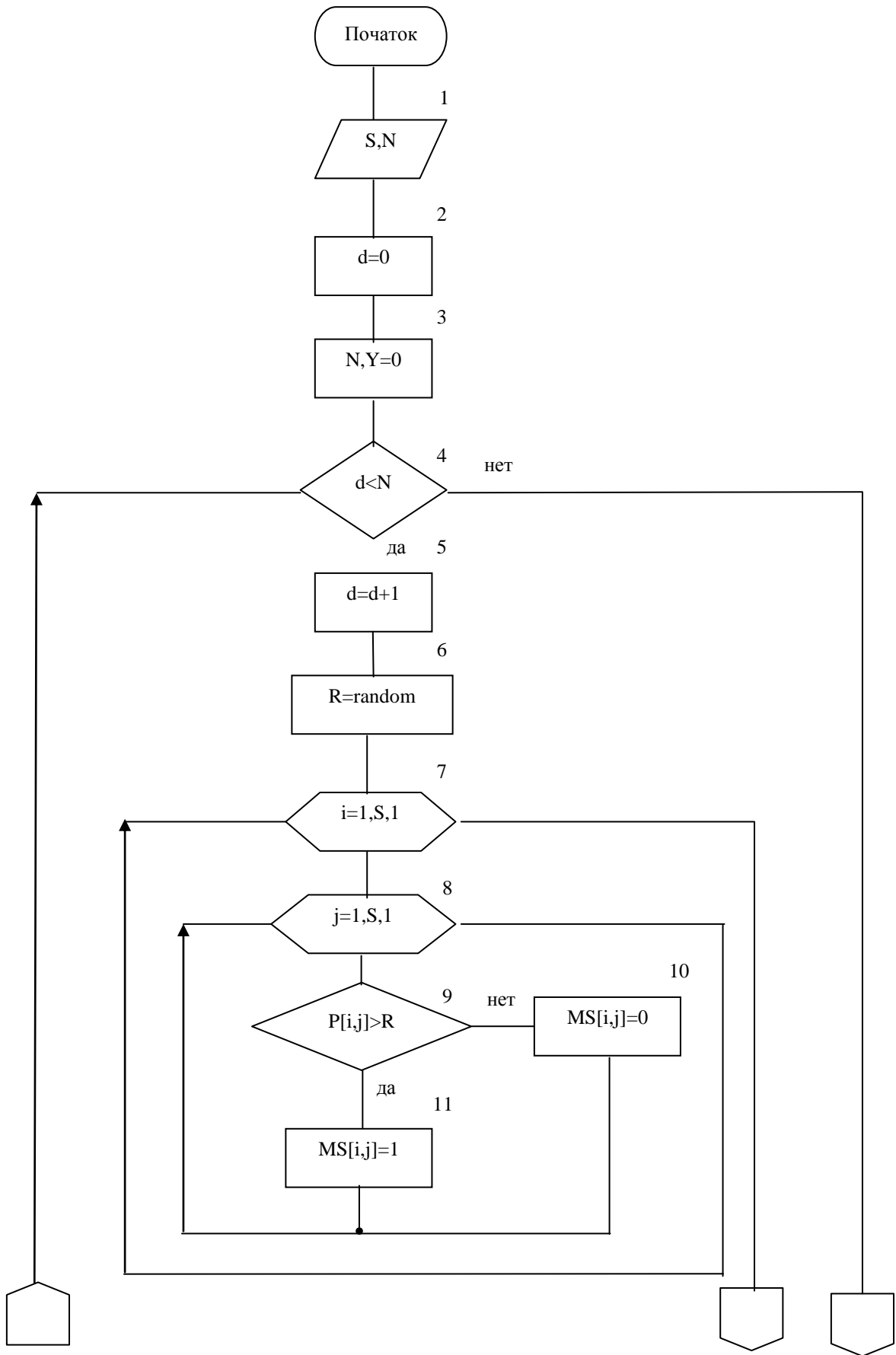
Перевірка наявності номерів сусідніх вузлів комутацій в масиві  $P(1)$ . Відсутні номери записуємо в масив  $P(1)$ .

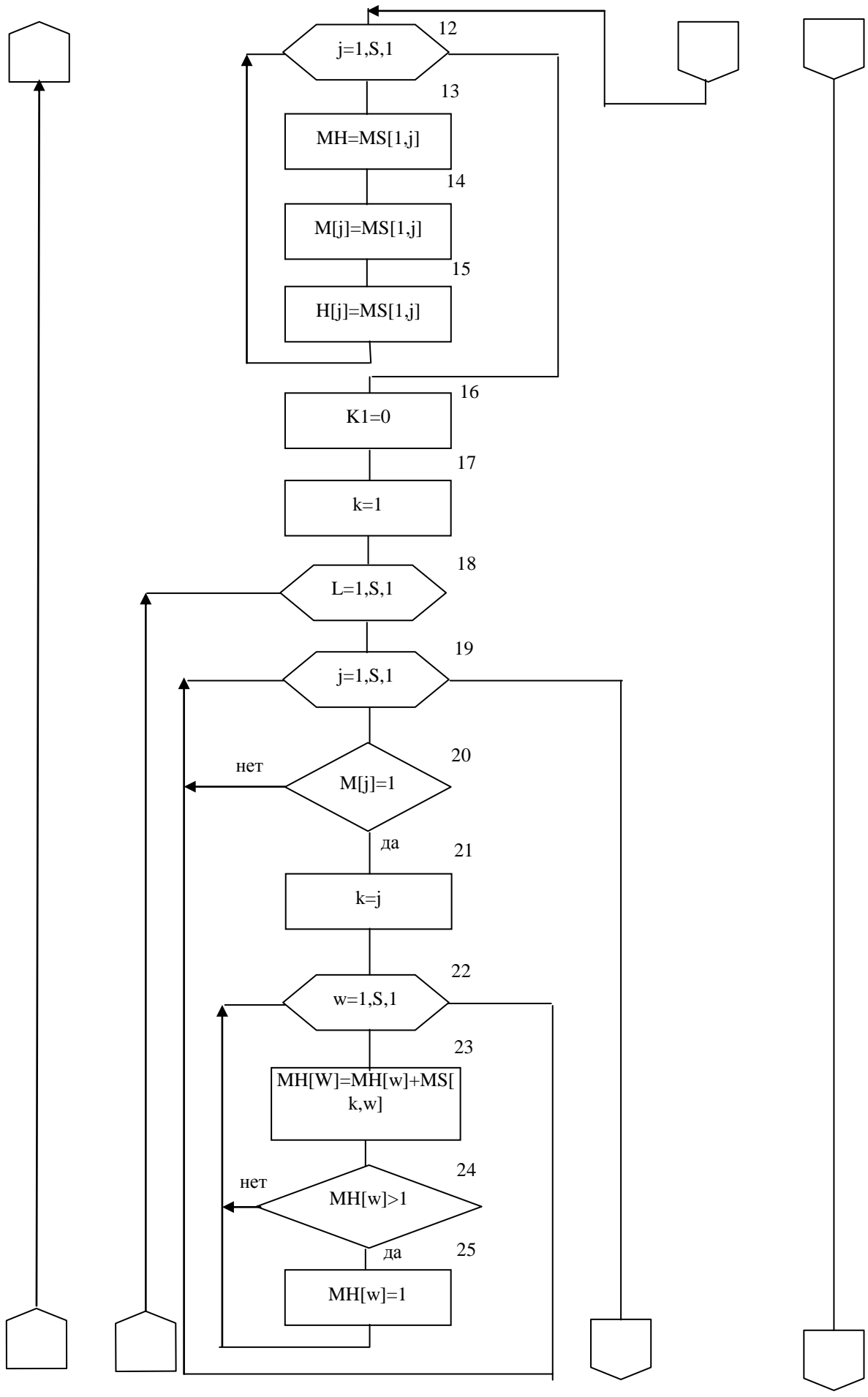
Формуємо новий вектор-рядок  $a_p^1 = a_1 \vee a_2 \vee \dots \vee a_R \vee a_p$ .

Перевіряємо:  $a_p = 1 \rightarrow$  мережа вважається зв'язною;  $a_p^1 \neq 1 \rightarrow$  повертаємось до кроку номер 3.

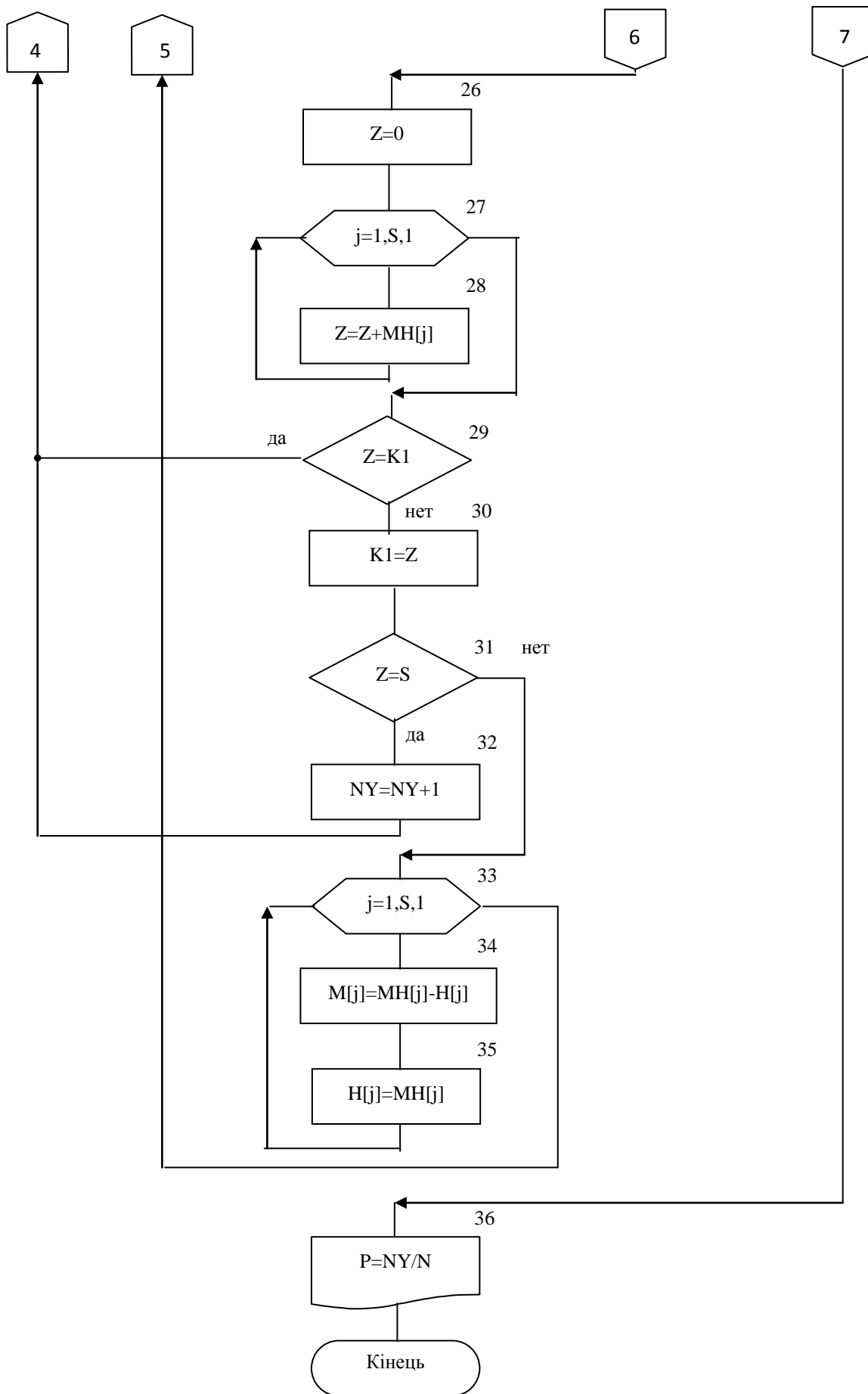
Перевіряємо: масив  $P(1)$  заповнений весь? Якщо так, то мережа вважається зв'язною. В іншому випадку мережа незв'язна.

Зобразимо алгоритм оцінки структурної надійності радіотехнічних систем методом статистичного моделювання.









### 2.1.3 Розробка програми оцінки структурної надійності радіотехнічних систем методом статистичного моделювання

Починаємо програму з опису змінних, які ми будемо використовувати по ходу програми. Задаємо два двомірних масиви, які знадобляться нам для опису матриці "суміжності" і три одновимірних масиви, які будемо використовувати при процедурі "згортки".

За допомогою процедури "kol\_node" ми здійснюємо введення кількості вузлів аналізованої системи. А за допомогою процедури "kol\_attemp" задаємо необхідну кількість випробувань.

Процедуру "number\_attemp" починаємо з обнулення всіх використовуваних масивів, так як програма зберігає дані про випробуваннях. Далі ми, за допомогою двох циклів for, задаємо матрицю "суміжності" двома способами: автоматично (param = 1) або вручну (param = 2). Цикл "while d < N" виконується до тих пір, поки не виконаються всі випробування. Потім, за допомогою генератора випадкових, чисел задаємо змінну "R" в інтервалі від 0 до 1, потім порівнюємо значення "R" з елементами матриці "суміжності". Якщо R більше елемента, то значенню елемента матриці суміжності присвоюється одиниця, а якщо R менше, то елементу присвоюється нуль. Далі проводимо процедуру перевірки мережі на "зв'язність". Якщо при складанні елементів першого рядка матриці ми отримаємо нуль, то проводити процедуру згортки НЕ треба, тому що мережа "незв'язна". Переходимо до наступного випробування. Але якщо при складанні всіх елементів рядка отримаємо суму, рівну кількості елементів, то тоді мережу "зв'язна". При наявності в рядку як нульових, так і одиничних елементів, ми проводимо процедуру згортки. У першому рядку знаходимо одиничний елемент, по положенню якого визначаємо, з рядком з яким номером ми будемо складати перший рядок. Отриманий в результаті рядок перевіряємо на зв'язність. Якщо він незв'язний, то повторюємо операцію складання (отриманий рядок складаємо з наступним рядком). Операцію проводимо до

тих пір, поки всі елементи в рядку не будуть рівні одиниці або поки всі рядки не будуть стягнуті в один. При перевірці мережі на зв'язність ми використовуємо три одновимірних масива. У масиві "h" ми зберігаємо інформацію про рядки, стягнуті на попередньому кроці, в масив "mh" заносяться номери всіх рядків, які стягнуті, а масив "m" ми використовуємо як проміжний, в ньому записана інформація про ще не стягнуті рядки.

Далі ми описуємо процедуру MENU, яка забезпечує доступ до відповідних процедур, які відповідають за введення даних і вивід результатів.

Тіло програми включає в себе тільки звернення до процедури MENU.

Текст програми приведений в додатку Г.

### 2.3 Результати дослідження структурної надійності радіотехнічних систем

Проведемо дослідження трьох типів структур систем зв'язку: повнозв'язних, стільникових і ієрархічних. Отримані в результаті дослідження дані зведемо в таблицю.

Таблиця 2.1 - Залежність надійності РТС від надійності лінії зв'язку

|            | <b>Повнозв'язні</b> | <b>Стільникові</b> | <b>Ієрархічні</b> |
|------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| $P_{л.с.}$ | $P_H$               | $P_H$              | $P_H$             |
| 0,1        | 0,286               | 0,123              | 0,028             |
| 0,3        | 0,507               | 0,292              | 0,131             |
| 0,5        | 0,654               | 0,443              | 0,248             |
| 0,7        | 0,761               | 0,619              | 0,407             |
| 0,9        | 0,907               | 0,863              | 0,772             |

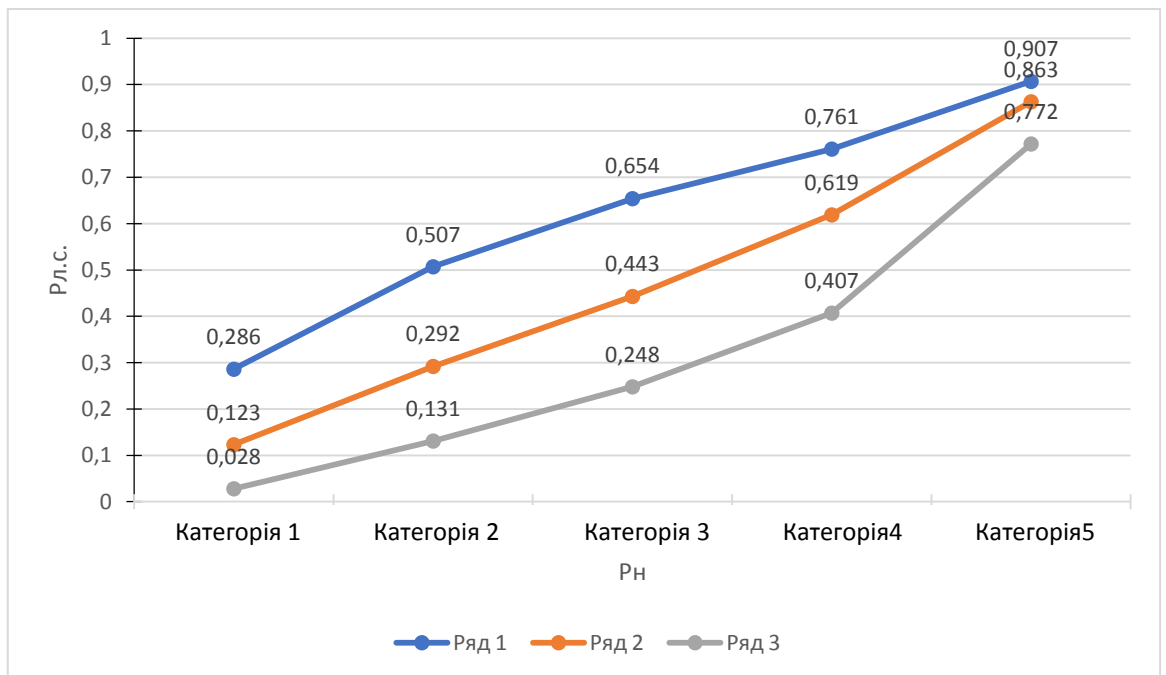


Рисунок 2.1 – Графік залежності надійності РТС від надійності лінії зв'язку.

Ряд 1 - повнозв'язні РТС; ряд 2 - стільникові РТС; ряд 3 - ієрархічні РТС.

$R_{л.с.}$  - надійність лінії зв'язку;  $P_n$  - надійність РТС

З графіка (рис. 2.1) випливає, що найбільшою надійністю володіють ієрархічні РТС.

## 2.2 Висновки

1 Аналітично показано, що методом стохастичного моделювання можна скоротити час статистичних випробувань більше, ніж в 100 разів, при достовірності отриманих результатів не гірше, ніж в разі прямого набору статистики відмов системи зв'язку.

2 Розроблено алгоритм дослідження структурної надійності радіотехнічних систем методом стохастичного моделювання та програма, що його реалізує.

3 Виконано імітаційне моделювання процесу оцінки структурної надійності повнозв'язних, стільникових і ієрархічних систем зв'язку, яке показало, що найбільш надійними є ієрархічні РТС.

### 3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

В цьому проекті розроблена імітаційна модель методу стохастичного моделювання надійності радіотехнічних систем. У економічному розділі розраховуються одноразові капітальні витрати на розробку моделі.

3.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку імітаційної моделі методу стохастичного моделювання надійності радіотехнічних систем

3.1.1 Визначення трудомісткості розробки моделі

Трудомісткість створення моделі визначається тривалістю кожної робочої операції, починаючи зі складання технічного завдання і закінчуючи оформленням документації (за умови роботи одного проектувальника):

$$t = tmз + tv + ta + tnp + tonp + t\partial [\text{год}]. \quad (3.1)$$

де  $tmз$  – тривалість складання технічного завдання на впровадження методу;

$tv$  – тривалість вивчення технічного завдання (ТЗ) та літературних джерел за темою;

$ta$  – тривалість розробки моделі;

$tnp$  – тривалість модулювання віртуального аналога каналу зв'язку;

$tonp$  – тривалість опрацювання здобутих характеристик;

$t\partial$  – тривалість підготовки технічної документації.

Вихідні дані для визначення трудомісткості створення моделі приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Тривалість розробки моделі

| $t_{mз}$ ,<br>год | $t_{в}$ ,<br>год | $t_{а}$ ,<br>год | $t_{np}$ ,<br>год | $t_{onp}$ ,<br>год | $t_{\partial}$ ,<br>год |
|-------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|
| 40                | 45               | 60               | 25                | 20                 | 30                      |

Розрахуємо трудомісткість розробки моделі за формулою (3.1):

$$t = 40+45+60+25+20+30=200 \text{ [год]}.$$

### 3.1.2 Розрахунок витрат на розробку моделі

Витрати на розробку моделі  $K_{пз}$  складаються з витрат на заробітну платню розробника  $З_{пн}$  і вартості витрат машинного часу, що необхідний для опрацювання моделі мережі на ПК  $З_{мч}$ :

$$K_{пз} = З_{пн} + З_{мч} \text{ [грн]} \quad (3.2)$$

Заробітна плата виконавця враховує основну і додаткову заробітну плату, а також відрахування на соціальні потреби (пенсійне страхування, страхування на випадок безробіття, соціальне страхування тощо) і визначається за формулою:

$$З_{пн} = t \cdot З_{пр} \text{ [грн]}. \quad (3.3)$$

де  $t$  – трудомісткість створення моделі;

Зпр дорівнює 60 грн/год.

Розрахуємо заробітну платню проектувальника за формулою (3.3):

$$Z_{zn} = 200 \cdot 60 = 12000 \text{ [грн]}.$$

Вартість машинного часу на ПК визначається за формулою:

$$C_{мч} = P_e \cdot t \cdot C_e + \frac{\Phi_{перв} \cdot H_a}{F_p} + \frac{K_{лнз} \cdot H_{анз}}{F_p} \text{ [грн/год]}, \quad (3.5)$$

де  $C_{мч}$  – вартість 1 години машинного часу ПК, грн/година.

Вартість 1 години машинного часу ПК визначається за формулою:

$$C_{мч} = P_e \cdot t \cdot C_e + \frac{\Phi_{перв} \cdot H_a}{F_p} + \frac{K_{лнз} \cdot H_{анз}}{F_p} \text{ [грн/год]}, \quad (3.5)$$

де  $P_e$  – встановлена потужність ПК;

$t$  – трудомісткість створення моделі;

$C_e$  – енерговитрати;

$\Phi_{перв}$  – первісна вартість ПК на початок року;

$H_a$  – річна норма амортизації на ПК;

$K_{лнз}$  – вартість ліцензійного програмного забезпечення;

$H_{анз}$  – річна норма амортизації на ліцензійне програмне забезпечення;

$F_p$  – річний фонд робочого часу (за 40-годинного робочого тижня).

Енерговитрати розраховуються за формулою:

$$C_e = P_e \cdot C_{кВт} \text{ [грн/год]}, \quad (3.6)$$

де  $C_{кВт}$  – тариф на електричну енергію.



Розрахунок витрат на розробку моделі зводимо в таблицю 3.2

Таблиця 3.2 – Розрахунок витрат на розробку моделі

| $P_e$ ,<br>кВт | $C_{кВт}$<br>кВт·год | $\Phi_{перв}$ ,<br>грн | $На$ ,<br>частка<br>одиниці | $Клнз$ ,<br>грн | $Напз$ ,<br>частка<br>одиниці | $F_p$ ,<br>год |
|----------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|
| 1,3            | 1,60                 | 19500,00               | 0,4                         | 6500,00         | 0,4                           | 1920,00        |

Тоді за формулою (3.6) отримаємо розмір енерговитрат:

$$C_e = 1,3 \cdot 1,60 = 2,08 \text{ [грн/год]}.$$

Річна норма амортизації, якщо використовується метод прискорення зменшеної вартості, визначається за формулою:

$$На = 2/T \cdot 100\% \quad (3.7)$$

де  $T$  – строк корисного використання ПК, дорівнює 5 років.

Розрахуємо річну норму амортизації за формулою (3.7):

$$На = 2/5 \cdot 100\% = 40\% = 0,40 \text{ [частки одиниці]}.$$

Строк корисного використання ліцензійного програмування дорівнює 5 років.

Річна норма амортизації на ліцензійне програмне забезпечення визначається за формулою (3.7):

$$Напз = 2/5 \cdot 100\% = 40\% = 0,40 \text{ [частки одиниці]}.$$

Ліцензійне програмне забезпечення, яке використовується в даному випадку Microsoft Windows 7 Professional. Його вартість 6500,00 грн.

Вартість 1 години машинного часу ПК визначаються за формулою (3.5):

$$C_{мч} = 1,3 \cdot 200 \cdot 1,60 + \frac{19500 \cdot 0,40}{1920} + \frac{6500 \cdot 0,40}{1920} = 421,41 \text{ [грн/год]}$$

Розрахуємо вартість машинного часу за формулою (3.4):

$$Z_{мч} = (60 + 25 + 20 + 30) \cdot 421,41 = 56835,00 \text{ [грн]}.$$

Отже, підставивши отримані результати у формулу (3.2), отримаємо величину витрат на розробку моделі:

$$K_{пз} = 12000 + 56835,00 = 68835,00 \text{ [грн]}.$$

### 3.1.3 Розрахунок капітальних витрат

Загальні капітальні витрати на розробку визначаються за формулою:

$$KЗ = K_{пз} + K_{навч} + K_n \text{ [грн]}, \quad (3.8)$$

де  $K_{навч}$  - витрати на навчання технічних фахівців і обслуговуючого персоналу;

$K_n$  - Витрати на встановлення обладнання та налагодження системи.

Дані о витратах на розробку моделі зводимо в таблицю 3.3

Таблиця 3.3 – Витрати на розробку моделі

| $K_{пз}$ ,<br>грн | $K_{навч}$ ,<br>грн | $K_n$ ,<br>грн |
|-------------------|---------------------|----------------|
| 68835,00          | 5800,00             | 1250,00        |

Отже, капітальні витрати становлять:

$$KЗ = 68835,00 + 5800,00 + 1250,00 = 75885,00 \text{ [грн]}.$$

### 3.2 Висновки

В економічному розділі було розраховано:

- 1 Трудомісткість розробки імітаційної моделі методу стохастичного моделювання надійності радіотехнічних систем – 200 год;
- 2 Заробітна платня проєктувальника – 12000 ,00 грн;
- 3 Витрати на розробку моделі – 68835,00 грн;
- 4 Капітальні витрати на розробку моделі – 75885,00 грн.

## **ВИСНОВКИ**

У цій дипломній роботі отримані наступні результати:

1 Виконаний огляд існуючих методів оцінки структурної надійності радіотехнічних систем.

2 Аналітично показано, що методом стохастичного моделювання можна скоротити час статистичних випробувань більше, ніж в 100 разів, при достовірності отриманих результатів не гірше, ніж в разі прямого набору статистики відмов системи зв'язку.

3 Розроблено алгоритм дослідження структурної надійності радіотехнічних систем методом стохастичного моделювання та програма, що його реалізує.

4 Виконано імітаційне моделювання процесу оцінки структурної надійності повнозв'язних, стільникових і ієрархічних систем зв'язку, яке показало, що найбільш надійними є ієрархічні РТС.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты // под ред. В.И. Борисова; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.
- 3 Васильев А.В. Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов (работ): Учеб. пособие/ Изд-во СПбГЭТУ, 2002. - 24 с.
- 4 Экономика связи: Учебник для вузов/О. С. Срапионов, М. А. Горелик, В. И. Холодарь и др.; Под ред. О. С. Срапионов. – М.: Радио и связь, 2012. – 320 с.
- 5 Грузинов В.П., Грибов В.Д. Экономика предприятия: Учеб. пособие – М.: Финансы и статистика, 2005. – 208 с.
- 6 Экономика предприятия / Под ред. Е.Л.Кантора. – СПб.: Питер, 2006. – 352 с.
- 7 Ворона, В. А. Радиопередающие устройства. Основы теории и расчета : учеб. пособие для вузов / В. А. Ворона. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 384 с.
- 8 Галкин, В. А. Цифровая мобильная радиосвязь : учеб. пособие для вузов / В. А. Галкин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 432 с.

9 Устройства генерирования и формирования радиосигналов Л. А. Белов [и др.]; под ред. Г. М. Уткина, В. Н. Кулешова, М. В. Благовещенского – М. : Радио и связь, 1994.

10 Проектирование радиопередатчиков / В. В. Шахгильдян [и др.]; под ред. В. В. Шахгильдяна. – М. : Радио и связь, 2000.

11 Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968.  
Бойченко В.М., Гладкий В.С., Черный Е.И. Аналого-вероятностное моделирование систем из ненадежных элементов. - Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, 1967, №1.

12 Гладкий В.С. Вероятностные вычислительные модели. М.: Наука, 1973.300с.

13 Гладкий В.С., Данилов А.Н. Новиков С.Н. Программа оценки структурной надежности сетей связи / Гос. ФАП СССР. - М., 1987.

14 Малиновский С.Т. Сети и системы передачи дискретной информации и АСУ / Учебник для электротехнических институтов связи. М.: Связь, 1979.384с.

15 Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов / Под ред.В.С. Семенихина. - М.: Радио и связь, - 408с

16 Толчан А.Я. О связности сети. Принципы построения сетей и систем управления. М.: Наука, 1964.

| № | Формат | Найменування | Кількість<br>листів | Примітки |
|---|--------|--------------|---------------------|----------|
|---|--------|--------------|---------------------|----------|

**ДОДАТОК А. Відомість матеріалів дипломної роботи**

| <i>Документація</i> |    |   |  |               |
|---------------------|----|---|--|---------------|
| 1                   | A4 | Реферат                                       |  |               |
| 2                   | A4 | Список умовних скорочень                      |  |               |
| 3                   | A4 | Зміст   |  |               |
| 4                   | A4 | Вступ   |  |               |
| 5                   | A4 | Стан питання.<br>Постановка задачі            |  |               |
| 6                   | A4 | Спеціальна частина                            |  |               |
| 7                   | A4 | Економічний розділ                            |  |               |
| 8                   | A4 | Висновки                                      |  |               |
| 9                   | A4 | Перелік посилань                              |  |               |
| 10                  | A4 | Додаток А                                     |  |               |
| 11                  | A4 | Додаток Б                                     |  |               |
| 12                  | A4 | Додаток В                                     |  |               |
| 12                  |    | Матеріали дипломної роботи на оптичному носії |  | Оптичний диск |

**ДОДАТОК Б. Відгук керівника економічного розділу**

---



---





Студента(ки)

гр.

\_\_\_\_\_ (прізвище, ім'я)

на тему: \_\_\_\_\_

Актуальність теми \_\_\_\_\_

Повнота розкриття теми \_\_\_\_\_

Теоретичний рівень \_\_\_\_\_

Практична значущість \_\_\_\_\_

Самостійність виконання роботи \_\_\_\_\_

Якість оформлення, загальна та спеціальна грамотність \_\_\_\_\_

Переваги та недоліки роботи \_\_\_\_\_

Загальна оцінка роботи та висновок щодо рекомендації до захисту в ДЕК \_\_\_\_\_

---

---

Науковий керівник

к.ф.-м.н., професор

\_\_\_\_\_

(посада)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Гусєв О.Ю.

\_\_\_\_\_

(ініціали, прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ДОДАТОК Г Програма**

**ПРОГРАМА.**

uses crt;

```
Label 1;
Var
F1: text;
k1,n1,N,Ny, i,j,s,L,z,w,k,d: integer;
P: array [1. .50,1. .50] of real;
MS: array [1. .55,1. .55] of integer;
R: real;
m,h,mh: array [1. .66] of integer;
key: char;
PROCEDURE kol_node;
var r_key: char;
begin
repeat
window (1,1,80,25);
clrscr;
ASSIGN (F1,'FF1. txt');
rewrite (F1);
n1: =1;
write ('введите кол-во узлов s=');
readln (s);
r_key: =#27;
until r_key=#27;
close (f1);
end;
PROCEDURE kol_attemp;
var r1_key: char;
begin
window (1,1,80,25);
textbackground (blue);
```

```
clrscr;
repeat
write ('количество испытаний N=');
readln (N);
Ny: =0;
r1_key: =#27;
until r1_key=#27;
end;
PROCEDURE number_attemp;
label 1,2;
var param: byte;
d: integer;
begin
window (1,1,80,25);
textbackground (black);
clrscr;
assign (f1,'ff1. txt');
append (f1);
d: =0;
Ny: =0;
for i: =1 to s do
begin
m [i]: =0;
h [i]: =0;
mh [i]: =0;
for j: =1 to s do
begin
P [i,j]: =0;
MS [i,j]: =0;
```

```
end;
end;
2: clrscr;
writeln ('Для автоматического ввода введите - 1');
writeln ('Для ручного ввода введите - 2');
readln (param);
if param=2 then
begin
n1: =1;
for i: =1 to s do
begin
n1: =n1+1;
for j: =n1 to s do
begin
write ('введите P [' , i , ',' , j , ' ] =');
read (P [i,j]);
P [j, i]: =P [i,j] ;
end;
writeln;
END;
end;
if param=1 then
begin
n1: =1;
for i: =1 to s do
begin
n1: =n1+1;
for j: =n1 to s do
begin
```

```

P [i,j]: =random;
P [j, i]: =P [i,j] ;
end;
END;
end;
if (param<>1) and (param<>2) then goto 2;
for i: =1 to s do P [i, i]: =1;
for i: =1 to s do
begin
for j: =1 to s do
begin
write (' ',P [i,j]: 1: 3);
write (F1,' ',P [i,j]: 2: 3);
end;
writeln;
writeln (F1);
end;
1: while d<N do
begin
d: =d+1;
writeln (F1,'номер испытания N=',d);
R: =random;
writeln (F1,'R=',R: 1: 3);
for i: =1 to s do
begin
for j: =1 to s do
begin
if P [i,j] >R then MS [i,j]: =1
ELSE MS [i,j]: =0;

```

```

write (F1, ' ',MS [i,j]);
end;
writeln (F1);
end;
k: =1;
k1: =0;
for j: =1 to s do
begin
mh [j]: =ms [1,j] ;
m [j]: =ms [1,j] ;
h [j]: =ms [1,j] ;
end;
FOR l: =1 to S do
begin
for j: =1 to s do
if m [j] =1 then
begin
k: =j;
for w: =1 to s do
begin
mh [w]: =mh [w] +MS [k,w] ;
if mh [w] >1 then mh [w]: =1;
end;
end;
z: =0;
for j: =1 to s do
z: =z+mh [j] ;
if z=k1 then
begin

```



```
writeln (F1,'несвязна');
goto 1;
end;
k1: =z;
if z=s then
begin
writeln (F1,'связна');
Ny: =Ny+1;
goto 1;
end;
for j: =1 to s do
begin
m [j]: =mh [j] -h [j] ;
h [j]: =mh [j] ;
end;
end;
end;
writeln;
for i: =1 to s do
write (MS [n, i], ' ');
writeln;
if z=s then writeln ('связна') else writeln ('несвязна');
writeln;
writeln ('PH=',Ny/N: 1: 3);
writeln (F1,'PH=',Ny/N: 1: 3);
close (F1);
readln;
readln;
end;
```

```
PROCEDURE MENU;
label ret;
var i,j,x: integer;
lin: integer;
s: array [1..5] of string;
begin
key:=#0;
textbackground (7);
clrscr;
gotoxy (20,7);
textcolor (red);
write ('РАСЧЕТ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЕТИ РТС');
textcolor (white);
window (8,9,70,14);
textbackground (blue);
clrscr;
gotoxy (2,1); write ('+');
gotoxy (62,1); write ('+');
gotoxy (2,6); write ('+');
gotoxy (62,6); write ('+');
for j: =2 to 5 do
begin
gotoxy (2,j); write ('|');
gotoxy (62,j); write ('|');
end;
for i: =3 to 61 do
begin
gotoxy (i,1); write ('-');
gotoxy (i,6); write ('-');
```

```
end;
window (10,10,70,14);
textbackground (green);
textcolor (white);
s [1]: ='Количество узлов ';
s [2]: ='Количество испытаний ';
s [3]: ='Расчет ';
s [4]: ='Выход ';
writeln (s [1]);
textbackground (blue);
for x: =2 to 4 do
writeln (s [x]);
lin: =1;
repeat
repeat until keypressed;
if keypressed then
begin
key: =readkey;
if key=#0 then key: =readkey;
end;
if key=#80 then
begin
gotoxy (1,lin);
textbackground (blue);
write (s [lin]);
if lin<4 then lin: =lin+1 else lin: =1;
gotoxy (1,lin);
textbackground (green);
write (s [lin]);
```

```
end;
if key=#72 then
begin
gotoxy (1,lin);
textbackground (blue);
write (s [lin]);
if lin>1 then lin: =lin-1 else lin: =4;
gotoxy (1,lin);
textbackground (green);
write (s [lin]);
end;
if key=#13 then
begin
case lin of
1: kol_node;
2: kol_attemp;
3: number_attemp;
4: key: =#27;
end;
end;
until (key=#27) or (key=#13);
window (1,1,80,25);
textbackground (black);
clrscr;
end;
BEGIN
repeat
MENU;
until key=#27;
```

end.

