

**Міністерство освіти і науки України  
Харківська національна академія міського  
господарства**

**М.І.Самойленко, І.О.Гавриленко**

**ФУНКЦІОНАЛЬНА НАДІЙНІСТЬ  
ТРУБОПРОВІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ  
СИСТЕМ**

*За редакцією М.І.Самойленка*

**Харків – ХНАМГ – 2009**

ББК 65.9(2)441

С17

УДК 681.32:519.713

Рекомендовано Вченою радою Харківської національної академії міського господарства як монографія, протокол № 9 від 25 квітня 2008 р.

**Самойленко М.І., Гавриленко І.О.**

**С17 Функціональна надійність трубопровідних транспортних систем / За ред. М.І. Самойленка– Харків: ХНАМГ, 2009. – 184 с.**

Викладаються математичні моделі й методи розрахунку функціональної надійності трубопровідних транспортних систем із складною мережною структурою. Розглядається використання методу для порівняльного аналізу за критерієм функціональної надійності різних конструкцій магістральних трубопровідних систем.

Розраховано на наукових і інженерно-технічних працівників науково-дослідних, проектних і виробничих організацій, пов'язаних з проектуванням і експлуатацією магістральних і розподільних трубопровідних систем.

Табл. – 7. Рис. – 49. Бібліогр. – 49 назв.

Рецензенти:

зав. кафедри транспортних систем та логістики Харківської національної академії міського господарства, д-р техн. наук, проф. В.К.Доля;

зав. кафедри прикладної математики Харківського національного університету радіоелектроніки, д-р техн. наук, проф. А.Д.Тевяшев

ISBN 978–966–695–125-3

© Харківська національна академія міського господарства,  
Самойленко М.І.,  
Гавриленко І.О., 2009

## Зміст

Передмова . . . . .	6
Розділ 1	
<b>Опис предметної області, огляд проблеми, цілі і завдання дослідження . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1. Загальна характеристика трубопровідних транспортних систем як об'єкта дослідження . . . . .	9
1.2. Функціональна надійність трубопровідних транспортних систем як предмет дослідження . . . . .	16
1.3. Аналіз показників якості функціонування трубопровідних транспортних систем . . . . .	21
1.4. Цілі дослідження . . . . .	26
1.5. Трубопровідні транспортні системи Харківського регіону як практична база досліджень . . . . .	30
1.5.1. Система газопостачання Харківського регіону . . . . .	30
1.5.2. Система водопостачання Харківського регіону . . . . .	36
1.6. Роль і місце функціональної надійності в процесах експлуатації і розвитку трубопровідних транспортних систем . . . . .	39
1.7. Експлуатація і розвиток трубопровідних транспортних систем з урахуванням надійності . . . . .	46
1.8. Завдання дослідження . . . . .	53
Розділ 2	
<b>Методи оцінки надійності трубопровідних транспортних систем . . . . .</b>	<b>56</b>
2.1. Загальна характеристика методів і показників надійності трубопровідних систем . . . . .	56
2.2. Аналіз чинників невизначеності у процесах експлуатації трубопровідних систем . . . . .	63

## Зміст

2.3.	Аналіз потоків відмови і відновлення у трубопровідних транспортних системах . . . . .	65
2.4.	Трубопровідна транспортна система як система масового обслуговування . . . . .	69
2.5.	Усереднення показників знаходження трубопровідної транспортної мережі у справному й несправному стані . . . . .	78

## Розділ 3

### **Функціональна надійність розподільних трубопровідних транспортних систем**

3.1.	Математична модель трубопровідних транспортних систем . . . . .	86
3.2.	Надійність аварійно-ремонтних зон розподільної трубопровідної мережі . . . . .	91
3.3.	Функціональна надійність мережі щодо споживачів аварійно-ремонтної зони . . . . .	95
3.4.	Розрахунок функціональної надійності мережі щодо аварійно-ремонтної зони. . . . .	99
3.5.	Основи методу розрахунку функціональної надійності трубопровідних мереж . . . . .	105
3.5.1.	Формування математичної моделі складної трубопровідної транспортної мережі. . . . .	107
3.5.2.	Розбивка зваженого графа трубопровідної мережі на підграфи аварійно-ремонтних зон. . . . .	108
3.5.3.	Розрахунок технічної надійності аварійно-ремонтних зон . . . . .	120
3.5.4.	Побудова зваженого графа аварійно-ремонтних зон . . . . .	121
3.5.5.	Побудова розрахункових моделей функціональної надійності мережі. . . . .	124
3.5.6.	Аналіз і корекція розрахункових моделей . . . . .	125
3.5.7.	Розрахунок функціональної надійності мережі . . . . .	126

## Розділ 4

### **Функціональна надійність магістральних трубопровідних транспортних систем**

4.1.	Особливості магістральних трубопровідних транспортних систем і способи підвищення їх функціональної надійності . . . . .	130
------	--	-----

4.2.	Функціональна надійність магістральних трубопровідних транспортних систем з урахуванням надійності й місця розташування перемичок . . . . .	139
4.2.1.	Функціональна надійність двох паралельних трубопроводів з урахуванням надійності перемички . . . . .	141
4.2.2.	Оптимальне розташування перемичок у магістральних трубопроводах. . . . .	146
4.3.	Метод розрахунку функціональної надійності в порівняльному аналізі конструкцій магістральних трубопроводів . . . . .	155
4.3.1.	Розрахунок функціональної надійності магістральної мережі з перемичками <i>A</i> -типу . . . . .	156
4.3.2.	Розрахунок функціональної надійності магістральної мережі з перемичками <i>B</i> -типу . . . . .	161
4.3.3.	Розрахунок функціональної надійності магістральної мережі з перемичками <i>C</i> -типу . . . . .	166
4.3.4.	Порівняльний аналіз показників надійності магістральних мереж із різними конструкціями перемички	169
4.4.	Магістральна трубопровідна мережа з абсолютною ремонтпридатністю	172
	Післямова . . . . .	174
	Словник термінів . . . . .	177
	Список літератури . . . . .	180

## ***Передмова***

Переведення економіки України на ринкові відносини обумовлює нові виробничі стосунки між суб'єктами господарської діяльності, висуває нові вимоги до засобів виробництва.

Будь-який підприємець, який вкладає особисті матеріальні кошти у виробництво або несе відповідальність за використання державних коштів, хоче бути впевненим в отриманні позитивного кінцевого результату. З цією метою розробляється бізнес-план, аналіз якого може дати відповідь на запитання, яка доцільність тій або іншій виробничій інновації. Основний показник бізнес-плану – отриманий прибуток – є важливою характеристикою ефективності прийнятих рішень. Але в умовах жорсткої конкуренції керуватися тільки одним прибутком, який би він не був привабливий, – це неприпустима вільність, здатна загубити самі перспективні починання і призвести до небажаних результатів. Щоб уникнути невинуватого ризику, треба при оцінці ефективності прийнятих рішень обов'язково враховувати показник надійності.

Надійність прийнятого рішення є гарантом його доцільності. Якщо надійність опиниться нижче припустимої, то квапитися з прийняттям рішення не варто, а доцільно передбачити й здійснити заходи щодо підвищення надійності.

Надійність являє собою комплексне поняття, що містить в собі різні аспекти функціонування складних виробничих систем, визначає різні особливості прийнятих виробничих рішень і оцінює різні можливі їхні наслідки. В умовах ринкової економіки для досягнення високої економічної ефективності виробництва необхідно враховувати всі якісні й кількісні показники, що відповідають різним компонентам надійності. При цьому, поряд з технічними

складовими надійності (безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та ін.), треба враховувати функціональні складові (імовірність вирішення поставленого завдання, ступінь задоволення споживчих вимог і т.п.).

Враховувати показник надійності, будь то якісний або кількісний, означає: аналізувати його можливі значення при різних умовах функціонування і різних станах виробничої системи; шукати шляхи підвищення цих значень; порівнювати й вибирати з них найбільш ефективні. У будь-якому випадку для врахування показника, особливо кількісного, необхідно мати точну інженерну методику обчислення його значень або хоча б методику оцінки цих значень.

Визначення кількісних показників надійності для великих і складних технічних систем – дуже складне завдання, що вимагає наукового підходу, тобто розробку адекватних математичних моделей і методів розрахунку. Далеко не для всіх існуючих систем таке завдання можна вирішити. Навіть часткове розв'язання розглядуваної проблеми (оцінка кількісного показника, розробка квазі-адекватної моделі надійності, практична реалізація одного або декількох етапів методу розрахунку і т.п.) має велике значення. Особливу актуальність проблема розрахунку надійності набуває для складних транспортних систем, у тому числі трубопровідних, де недооцінка надійності може призвести до транспортних або екологічних катастроф.

Ця книга присвячена розробці нових математичних моделей і методів розрахунку кількісних показників безвідмовного функціонування складних магістральних і розподільних трубопровідних систем. В основу її покладені наукові дослідження, що проводилися протягом останнього десятиліття (1997 – 2007 р. р.) колективом учених кафедри прикладної математики й інформаційних технологій Харківської національної академії міського господарства у складі Самойленка М.І., Гавриленко І.О., Рудя І.О., Протопової В.П., Передерій Т.С.

Автори сподіваються, що запропонований у даній книзі підхід буде покладений в основу стандартних методів розрахунку функціональної надійності складних інженерних і транспортних мереж, в першу чергу, мереж магістрального трубопровідного транспорту

Передмова

і комунальних розподільних систем (водопровідних, теплопровідних, газопровідних і каналізаційних).

Автори дякують головному інженеру комунального підприємства «СПКБ АСУ водопостачанням», д.т.н. Панасенко О.О. і головному інженеру ВАТ «Харківміськгаз», к.т.н. Седаку В.С. за консультаційну підтримку і надання практичної бази для апробації наукових результатів дослідницької роботи з тематики монографії.

*Автори*



## РОЗДІЛ 1

### ОПИС ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ, ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ, ЦІЛІ Й ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1. Загальна характеристика трубопровідних транспортних систем як об'єкта дослідження

Трубопровідні транспортні системи (ТТС) являють собою, з одного боку, підклас інженерних мережних систем, а з іншого – підклас транспортних систем. Класифікаційна схема на рис. 1.1 ілюструє «симбіозний» характер ТТС стосовно транспорту й інженерних мереж. Дану схему слід вважати умовною, оскільки вона не відбиває всього різноманіття ознак класифікації і, відповідно, усіх можливих типів транспортних і мережних систем. Так, у ній не враховується те, що транспортні системи можуть бути поділені:

- за характером призначення – на системи загального користування і промислові;
- за характером об'єктів перевезень – на пасажирські й вантажні;
- за територіальною ознакою – на регіональні й загальнодержавні (міжрегіональні);
- за формою власності – на приватні й державні;
- за рядом інших ознак.

Відзначимо також, що глибина класифікації для трубопровідних систем вище, ніж для інших типів транспортних систем. Пояснюється це тим, що основне призначення схеми на рис. 1.1 – це не показати саму класифікацію, а визначити в першому наближенні об'єкт подальших досліджень і його місце серед інших об'єктів, близьких за своєю суттю.

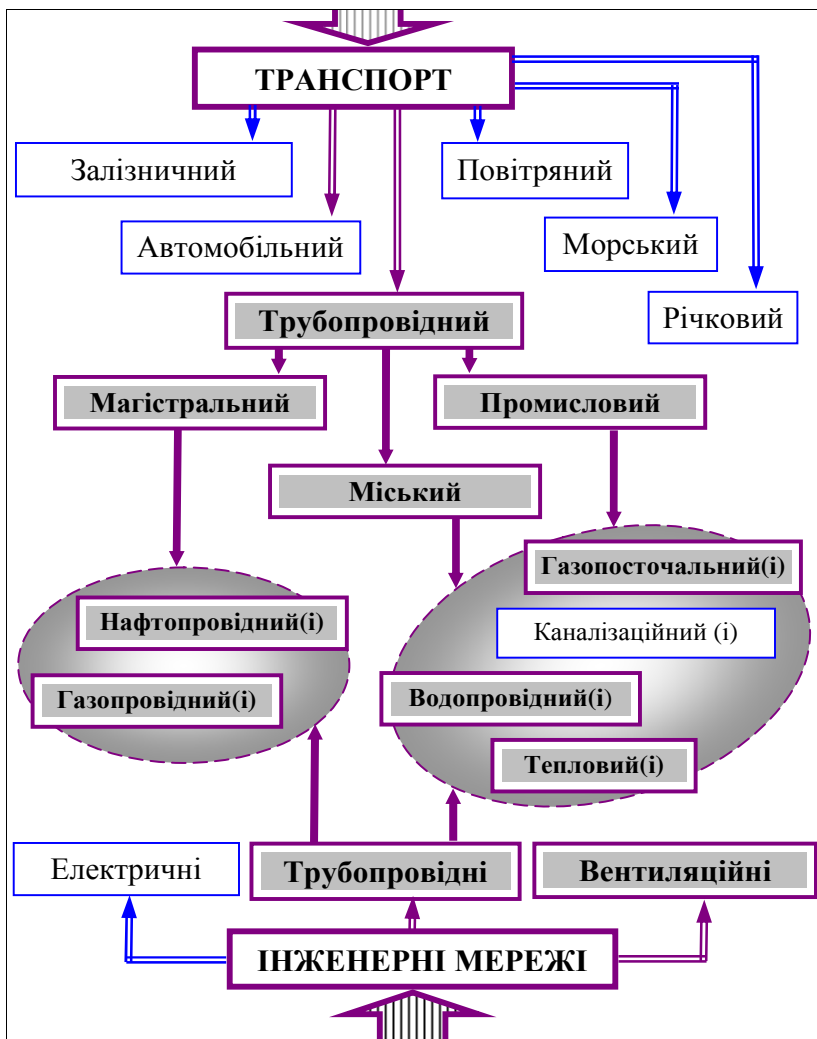


Рис. 1.1 – Класифікаційна схема об'єкта дослідження

Таким чином, схема покликана виділити ті мережні трубопровідні системи, що є об'єктом подальшого розгляду, і відокремити від них ті транспортні системи й інженерні мережі, що не є такими і не можуть служити об'єктом додатку для основних наукових результатів цієї роботи. На схемі об'єкт дослідження виділений сірим фоном і напівжирним шрифтом.

Найбільш важливі відмінні риси ТТС закладені в їх *призначенні й мережній просторовій структурі*. Саме ці особливості й покладені в основу класифікаційної схеми.

Розглянемо ключові особливості (ознаки) об'єкта дослідження докладніше. Усі транспортні трубопровідні системи мають однакове призначення, а саме: вони повинні *забезпечити споживачів систем цільовим продуктом у заданій кількості й заданій якості*.

Універсальність визначення розглянутої особливості – призначення – досягається за рахунок використання узагальнюючих термінів: «споживач», «цільовий продукт», «задана кількість», «задана якість».

У ролі споживачів можуть виступати як окремі особи й організації (у муніципальних системах життєзабезпечення), так і окремі виробничі підрозділи й навіть підприємства (у промислових системах сировинного забезпечення виробництва).

Як цільовий продукт можуть виступати питна або технічна вода, природний газ, стиснуте повітря, тепло, нафта, сипучі матеріали і т.п.

Термін «задана кількість» потребує від системи певної продуктивності, яка повинна бути не нижче вимог споживачів. Іншими словами, кількість цільового продукту від джерел постачання в ТТС має бути не менше сумарної потреби в ньому. Кількість цільового продукту може задаватися в одиницях виміру об'єму, ваги, тепла і т.п.

Термін «задана якість» диктує системі додаткові вимоги до продукту, що транспортується. Ці вимоги, як правило, вказують на нижній припустимий поріг тих або інших параметрів цільового продукту, крім його кількості. У якості таких параметрів можуть виступати тиск, температура, ступінь очищення та ін.

Оглядовий розділ

Різноманітність можливих значень узагальнюючих термінів приводить до досить широкого охоплення систем, що можуть вважатися об'єктом дослідження.

Конкретизація узагальнюючих термінів знімає універсальність визначення розглянутих систем і, в підсумку, приводить до виділення з множини існуючих ТТС певного виду систем.

Друга ключова особливість об'єкта дослідження – це його конструктивна реалізація у вигляді *просторової мережі трубопроводів*.

Більшість міських (муніципальних) і виробничих ТТС є складними мережними системами життєзабезпечення. Мережна структура систем дозволяє домогтися виконання їхніх функціональних завдань при меншій сумарній довжині трубопроводів.

Дійсно, сумарна довжина трубопроводів при немережній організації системи, коли кожний з них з'єднує джерело цільового продукту тільки з одним споживачем (рис. 1.2,а), набагато більше сумарної довжини трубопроводів при мережній організації (рис. 1.2,б). В останньому випадку декілька споживачів можуть обслуговуватися одним трубопроводом або декількома трубопроводами, що мають спільну ділянку. До того ж трубопроводи, що примикають до кінцевих користувачів, допускають значне зменшення діаметра труб, а, отже, і зниження їхньої собівартості.

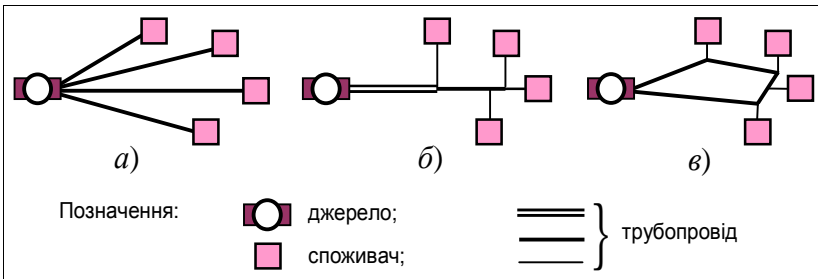


Рис. 1.2 – Можливі структури трубопровідних мереж

Мережна організація системи, як правило, дозволяє транспортувати цільовий продукт до споживача за декількома маршрутами (рис. 1.2,в). У цьому випадку вихід з ладу якогось трубопроводу не приводить до припинення постачання продукту споживачеві незалежно від того, де в мережі знаходиться пошкоджений трубопровід. У реальних трубопровідних системах життєзабезпечення часто вдаються до кільцевої організації трубопроводів (рис. 1.2,в) або їх розташування в «щільниковому» порядку, продиктованому конфігурацією житлових кварталів. Така організація ТТС підсилює мережний характер системи і забезпечує високу надійність постачання цільового продукту.

Таким чином, мережна організація ТТС, з одного боку, сприяє скороченню капітальних і експлуатаційних витрат за рахунок зменшення сумарної довжини трубопроводів і раціонального вибору діаметра труб, з іншого - підвищує імовірність виконання функціональних завдань системи за рахунок її структурної надмірності.

Розглянуті особливості ТТС як об'єкта дослідження є необхідними, однак не можуть вважатися достатніми. Наприклад, теплові мережі потрапляють у коло систем, що виступають як об'єкти дослідження, але не тому, що мають ключові особливості. Визначальним у даному разі є те, що цільовий продукт (тепло) поступає до споживача за допомогою носія (води, пара, повітря), що циркулює в тепловій мережі, під *тиском*. Інший приклад. Каналізаційні мережі, відповідно до схеми на рис. 1.1, не входять у поняття «об'єкт дослідження». Але якщо каналізаційна мережа є *напірною* або має у своєму складі *напірну* підмережу, то вона може виступати як об'єкт дослідження.

Наведені приклади говорять про необхідність подальшого уточнення ознак, що визначають об'єкт дослідження.

Усі транспортні й мережні системи підкоряються першому постулату інженерних мереж, відомих як перше правило Кірхгофа [15,23]. Будь-які потоки вантажу, пасажирів, цільового продукту або носіїв цільового продукту в будь-якій точці системи не можуть зникати безслідно або з'являтися з нічого. Тому суми вхідних і вихідних потоків у будь-якому вузлі або в будь-якому перетині потокопроводу рівні між собою. Оскільки перше правило Кірхгофа

справедливе для всіх транспортних і мережних систем, то воно не може виступати в ролі відмітної ознаки об'єкта дослідження.

Зовсім інакша справа з другим постулатом інженерних мереж, тобто з другим правилом Кірхгофа [23]. Йому підкоряються всі інженерні мережі без винятку. А з усіх типів транспортних систем друге правило Кірхгофа справедливо тільки для напірного трубопровідного транспорту. Отже воно щонайкраще характеризує об'єкт дослідження. Врахування другого постулату дозволяє виключити з розгляду всі види транспорту, крім трубопровідного, і в той же час поширити поняття «об'єкт дослідження» на напірні каналізаційні системи.

Таким чином, основні відмітні ознаки об'єкта дослідження можна подати у вигляді наступних вимог:

- об'єкт дослідження повинен являти собою систему трубопроводів із мережною структурою;
- потоки цільового продукту або їхніх носіїв у мережі трубопроводів повинні підкорятися 2-му правилу Кірхгофа.

Відповідно до наведених ознак магістральні трубопровідні системи можуть виступати як об'єкт дослідження тільки в тому випадку, якщо вони являють собою мережу трубопроводів (рис. 1.3).

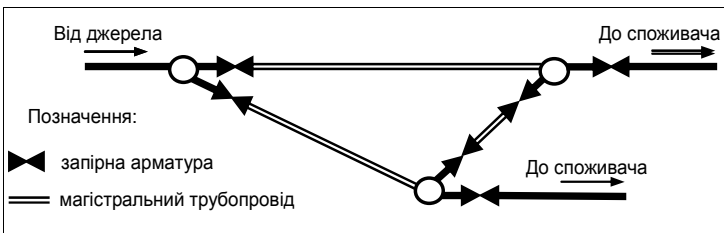


Рис. 1.3 – Найпростіша мережа магістральних трубопроводів

Прикладом мережних магістральних систем можуть служити два рівнобіжні магістральні трубопроводи, з'єднані перемичками (рис. 1.4).

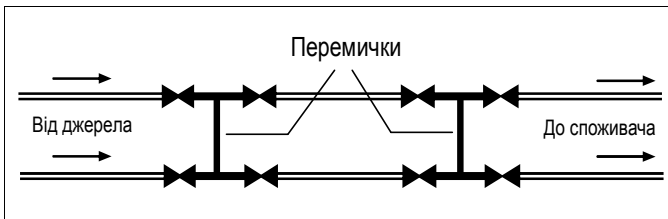


Рис. 1.4 – Магістральний транспорт

Самопливні трубопровідні системи, будь то водопровідні або каналізаційні, не можуть виступати як об'єкт дослідження, оскільки для них не справедливий другий постулат мереж.

Всі ТТС з вказаними ознаками мають ідентичні математичні моделі, незважаючи на різну фізичну природу вхідних у них розмірів. Як правило, математичні моделі відбивають мережну структуру і потокорозподіл у ТТС і формуються на основі 1-го і 2-го правил Кірхгофа, а також законів, що визначають зв'язок між послідовними й паралельними змінними потоків [15].

ТТС мають не тільки близькі за своєю суттю математичні моделі, але також і близькі області їх використання. Більше того, використання одних з них припускає використання інших як забезпечуючих. Так, функціонування систем водопостачання неможливе без систем водовідведення, вентиляції і підігріву. Системи газу,- нафто- і теплопостачання, крім основних трубопровідних мереж, використовують додаткові водопровідні й вентиляційні мережі як для технічного обслуговування самих мереж, так і для побутового обслуговування робочого персоналу. У свою чергу, вентиляційні мережі при відсутності доступу до електричних силових ліній можуть мати для живлення компресорних установок додаткові мережі, що забезпечують подачу рідкого або газоподібного палива і відведення відпрацьованих продуктів згорання.

## **1.2. Функціональна надійність трубопровідних транспортних систем як предмет дослідження**

Сучасні трубопровідні транспортні системи (ТТС) являють собою складні інженерні споруди, що вимагають для свого створення і безперебійної тривалої експлуатації великих матеріальних витрат. Ці витрати пов'язані, з одного боку, із необхідністю задовольняти поточну потребу населення в тому або іншому цільовому продукті, а з іншого – із необхідністю забезпечувати безперебійну роботу мережі в найближчий час, тобто протягом деякого періоду часу  $T$ .

Усі трубопровідні транспортні системи відносяться до систем життєзабезпечення населення (міські ТТС) або створюють умови для їх нормального функціонування (магістральні ТТС). У будь-якому випадку навіть тимчасовий вихід з ладу будь-якої системи приводить до вкрай небажаних наслідків, а часом до важких соціальних потрясінь або екологічних катастроф.

У зв'язку з винятковою соціальною значущістю ТТС кожне комунальне підприємство або будь-який інший виробничий підрозділ з експлуатації такої системи несуть адміністративну і кримінальну відповідальність за її технічний і функціональний стан. Служби експлуатації в кожний момент часу повинні забезпечити нормальну роботу ТТС, тобто її відповідність технічним вимогам і своєму призначенню, а також передбачити й забезпечити здатність системи виконувати технічні й функціональні вимоги протягом визначеного терміну, іноді досить тривалого. При цьому основними критеріями оцінки нормальної роботи мережі вважаються:

- 1) кількісне задоволення потреб у цільовому продукті;
- 2) якісне задоволення потреб у цільовому продукті;
- 3) достатня (не нижче припустимої) технічна і функціональна надійність.

Перший критерій оцінки роботи ТТС пов'язаний з потужністю станцій перекачки, компресорних і насосних установок, а також з пропускною здатністю магістрального трубопроводу або розподільчої мережі трубопроводів. Критерій вважається основним, оскільки порушення вимог відносно мінімально припустимих поставчань цільового продукту неминуче приводить до скорочення чис-



ла споживачів або порушення їхніх прав, що суперечить призначенню мережі й існуючим законам.

Другий критерій потребує від цільового продукту визначеної якості. Якщо вимога ставиться до розміру напору, під яким цільовий продукт поступає споживачеві, то другий критерій функціонально пов'язаний з першим. У цьому разі слід розглядати обидва критерії спільно. Вони органічно доповнюють один одного. Якщо до цільового продукту ставляться вимоги, що стосуються ступеня очищення цільового продукту, його температури, щільності, концентрації, складу і т.д., то другий критерій стає цілком незалежним, а його значущість може дорівнювати значущості першого критерію і навіть перевершувати його. Низька якість цільового продукту також суперечить призначенню мережі і приводить у підсумку до втрати споживачів.

Третій критерій оцінює надійність ТТС, тобто її здатність протягом певного періоду часу залишатися в технічно справному стані й відповідати своєму призначенню, тобто виконувати покладені на неї функціональні завдання. Оцінки і технічної надійності, і функціональної надійності в однаковій мірі важливі для експлуатаційних служб. Обидві надійності зв'язані між собою: без належної технічної надійності важко домогтися необхідної функціональної надійності.

З боку споживачів нормальна робота ТТС оцінюється за тими критеріями, за якими вона оцінюється службами експлуатації. Безумовно, кожний споживач бажає мати певну кількість цільового продукту і певної якості, а також бути впевненим у «завтрашньому дні», тобто в тому, що він буде одержувати цільовий продукт у потрібній кількості і якості протягом оговореного періоду часу.

Єдина відмінність у вимогах, що пред'являються експлуатаційниками і споживачами до ТТС, полягає в тому, що споживачів не цікавить технічний стан системи. Їхні інтереси обмежуються особистими потребами. Будь-якому споживачеві досить бути впевненим, що до місця його підключення к ТТС цільовий продукт буде поставлятися в замовленій кількості, замовленої якості і протягом замовленого періоду часу. Іншими словами, для споживача важливою є оцінка тільки функціональної надійності системи, його

зовсім не цікавить, як технічно вона досягається і реалізується. Та й функціональна надійність системи споживача хвилює тільки в тій її частині, що стосується його особисто.

Таким чином, функціональна надійність, незважаючи на її залежне положення від технічної надійності, відіграє винятково важливу роль в експлуатації систем. У забезпеченні високої функціональної надійності однаковою мірою зацікавлені і служби експлуатації, і споживачі.

Функціональна надійність ТТС є предметом дослідження у цій монографії. Тому подальша розмова у першу чергу буде торкатися саме цього показника.

Щоб полегшити розуміння суті всіх етапів дослідження і уникнути плутанини між технічною і функціональною надійністю, дамо визначення цим ключовим показникам системи.

**Технічною надійністю** будемо називати здатність елемента ТТС (пристрою, агрегату, окремої ділянки, усєї мережі, підмережі і т.ін.) знаходитися у працездатному стані. Під кількісним показником технічної надійності будемо розуміти ймовірність безвідмовної роботи елемента ТТС протягом визначеного періоду часу  $T$ .

Технічна надійність елементів системи визначається за технічним паспортом цього елемента або за накопиченими статистичними даними. Технічна надійність усєї системи (підсистеми, частини системи) визначається розрахунковими методами, якщо відомі надійності всіх елементів системи, або статистичними методами в протилежному разі.

Вважатимемо, що технічна надійність кожного елемента системи не залежить від структури системи і працездатності інших елементів системи. З цього випливає, що вихід з ладу одних елементів не тягне за собою вихід з ладу інших.

Залежно від того, як визначається працездатність усєї системи, розрізняють декілька різних розрахункових моделей технічної надійності системи.

Якщо система вважається працездатною тоді, коли працездатні всі її елементи, то має місце послідовна розрахункова модель. У цьому випадку надійність системи розраховують за формулою

$$D_{\neq}(A) = \prod_{i=1}^n \delta_i, \quad (1.1)$$

де  $A$  – подія, що визначає працездатність системи протягом визначеного періоду часу  $T$ ;  $p_i$  – імовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента системи протягом того ж періоду часу  $T$ ;  $n$  – загальна кількість елементів системи.

Якщо система вважається працездатною тоді, коли працездатний хоча б один її елемент, то має місце паралельна розрахункова модель. У цьому випадку надійність системи розраховують по формулі

$$D_{=} (A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \delta_i), \quad (1.2)$$

де  $A$  – подія, що визначає працездатність системи протягом визначеного періоду часу  $T$ ;  $p_i$  – імовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента системи.

Якщо працездатність системи визначається більш складними відношеннями між працездатністю окремих елементів, то має місце змішана розрахункова модель. У цьому випадку надійність системи розраховують за спеціальною методикою, яка буде розглянута далі.

Для оцінки технічної надійності ТТС найбільш корисною є послідовна модель із розрахунковою формулою (1.1). Паралельна й змішані моделі використовують набагато рідше: перша – для розрахунку технічної надійності зарезервованих ділянок мережі; друга – для оцінки працездатності насосного вузла з мережною структурою з'єднання насосних агрегатів.

**Функціональною надійністю** будемо називати здатність ТТС задовольняти своєму призначенню або, що те саме, успішно ви-

рішувати свої функціональні завдання. Для ТТС – це поставляти цільовий продукт споживачам із кількісними і якісними параметрами, оговореними в двосторонніх договорах. Під кількісним показником функціональної надійності будемо розуміти імовірність виконання системою конкретного функціонального завдання протягом деякого визначеного періоду часу  $T$ .

Функціональну надійність системи, як правило, визначають на основі статистичної обробки даних про поведінку системи, накопичених за досить великий проміжок часу експлуатації системи. Розрахункові методи визначення функціональної надійності системи на основі відомої технічної надійності її елементів розроблені й застосовні тільки для систем малої розмірності. Пов'язано це зі складністю формалізації впливу структури системи на її функціональну надійність.

Залежно від кількості функціональних завдань системи розрізняють стільки ж показників функціональної надійності системи. У рамках даної монографії розглядаються тільки два типи показників. Перший стосується постачання цільового продукту конкретному споживачеві, другий – усім споживачам або окремії групі споживачів.

Як уже відзначалося, функціональна надійність тісно пов'язана з технічною. Більше того, для деяких систем цей зв'язок настільки тісний, що можна обмежитися розглядом тільки технічної надійності. У цьому випадку характер зміни функціональної надійності в процесі експлуатації систем збігається з характером зміни технічної надійності. Таку картину можна спостерігати в магістральних трубопровідних системах із слабо вираженою мережною структурою і у складних мережних системах трубопроводів при великому числі джерел. У системі з одним джерелом і одним споживачем показники технічної і функціональної надійності взагалі збігаються.

Оскільки функціональна і технічна надійності сильно зв'язані між собою, то обидві вони будуть постійно знаходитися в полі нашої уваги.

### 1.3. Аналіз показників якості функціонування трубопроводних транспортних систем

Аналіз показників роботи ТТС говорить про те, що частина з них стосується цільового продукту (ступінь очищення, температура, концентрація і т.д), частина – мережі трубопроводів, окремих її ділянок або конструктивних елементів (технічна і функціональна надійність), а частина – і того й іншого (показники, пов'язані з параметрами поточкорозподілу). Перші із зазначених показників не залежать від мережної структури та інших конструктивних особливостей ТТС, а інші, навпаки, знаходяться в повній залежності.

Оскільки предметом дослідження є функціональна надійність, то всі показники роботи ТТС, її структурні параметри й параметри поточкорозподілу будемо розглядати з погляду їх зв'язку з надійністю.

Усі показники в тій чи іншій мірі пов'язані з надійністю системи. Наприклад, показники якості цільового продукту, коли вони відхиляються від нормативних значень, знижують надійність ТТС. Наявність небажаних домішок у цільовому продукті може призвести до корозії або засмічення трубопроводів, що скорочує термін їх служби або перешкоджає подачі цільового продукту споживачеві. Корозія через зміну показника технічної надійності й засмічення безпосередньо впливають на функціональну надійність. Аналогічний вплив мають і параметрами поточкорозподілу. Так, значні надлишкові напори прискорюють знос труб і, в остаточному підсумку, можуть призвести до їх розриву. Недостатні напори приводять до зриву постачань запланованих об'ємів цільового продукту. Значні надлишкові напори через зміну показника технічної надійності й недостатні напори безпосередньо також впливають на функціональну надійність.

Напрошується висновок: чим менше сумарне відхилення усіх параметрів функціонування ТТС від нормативних і чим вище технічна надійність усіх елементів ТТС, тим вище її функціональна надійність.

Оскільки зроблений висновок має емпіричний характер, то, природно, становить великий інтерес розробка математичної моделі функціональної надійності як функції, що залежить від відхи-

лень параметрів функціонування ТТС і технічної надійності її елементів. Формалізація такої залежності є надскладним завданням, розгляд і вирішення якого не укладається в рамки проведених нами досліджень. Досить сказати, що тільки в системі міського забезпечення питною водою якість цільового продукту залежить більш ніж від 100 параметрів. Технічна надійність системи – це інтегрований показник, що визначається низкою параметрів надійності ТТС. При цьому кожний параметр надійності системи залежить від відповідних параметрів надійності окремих елементів системи. А кількість останніх може перевищувати 1000 і навіть 10000 одиниць. Аналогічну картину можна спостерігати і з показником якості поточкорозподілу, який мусить враховувати параметри поточкорозподілу (витрати і напори) на кожній ділянці ТТС.

До сказаного слід додати, що вплив окремих параметрів на функціональну надійність може бути суперечливим. Так, зниження напорів цільового продукту приводить до підвищення технічної надійності системи (знижується імовірність розриву труб), що позитивно позначається на функціональній надійності системи. З іншого боку, зниження напорів приводить до зриву поставок цільового продукту споживачам, що негативно позначається на функціональній надійності.

Слід також враховувати, що ступінь впливу окремих показників функціонування (як усієї ТТС, так і її елементів окремо) на функціональну надійність різна. Крім того, сама функціональна надійність системи, з погляду споживача, також різна і залежить від місця підключення останнього до трубопровідної мережі.

Таким чином, навіть поверхневий аналіз задання формалізації функціональної надійності говорить про виняткову її складність і громіздкість. Вирішення такого завдання вимагає посиленої роботи великих колективів учених і виробничників з дуже насиченими програмами досліджень. Тому автори ні в якій мірі не претендують на її комплексне вирішення.

Як було зазначено раніше, показники якості цільового продукту не залежать від мережної структури системи та інших конструктивних особливостей ТТС і впливають на функціональну надійність непрямим способом – через технічну надійність. Тому впливом показників якості цільового продукту на функціональну надійність

можна зневажити або вважати, що показники якості враховані при визначенні або заданні технічної надійності окремих елементів ТТС.

Далі, параметри поточкорозподілу, хоча і залежать від структури мережі, проте за умовою експлуатації вони повинні мати значення, які:

- по-перше, не більше гранично припустимих технічних норм, тобто такі значення, що практично не впливають на технічний стан ТТС;
- по-друге, не нижче припустимих споживчих норм.

Якщо вказані умови виконуються, то ТТС повністю відповідає своєму призначенню, забезпечуючи споживачів цільовим продуктом у заданій кількості й заданій якості. Іншими словами, якщо зміни параметрів поточкорозподілу не виводять їх з області припустимих значень, то функціональна надійність  $P^f$  від цих параметрів не залежить:

$$(h_{i \min} \leq h_i(t) \leq h_{i \max}) \ \& \ \left( \left[ q_{i \min} - \int_0^T q_i(t) dt \right] \leq 0 \right) \Rightarrow \quad (1.3)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 P_i^f}{\partial h_i \partial q_i} = 0, \quad \overline{1, n}, \quad (1.4)$$

де  $n$  – загальна кількість споживачів;  $T$  – період часу, на який розраховується функціональна надійність  $P^f$ ;  $t$  – поточний час від початку розрахункового періоду,  $t \in \{0, T\}$ ;  $P_i^f$  – функціональна надійність системи щодо  $i$ -го споживача;  $h_{i \min}$  – мінімально припустимий тиск на  $i$ -м споживачеві, обумовлений договором між  $i$ -м споживачем і підприємством, яке експлуатує ТТС;  $h_{i \max}$  – максимально припустимий тиск на  $i$ -м споживачеві, що не впливає на

технічний стан ТТС;  $q_{i \min}$  – необхідна кількість цільового продукту для  $i$ -го споживача, обумовлена договором між  $i$ -м споживачем і підприємством, яке експлуатує ТТС;  $h_i(t)$ ,  $q_i(t)$  – поточні значення параметрів потокорозподілу (напір і витрати) на  $i$ -му споживачеві.

Логічна імплікація (1.3) – (1.4) у кожний момент часу  $t$  має місце для більшості споживачів,  $t \in \{0, T\}$ . Тому впливом параметрів потокорозподілу на функціональну надійність можна також зневажити або умовитися, що функціональна надійність розглядається щодо споживачів, для яких вимоги постачання цільового продукту і технічні вимоги експлуатації ТТС цілком виконуються.

Таким чином, приходимо до таких висновків:

– функціональна надійність ТТС при нормативній експлуатації системи інваріантна до змін показників якості цільового продукту і параметрів потокорозподілу;

– функціональна надійність у процесі експлуатації ТТС залежить від технічної надійності елементів системи і структури трубопровідної мережі, тобто від порядку з'єднання елементів системи в мережну структуру.

Нагадаємо, що в даному дослідженні увага зосереджується на двох показниках функціональної надійності, пов'язаних із безперебійним постачанням цільового продукту. Один визначає надійність системи стосовно всіх споживачів, інший – стосовно конкретного споживача або конкретної групи споживачів. У першому випадку функціональна надійність системи пов'язана з технічною надійністю всіх елементів системи і становить інтерес для експлуатаційників і тих споживачів, які ще тільки збираються підключитися до мережі. У другому випадку функціональна надійність визначає здатність ТТС поставляти цільовий продукт конкретному споживачеві. Для різних споживачів або груп споживачів вона може бути однаковою, а може й різко відрізнитися. У цьому показнику зацікавлені всі суб'єкти, які беруть участь у процесі транспортування і розподілу цільового продукту: і постачальники, і споживачі, як реальні, так і потенційні. Але найбільш зацікавленою осо-



бою в кожному конкретному показнику  $P_i^f$  є, безумовно,  $i$ -й споживач,  $i \in \overline{1, n}$ . При цьому для  $i$ -го споживача система з  $n$  логічних імплікацій (1.3) – (1.4) перетворюється в одну  $i$ -у імпліканту,  $i \in \overline{1, n}$ .

Технічна надійність – це комплексна властивість, яка залежно від призначення ТТС і умов її експлуатації може включати *безвідмовність*, *довговічність*, *ремонтпридатність* і *схоронність* окремо або сполучення цих властивостей як для системи в цілому, так і його частин. З перерахованих властивостей, з погляду споживача, тільки безвідмовність має пряме відношення до функціональної надійності. Особливо це проявляється при безперервному постачанні цільового продукту споживачеві з безперервним виробничим циклом. Пояснюється це тим, що безвідмовність – це властивість системи або окремих її ділянок безперервно зберігати *працездатність*. Споживача в першу чергу хвилює працездатність системи, і в набагато меншій мірі – як ця працездатність досягається. Саме тому ми умовилися в попередньому розділі розуміти під технічною надійністю імовірність безвідмовної роботи системи або окремої її ділянки протягом деякого періоду часу  $T$ , а під функціональною надійністю – імовірність безперебійного постачання цільового продукту конкретному споживачеві в заданих кількостях і заданій якості за цей же період часу.

Щоб бути впевненим у виконанні умов (1.3) у поточний момент часу  $t$  ( $0 < t < T$ ) для  $i$ -го споживача  $i \in \overline{1, n}$ , треба зробити розрахунок параметрів поточкорозподілу  $h_i^3 q_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Дані параметри залежать один від одного, від загальної структури системи й обраного режиму роботи напірних агрегатів. Визначення значень параметрів  $h^3 q$  для конкретного споживача пов'язано з повним розрахунком поточкорозподілу на всій мережі. Розрахунок виконують на основі розв'язання системи рівнянь, отриманих за допомогою 1-го і 2-го правил Кірхгофа. Комп'ютерний розрахунок поточкорозподілу навіть для складної комунальної мережі практично проводять в реальному масштабі часу [20]. Розрахунок дозволяє відповісти не тільки на запитання, чи відповідає система в

сучасного момент часу своєму призначенню або немає. Основне призначення розрахунку – забезпечити можливість керування поточкорозподілом. Розрахунок показує експлуатаційникам ТТС, наскільки необхідно скоригувати параметри поточкорозподілу у разі їхнього відхилення від необхідних. Відповідна корекція поточкорозподілу повертає систему в раціональний і технічно безпечний режим роботи.

Як бачимо, проведення розрахунку поточкорозподілу викликане в першу чергу необхідністю керувати самим поточкорозподілом, а перевірка логічного виразу (1.3) – його другорядна роль.

#### **1.4. Цілі дослідження**

Щоб у процесі експлуатації ТТС можна було якимось способом керувати поточкорозподілом, система повинна мати певний ступінь свободи: запас потужності напірних установок, можливість вибору режимів роботи цих установок, структурна надмірність мережі трубопроводів і напірних установок мережі, можливість зміни режиму роботи і структури мережі. Така свобода, тобто можливість знаходитися в різних станах конструктивно передбачена в кожній ТТС. Зміна станів системи досягається за допомогою переключення режиму роботи напірних установок або зміни положення запірної арматури.

Що інакше обстоїть справа з керуванням функціональною надійністю. У діючих ТТС, як правило, не передбачений механізм керування функціональною надійністю з трьох основних причин:

- немає методики розрахунку даного показника для складних мережних трубопровідних систем;
- має місце недооцінка показника функціональної надійності на етапі проектування і початкових етапах експлуатації;
- відзначається невисокий ступінь свободи трубопровідної системи щодо керування функціональною надійністю.

Серед цих причин основною є відсутність методики розрахунку показника функціональної надійності. У даний час цей показник інтуїтивно враховується на різних етапах проектування, експлуа-

тації, реконструкції і розвитку ТТС, а також інтуїтивно змінюється у процесі функціонування системи. Але врахування і зміна функціональної надійності на якісному рівні («гірше» – «краще») не може гарантувати безпомилковість управлінських рішень для складних систем. Тільки кількісна оцінка надійності може дозволити і якісно проектувати, реконструювати, розвивати ТТС, ефективно керувати нею у процесі експлуатації.

Друга причина обумовлена особливостями динаміки показників надійності в процесі експлуатації трубопровідних систем. На відміну від інших показників якості експлуатації ТТС, значення яких є інваріантними стосовно терміну експлуатації, значущість показника надійності змінюється за експоненціальним законом: на початковому етапі експлуатації системи вона найбільша, а потім зменшується в міру зносу системи. Недооцінка надійності ТТС на початкових етапах може призвести до дуже сумних наслідків, не бажаних як для експлуатаційників системи, так і для її споживачів.

Третя причина – малий ступінь свободи трубопровідної системи, що стосується керування функціональною надійністю, не є настільки критичною, як дві попередні. По-перше, керувати надійністю можна безпосередньо й оперативно, змінюючи структуру мережі за допомогою запірної арматури. Таке керування має сенс, коли при різних структурах мережі основні показники якості (без урахування показників надійності) мають однакові значення або незначно відрізняються при різкій відмінності показників надійності.

По-друге, керувати надійністю можна побічно – через зміну технічної надійності окремих елементів системи за допомогою реновації, тобто за допомогою проведення профілактичних робіт із відновлення елементів, які частково втратили надійність, або ремонтних робіт з відновлення тих елементів, нормативний термін служби яких минув. Таке керування функціональною надійністю вимагає певної затримки в часі, обумовленої тривалістю проведення регламентних робіт з відновлення ненадійних елементів.

Урахування і керування функціональною надійністю так само важливі, як урахування та керування поточкорозподілом. ТТС є

невід'ємними частинами систем життєзабезпечення населення і систем ресурсного забезпечення промислових підприємств. Безперебійне функціонування ТТС – необхідна умова для нормального життя громадян, а висока ефективність функціонування цих систем – одна з умов благополуччя муніципальної і регіональної економіки. Оскільки ТТС конструктивно базуються на складних інженерних мережах, а їхня функціональна надійність – це гарантія функціонування систем у поточний момент часу й в найближчому майбутньому, то зневажати цим показником не тільки недоцільно, але й злочинно.

Для ефективного урахування і керування функціональною надійністю на різних етапах проектування, експлуатації, реконструкції і розвитку ТТС із складною мережною структурою потрібна наявність інженерної методики для кількісного визначення цього показника.

*Метою наукових досліджень*, покладених в основу цієї монографії, є розвиток теорії надійності трубопровідних транспортних систем із складною мережною структурою і розробка інженерної методики кількісного визначення показників технічної і функціональної надійності таких систем. Це дозволить:

– *проектувальникам* ТТС:

– конструювати мережні системи із заданими показниками технічної і функціональної надійності;

– порівнювати проекти ТТС за критеріями технічної і функціональної надійності;

– оптимізувати мережні структури за критеріями технічної і функціональної надійності;

– здійснювати реконструкцію діючих ТТС з урахуванням показників технічної і функціональної надійності;

– раціонально розвивати діючі ТТС з урахуванням показників технічної і функціональної надійності;

– *експлуатаційникам* ТТС:

– забезпечувати експлуатацію мережних систем із заданими показниками технічної і функціональної надійності;

- керувати за необхідністю показниками технічної і функціональної надійності;

- укладати договори із споживачами з урахуванням показників технічної і функціональної надійності;

- формувати для проектних організацій технічне завдання і технічні умови на реконструкцію і розвиток діючих ТТС з урахуванням показників технічної і функціональної надійності;

- видавати аварійно-ремонтним і відновно-профілактичним службам технічні завдання і технічні умови для проведення ремонтних і профілактичних робіт з урахуванням показників технічної і функціональної надійності;

- *експлуатаційникам і споживачам ТТС:*

- аналізувати поточні й прогнозувати майбутні стани ТТС з урахуванням показників технічної і функціональної надійності;

- *споживачам цільового продукту ТТС:*

- вибирати місце підключення до мережі трубопроводів з урахуванням показників технічної і функціональної надійності;

- формувати для служб експлуатації вимоги на зміну показників технічної і функціональної надійності у разі виробничої необхідності;

- *експертам МНС:*

- перевіряти дотримання норм експлуатації ТТС з погляду їх екологічної безпеки;

- попереджати можливість екологічної катастрофи через недотримання норм експлуатації ТТС;

- здійснювати аналіз стану ТТС при розслідуванні причин катастрофи.

Як бачимо, досягнення поставленої мети дозволяє грамотно виконувати багато різних заходів з проектування, з експлуатації і навіть з екологічної безпеки. Одні з них виконуються часто, наприклад, аналіз стану ТТС, інші – менше, як наприклад, зміна функціональної надійності за вимогою споживача. Останнє, як правило, пов'язано з різкою зміною характеру споживання цільового продукту

кту. Але всі цільові заходи дуже важливі для нормальної і надійної роботи ТТС.

## **1.5. Трубопровідні транспортні системи Харківського регіону як практична база досліджень**

Місто Харків і Харківська область відносяться до самих розвинутих у промисловому відношенні регіонів України і колишнього Союзу. На території міста й області розташовуються типові для великих міст трубопровідні напірні системи із складною мережною структурою. У першу чергу до них відносяться системи газопостачання міста й області, міські мережі водо- і теплопостачання. Трубопровідні системи існують і постійно розвиваються протягом багатьох років. Так, розвиток найстаршої в Україні системи газопостачання м. Харкова починається з другої половини XIX ст. Система водопостачання регіону, зокрема м. Харкова і селища міського типу Кочеток [34, с. 56-65], часто вибиралися як базові для проведення досліджень з проблем якості водопостачання і прогнозування водоспоживання. Проблеми трубопровідних і транспортних систем регіону характерні для систем більшості регіонів колишнього СРСР. Саме системи м. Харкова і Харківської області служили практичною базою для проведення досліджень у рамках даної монографії.

### **1.5.1. Система газопостачання Харківського регіону**

Система газопостачання Харківського регіону – одна з найбільших і найстарших в Україні. Її розвиток починається з 1871 р., коли коксовий газ уперше був застосований для висвітлення вулиць м. Харкова й надалі став використовуватися для побутових потреб.

1932 рік був визначений як початок планового розвитку газопостачання міста. Для обслуговування системи газопостачання було створено трест «Харгаз».

З 1956 р. місто переведено на природний газ із Шебелинського родовища, почалася бурхлива газифікація м. Харкова. Протягом

наступних десяти років були газифіковані всі підприємства й житловий фонд міста. Була розроблена унікальна кільцева система газопостачання міста. У 1980 р. із введенням в експлуатацію газопроводу високого тиску між газорозподільними станціями ГРС–1 і ГРС–4 кільце високого тиску навколо м. Харкова було замкнено (рис. 1.5). Завершилося виконання «Перспективного плану розвитку системи газопостачання м. Харкова на 1976 – 1980 р. р.». Практично місто було переведено на триступінчасту систему газопостачання (рис. 1.5). Кільце високого тиску навколо м. Харкова з п'ятьма газовими розподільними станціями й одинадцятьма проміжними розподільними станціями забезпечило постачання газу населенню і промисловим підприємствам з високою функціональною надійністю.

Услід за харківським кільцем високого тиску було побудовано аналогічне кільце навколо м. Москви.

У 1996 р. на базі державного підприємства з газопостачання і газифікації було організоване відкрите акціонерне товариство (ВАТ) «Харківгаз». Газові мережі і їхні споруди, а також спеціальний автотранспорт аварійно-ремонтного призначення залишилися у власності держави.

У 2002 р. загальний обсяг транспортування газу ВАТ «Харківгаз» склав 2098 *млн. м<sup>3</sup>*, темп зростання транспортування газу щодо 2001 р. – 105,6%.

На круговій діаграмі на рис. 1.6 показаний розподіл газу між основними його споживачами в м. Харкові. На початку третього тисячоріччя у промисловому секторі міста газифіковане більше 300 підприємств, у комунально-побутовому секторі – більше 2,5 тисяч об'єктів, у житло-комунальному – близько півмільйона квартир. Питома вага газифікованих квартир складає 4,6 % від загальної кількості по Україні.

ВАТ «Харківгаз» має триступінчасту систему керування з робочим персоналом, який нараховує більше двох тисяч чоловік. Основні напрямки діяльності акціонерного товариства:

– надання послуг з газопостачання і транспортування природного газу об'єктам усіх форм власності;





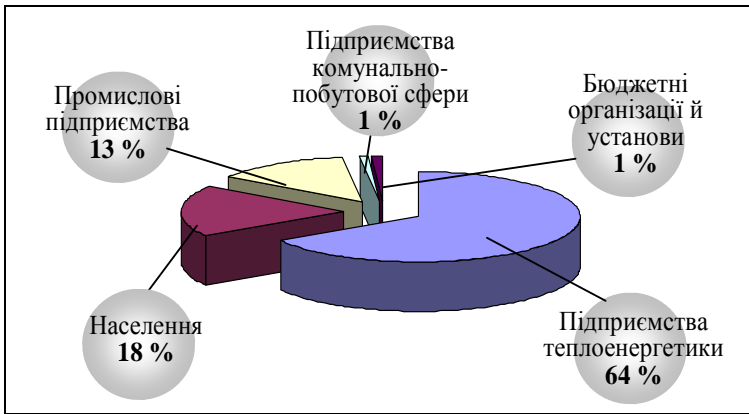


Рис. 1.6 – Кругова діаграма газоспоживання в м. Харкові

- виконання комплексу робіт з технічного обслуговування підземних і повітряних газопроводів, супутніх споруд, газового устаткування газорозподільних пунктів (ГРП), житлових будинків, комунально-побутових об'єктів, промислових підприємств;
- проведення контролю, діагностики й аналізу корозійного стану газопроводів;
- виконання робіт з технічного обслуговування, налагодження і ремонту трубопроводів;
- ремонт і перевірка трасопошукових приладів і газоаналізаторів;
- комплексне приладове обслуговування газопроводів;
- визначення ступеня корозійної агресивності ґрунтів, одоризації газу, його компонентного складу й теплотворності;
- метрологічне забезпечення обліку газу: ремонт і перевірка витратомірів, контроль побутових лічильників газу, ремонт і перевірка контрольно-вимірвальних приладів;
- організація, розвиток і обслуговування технічних засобів інформації і автоматизованого розв'язання завдань адміністративної, фінансової і господарської діяльності організації;

## Оглядовий розділ

- розробка схем газопостачання, створення робочих проектів газопостачання мікрорайонів міста, промислових підприємств, комунально-побутових об'єктів, житлових будинків;

- будівництво і реконструкція трубопровідної системи газопостачання;

- будівництво і реконструкція виробничих об'єктів організації;

- виконання робіт з газифікації будинків, комунально-побутових об'єктів, установ і промислових підприємств з установкою лічильників газу й устаткування;

- ремонт газового устаткування, виготовлення запасних деталей і нестандартного устаткування;

- навчання, стажування і підвищення кваліфікації кадрів організації.

Усі напрямки діяльності ВАТ «Харківгаз», крім приладного обслуговування і автоматизації, безпосередньо пов'язані з функціональною надійністю системи. Особливо важливим напрямком є навчання, стажування і підвищення кваліфікації інженерних кадрів з питань надійності.

Система газопостачання м. Харкова складається з:

- 5-и газорозподільних станцій (ГРС), розташованих навколо міста для подачі газу в кільце високого тиску діаметром 500 мм під тиском 1,2 Мпа;

- 12-и проміжних газорозподільних пунктів (ПГРП), які знижують високий тиск газу до середнього (до 0,3 Мпа) і подають його в кільце середнього тиску для живлення промислових підприємств і комунально-побутових об'єктів міста;

- 872-х газорегулюючих пунктів (ГРП), які знижують тиск газу від середнього до низького для подачі газу населенню для побутових потреб;

- 4241-го кілометра газопроводів, з яких 74% підземного залягання, і супутніх споруд.

З кільця м. Харкова 7-10% загального об'єму газу транспортується в два райони області (Харківський і Дергачівський) і м. Люботин.

Кільцева структура системи газопостачання міста сприяє підвищенню її функціональної надійності в цілому і функціональної надійності постачання газу конкретним споживачам зокрема. Оскільки система є еволюційною, то різні трубопровідні ділянки експлуатувалися протягом різних термінів. Так, 82% (3448 км) трубопровідної мережі експлуатувалися більше 25 років, 30% (1195 км) – більше 35 років, 10% (361 км) – більше 45 років і повністю зношені. Природно, що і технічна, і функціональна надійність системи вимагають ретельного обстеження.

За результатами паспортизації і моніторингу газопроводів і супутніх споруд виявлено 0,51 км аварійних газопроводів, що вимагають капітального ремонту, 195,1 км – санації і перекладки.

Для газопроводів м. Харкова характерне природне фізичне старіння металу труб і ізоляції. Положення погіршується ще тим, що 90% газопроводів знаходяться в зонах небезпечного впливу блукаючих струмів. Аналіз кількості витоків газу з підземних газопроводів показує, що 80% з них виникають через електрохімічну корозію, спровокованою блукаючими струмами. Некероване руйнування металевих трубопроводів – погроза виникнення техногенних аварій.

Для вирішення проблеми захисту газопроводів у м. Харкові, як і в інших містах і регіонах, необхідно:

- виконання заходів щодо обмеження блукаючих струмів, породжуваних рейковою мережею електротранспорту;
- установка захисних пристроїв від корозії для забезпечення катодної поляризації підземних металевих комунікацій і споруд.

Протягом тільки 2002 р. ВАТ «Харківгаз» здійснило постачання газу за 1200-ма договорах у розмірі 40 млн.м<sup>3</sup>. Щомісяця робиться розрахунок необхідних об'ємів споживання газу для м. Харкова і формується заявка на ліміти газу для підприємств. Однак добір газу підприємствами здійснюється зі значними порушеннями лімітів. Так, комунальне підприємство «Теплові мережі», основний споживач системи, може в декілька разів перевищити місячний ліміт. Непланові відбори газу призводять до зниження тиску в системі до критичних значень. ГРП та інші об'єкти системи працюють на байпасі (в аварійному режимі), що неприпустимо за

умовами експлуатації. Порушення договорів на постачання газу в остаточному підсумку призводить до зниження надійності системи.

У сформованій ситуації треба вжити кардинальні заходи для підвищення технічної і функціональної надійності системи газопостачання Харківського регіону.

У даний час у ВАТ розроблені й впроваджуються три програми поліпшення стану і підвищення безпеки газопостачання:

- програма підвищення ефективності роботи й розвитку служби аварійно-відбудовних робіт;
- програма підвищення ефективності робіт з електро-, хімзахисту;
- програма з технічного переоснащення, автоматизації виробничих процесів і переходу на нові технології експлуатації, будівництва і реновації систем газопостачання.

На жаль, програма з розробки і впровадження методів розрахунку надійності складних інженерних мереж, що могла б оцінити результати вище перелічених програм, не передбачена. Разом з тим вона, на відміну від інших програм, не вимагає великих матеріальних і фінансових витрат.

### **1.5.2. Система водопостачання Харківського регіону**

Технологічне виробниче об'єднання (ТВО) «Харківкомунпромвод», яке здійснює водопостачання в Харківському регіоні, має одну з найбільш розвинутих систем водопостачання в Україні. Тільки в м. Харкові експлуатується 278,8 км водоводів із 1701,2 км водогінних мереж.

Для водопостачання регіону ТВО «Харківкомунпромвод» використовує три незалежних джерела:

- річка Сіверський Донець з Печенізьким водосховищем;
- Червонопавлівське водоймище каналу Дніпро–Донбас;
- артезіанські свердловини.

За рахунок трьох джерел ТВО вирішує завдання цілодобового і безперебійного водопостачання регіону. Сумарна подача води споживачам за системою групового водопостачання в середньому складає близько  $800 \text{ тис.м}^3$  на добу. Технологічна схема подачі води споживачам (рис. 1.7) організована таким чином, що частина з них обслуговується безпосередньо з магістральних водоводів, а частина – через систему подачі й розподілу води (СПРВ).

Існуючих потужностей цілком достатньо для водопостачання регіону, але необхідно відзначити, що 95% усієї споживаної води з поверхневих джерел не відповідають вимогам Державних санітарних норм і правил. Тому виникає необхідність в подальшому розвитку водопостачання з підземних джерел і доведенні їхньої частки у постачанні до 20–25%. При очищенні води з поверхневих джерел треба застосувати новітні водоочисні технології.

Відсутність інвестицій і оборотних коштів у ТВО в останні роки призвело до передкризової ситуації в СПРВ. Довжина технічно зношених водоводів і водогінних мереж, що вимагають термінової санації і заміни, складає 637,5 км. При розрахунковій нормі заміни і санації мереж і водоводів у  $50 \text{ км/рік}$  фактично щорічно перекладається 5–8 км, тобто 10–16%. При таких темпах відновлення мереж через брак коштів відбудеться тільки через 100 років. З урахуванням подальшого старіння і нарощування темпів технічного зносу основних фондів це може призвести до неконтрольованих процесів руйнування системи водопостачання. До того ж планово-попереджувальні ремонти з обслуговування арматури на мережах (водопровідні колодязі, засувки, пожежні гідранти, водозабірні колонки) виконують не в повному обсязі.

Кількість аварійних ситуацій на водогінних мережах збільшується щорічно на 5–10% і досягає  $5 \text{ тис./рік}$ . Характер пошкоджень на трубопроводах міста свідчить, що за останнє десятиліття склалася стійка тенденція до неухильного зростання свищів на сталевих трубах. Із загальної кількості пошкоджень вони становлять 62% при загальній довжині 452,7 км, або 22,6%.

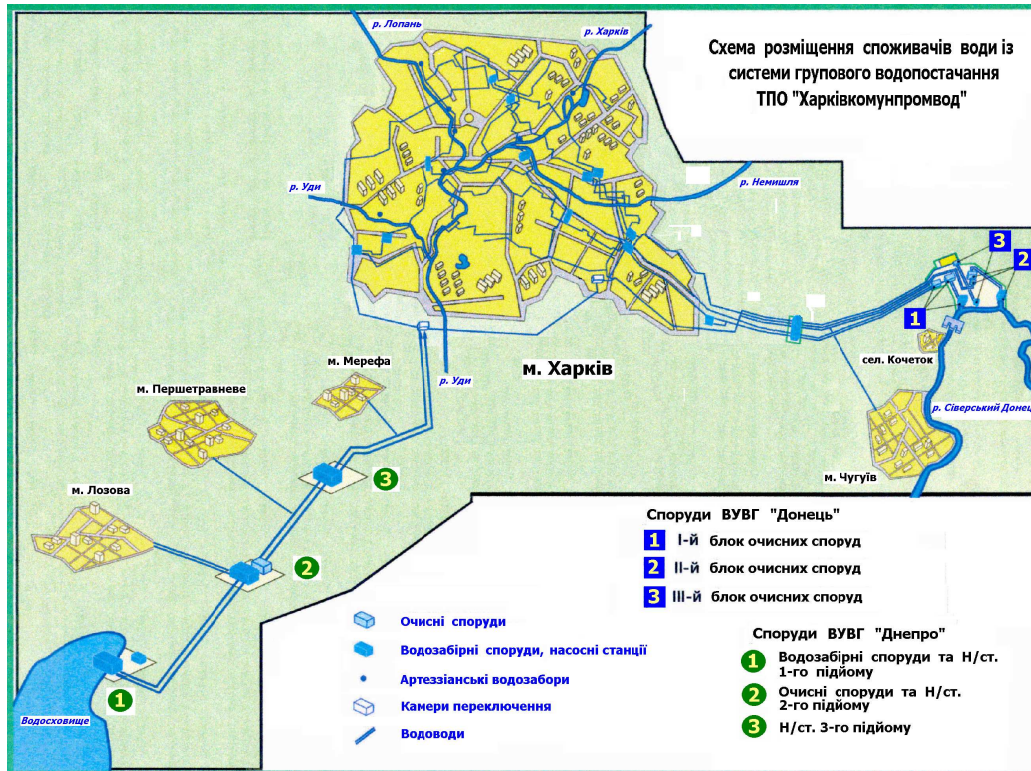


Рис. 1.7 – Схема розміщення споживачів системи водопостачання ТВО "Харківкомунпромвод"

Аналіз структури водоспоживання в м. Харкові за останні роки показує, що близько 90% води витрачається на побутові потреби населення. Рівень експлуатації внутрішніх домових систем водопостачання вкрай низький, унаслідок чого нераціональні втрати цільового продукту складають більше 25% від поданого в житлові будинки.

В останні роки на роботу СПРВ значно впливає практично повна відсутність циркуляційних систем гарячого водопостачання в житловому фонді й недотримання режимів підготовки гарячої води. Це призводить до зростання витрат газу, холодної води й електроенергії на підготовку гарячої води в системах тепlopостачання. Крім того, система водопостачання змушена працювати в нераціональному режимі з надлишковими тисками, що перевищують проектні.

Щоб компенсувати нераціональні втрати, насосні станції переводять на режими з підвищеним тиском, що, у свою чергу, спричиняє збільшення тих же нераціональних втрат і додатково провокує виникнення аварійних ситуацій. Така експлуатація СПРВ приводить до підвищеної аварійності.

Таким чином, сучасний стан водоводів і розподільних мереж оцінюється як стан, що не відповідає одному з головних критеріїв експлуатації – технічній і функціональній надійності.

Для стабілізації і подальшого розвитку підприємств водопровідного господарства необхідно провести заходи, спрямовані на підвищення надійності системи водопостачання. З метою підвищення надійності й ефективності функціонування системи водопостачання Харківського регіону, упровадження нових методів керування у сфері договірних відношень між вчасниками ринку послуг прийнята постанова Кабінету Міністрів України від 20 грудня 2000 р. № 1844 «Про підвищення надійності й ефективності функціонування систем водопостачання м. Харкова та інших населених пунктів Харківської області».

Цією постановою передбачено на базі ТВО «Харківкомунпромвод» до 2010 р. відпрацювати організаційні, економічні й технічні стратегічні напрямки розвитку водопостачання населених пунктів України, а саме:

- відпрацювання методів структурної перебудови;
- впровадження наукових розробок і пілотних проектів;
- розробка і впровадження інвестиційних програм;
- розробка нових технологій у проведенні реконструкції і забезпеченні експлуатації систем водопостачання;
- реалізація схвалених заходів щодо підвищення надійності, ефективності і безпеки систем водопостачання Харківського регіону на 2000–2010 р. р. і фінансування цих заходів за рахунок державних централізованих капітальних вкладень, коштів місцевих бюджетів, коштів інвесторів, у тому числі іноземних, і за рахунок власних коштів ТВО.

Основою практичної реалізації заходів за всіма перерахованими напрямками розвитку систем водопостачання може бути тільки розробка *нових математичних методів розрахунку технічної і функціональної надійності* систем водопостачання, що дозволять як реалізовувати заплановані заходи з всіх напрямків розвитку, так і оцінювати кількісно результати цих заходів.

## **1.6. Роль і місце функціональної надійності в процесах експлуатації і розвитку трубопровідних транспортних систем**

Процеси, що протікають усередині ТТС, як і в будь-якій іншій системі, протікають у часі й просторі. Оскільки будь-яка ТТС згодом зазнає значних і численних територіальних змін, то для процесів у ТТС важлива як часова, так і просторова динаміка. Відзначимо, що зміни структури мережі у великій мірі асоціюються з просторовими змінами (довжина трубопроводів, діаметр труб, топографія мережі), зміни стану мережі – із часовими змінами (добові, тижневі і сезонні коливання споживання, старіння, знос), а розвиток мережі – з тими, й іншими.

Щоб врахувати всі процеси у складно організованих ТТС, взаємно узгодити з різними підсистемами, виробничими службами й системними функціональними завданнями, необхідно провести системний аналіз типовий ТТС.



Перед тим як перейти до системного аналізу, перелічимо основні загальносистемні завдання, що виникають у процесі експлуатації і розвитку ТТС.

1. Прогнозування річних трендів споживання, а також введення нових споживачів і розробок нових родовищ цільових продуктів.

2. Розвиток трубопровідної мережі: проектування, експлуатація і реконструкція.

3. Розробка і впровадження нових методів поліпшення якості цільового продукту, підвищення надійності всієї системи в цілому й окремих її елементів, науково-дослідні розробки в області раціонального розвитку трубопровідних систем.

4. Короткострокове прогнозування споживання (місячне, тижнєве, добове) для обчислення необхідних обсягів виробництва і резервування цільового продукту для покриття дефіциту в моменти пікового споживання.

5. Укладання режимних карт для активних елементів трубопровідної системи (насосних і компресорних станцій, перекачуючих апаратів, регулюючих пунктів) залежно від зовнішньої температури, дня тижня, часу доби та інших критичних параметрів.

6. Розрахунок траєкторій переведення системи з одного стаціонарного режиму в інший з урахуванням динаміки перехідних процесів для запобігання небажаних наслідків різких змін тиску, зокрема розрахунок гідравлічного удару.

7. Проведення профілактичних робіт з метою підвищення надійності системи.

8. Керування матеріально-технічними запасами і проведення розрахунків із споживачами і постачальниками.

9. Проведення заходів щодо попередження забруднення навколишнього середовища.

10. Збір і обробка оперативної технологічної інформації з параметрів, що характеризують стан середовища, системи постачання і споживачів.

11. Керування режимами роботи наближених до споживачів активних елементів трубопровідної системи за складеними режимними картками.

12. Аварійно-рятувальні роботи, локалізація і усунення наслідків аварій, в тому числі екологічні наслідки.

13. Відстеження розрахункових траєкторій переведення трубопровідної системи з одного режиму в інший при зміні структури й стану трубопровідної системи.

Вербальна постановка завдань являє собою складні й заплутані лексеми, що утруднює їхнє розуміння і аналіз. Внесення яких-небудь змін у функціональну структуру ТТС або зміну вимог до інформаційного забезпечення системи важко відстежити, а тим більше змодельювати. Тому для аналізу ТТС доцільно застосувати CASE-технології [5], що засновані на методологіях структурного або об'єктно-орієнтованого аналізу і проектування, які використовують специфікації у вигляді діаграм або текстів для опису зовнішніх вимог, зв'язків між моделями системи, динаміки поведінки системи. Ці методології закріплені в наборі правил, графічних елементів і дій, пов'язаних з ними. Такий набір називається нотаціями. Однією з базових нотацій є нотація IDEF0. Тут CASE-засоби і нотація IDEF0, зокрема, використані для ілюстрації проведеного нижче аналізу процесів функціонування у ТТС і її підсистемах.

Модель у нотації IDEF0 являє собою сукупність ієрархічно упорядкованих і взаємозалежних діаграм. Спочатку проводиться опис системи в цілому та її взаємодії з навколишнім середовищем, після чого виконується функціональна декомпозиція – система розбивається на підсистеми. Процеси, функції або завдання системи, що моделюється, подаються у вигляді робіт. Роботи зображують у вигляді прямокутників. Взаємодія робіт із зовнішнім середовищем і між собою описується у вигляді стрілок. Така група утворює контекстну діаграму (рис. 1.8).

У рамках цих досліджень аналіз процесів експлуатації і розвитку в ТТС проведений за допомогою пакета VPwin. На сьогоднішній день пакет VPwin є одним із самих простих і ефективних засобів для розв'язання завдань системного аналізу і проектування систем. Пакет дозволив максимально систематизувати основні функції системи, скласти існуючу модель процесів і показати, як вона зміниться при контролі й урахуванні функціональної надійності системи, обґрунтувати й підтвердити раніше висунуту потребу в

методах розрахунку функціональної надійності, відповіді на запитання, кому і навіщо необхідно мати методіку розрахунку функціональної надійності.

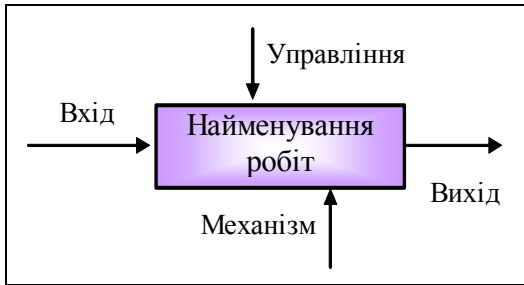


Рис. 1.8 – Контекстна діаграма

Традиційно при дослідженні питань раціонального розвитку трубопровідної мережі її основна частина – трубопровідна розподільна система – розглядалася як окремий об'єкт, що функціонує в деякому середовищі [17]. При такому підході до середовища відносять зовнішні підсистеми й некеровані на даному рівні підсистеми.

Використаємо спосіб штучного виділення об'єкта із середовища для вивчення процесів функціонування ТТС у цілому. До зовнішнього середовища віднесемо екологічну й економічну обстановку в місті й державі, споживачів, природні джерела й родовища цільового продукту, постачальників, а також вище керівництво. Виділяючи згідно з CASE-технологіями механізми, вхід, вихід і управління, побудуємо функціональну діаграму, що подана на рис. 1.9.

На діаграмі подвійна стрілка відповідає управлінню за критерієм надійності. На жаль, управління існуючими ТТС за критерієм надійності не робиться через відсутність методів розрахунку функціональної надійності для складних еволюційних систем. Оскільки ці методи є предметом поточних досліджень, то присутність «Вимог надійності» на діаграмі не є випадковою. Більше того, в даному системному аналізі вони є ключовими, а самий аналіз

покликаний визначити роль і місце надійності в експлуатації і розвитку ТТС.

На функціональній діаграмі (рис. 1.9) зв'язок «Вимоги надійності» говорить про необхідність урахування надійності на всіх етапах розвитку й експлуатації ТТС. При цьому перевага повинна віддаватися не інтуїтивному врахуванню із залученням евристичних методів розрахунку надійності, а формалізованому врахуванню за допомогою математично обґрунтованих методів.



Рис. 1.9 – CASE-діаграма зв'язку трубопровідної транспортної системи з зовнішнім середовищем

ТТС має два виходи у зовнішнє середовище: «Цільовий продукт» і «Ефективність». Перший вихід відповідає основному призначенню системи задовольняти потреби споживачів. Другий вихід визначає доцільність існування системи: якщо постачання ЦП буде здійснюватися неефективно, то система вступить у конфлікт із зовнішнім середовищем, що приведе до загибелі всієї системи.

З огляду на функціональні вимоги й характеристику досліджуваного об'єкта виділимо основні підсистеми.

1. Адміністративна підсистема.
2. Підсистема основного виробництва.
3. Підсистема допоміжного виробництва.
4. Організаційно-економічна підсистема.

Усі перераховані підсистеми зв'язані в єдине ціле за допомогою входів, виходів і управлінських впливів. Схема взаємозв'язку підсистем наведена у вигляді CASE-діаграми на рис. 1.10. На діаграмі виділені два зв'язки із зовнішнім середовищем і всі зв'язки між підсистемами ТТС, що мають відношення до надійності, а саме:

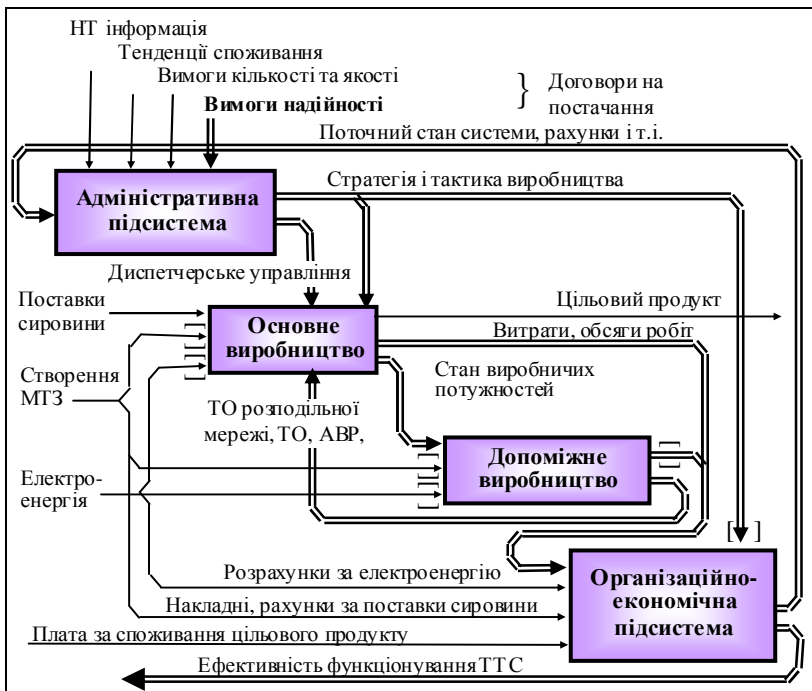


Рис. 1.10 – CASE-діаграма взаємозв'язку підсистем

## Оглядовий розділ

– зв'язок «Вимоги надійності», що визначає на підставі «Договори» нижній припустимий рівень функціональної надійності системи стосовно конкретного споживача;

– зв'язок «Стратегія і тактика виробництва», що враховує «Вимоги надійності» і визначального завдання на розвиток основного і допоміжного виробництва;

– зв'язок «Диспетчерське управління», що враховує «Вимоги надійності» і затверджує норми функціональної надійності, якими повинні керуватися диспетчери у процесі оперативного управління системою;

– зв'язок «Витрати, обсяги робіт», що інформує «Організаційно-економічну підсистему» про недовиконання постачань за рахунок утрати функціональної надійності (аварії та інші позаштатні ситуації в «Основному виробництві») і про роботи щодо підтримки необхідної функціональної надійності («Реконструкція, ТО, АВР, ППР» у «Допоміжному виробництві») для оцінки поточного стану системи й адекватного розрахунку ефективності її функціонування;

– зв'язок «Стан виробничих потужностей», що інформує «Допоміжне виробництво» про поточну функціональну надійність трубопровідної мережі в цілому й окремих її ділянок для наступної організації робіт із технічного обслуговування, аварійно-відбудовних і планово-попереджувальних робіт («ТО, АВР, ППР»);

– зв'язок «ТО розподільної мережі, АВР, ППР», що визначає роботи з підтримки необхідної функціональної надійності мережі, в тому числі реконструкцію мережі, що може бути забезпечена потужностями допоміжного виробництва;

– зв'язок «Поточний стан системи, рахунки і т.п.», що включає поточний стан системи щодо функціональної надійності й інформує про неї «Адміністративну підсистему» для планування виробництва і розподілу ЦП;

– зв'язок «Ефективність функціонування ТТС», що враховує всі показники експлуатації водогінної мережі, в тому числі функціональну надійність і визначальну конкурентоздатність системи (без урахування функціональної надійності система приречена на загибель).

Слід відмітити, що діаграма не враховує вплив функціональної надійності системи на стан підсистеми «Допоміжне виробництво» й стан зовнішнього середовища. А такий вплив має місце. Чим вище надійність системи, тим:

- рідше відбуваються позаштатні ситуації;
- рідше накладаються штрафні санкції;
- менше витрачається ЦП у непродуктивних цілях;
- менше виявляється соціальний і екологічний збиток;
- менше міститься штатних одиниць у ремонтних службах;
- менше потрібно ремонтної техніка і транспорту;
- менше витрачається і заготовлюється матеріалів на ремонтні роботи;
- вище виявляється привабливість системи для нових споживачів і т.п.

Як видно з діаграми, функціональна надійність здійснює безпосередній або непрямий вплив на роботу всіх підсистем. Ефективне вирішення всіх загальносистемних завдань, наведених на початку підрозділу і виникаючих на різних етапах експлуатації і розвитку ТТС, не може бути отримане без урахування функціональної надійності.

Проведений системний аналіз є досить стислим, оскільки охоплює тільки самий верхні рівні керування системою та її функціонування. Але навіть частково проведений аналіз підтверджує актуальність і своєчасність дослідницьких робіт з розробки методів розрахунку функціональної надійності, без яких неможливе її врахування для ефективного вирішення загальносистемних завдань і, як наслідок, для ефективного функціонування виробничої системи в цілому.

## **1.7. Експлуатація і розвиток трубопровідних транспортних систем з урахуванням надійності**

Нагадаємо, що метою нашого дослідження є *розвиток* теорії надійності трубопровідних транспортних систем із складною мережною структурою і *розробка* інженерної методики чисельного визначення показників технічної і функціональної надійності таких

систем. Ця мета цілком відповідає основним положенням програм з подальшого розвитку систем газопостачання і водопостачання великих міст України і відповідних постанов Кабінету Міністрів України. У досягненні поставленої меті зацікавлені як споживачі ТТС, так і проектувальники, експлуатаційники, експерти позаштатних ситуацій. Але найбільше зацікавленою стороною є диспетчерські служби комунальних підприємств і управлінь з експлуатації ТТС.

Диспетчери протягом робочої зміни часто приймають рішення, пов'язані зі зміною мережної структури систем. Необхідність у зміні структури виникає щоразу, коли:

- вводять у мережу нову або виводять стару ділянку;
- добавляють нове джерело або відмовляються від старого джерела;
- включають додатковий насосний агрегат або відключають діючий;
- підключають нового або відключають старого споживача;
- ставлять ділянку мережі на профілактику або вводять її в експлуатацію після завершення профілактичних робіт;
- замінюють зношені ділянки на нові.

Крім перелічених регламентних ситуацій можуть виникати й позаштатні ситуації. Протягом тільки однієї доби у водогінній мережі великого міста може відбутися до 10-ти серйозних аварій і більше. При виникненні будь-якої аварії диспетчер зобов'язаний оперативно вжити заходи з її локалізації та усунення. Несвоєчасне усунення аварії може привести до катастрофічних наслідків. Природно, аварійні ділянки мають бути виведені зі структури мережі на час її усунення.

Будь-яка зміна структури ТТС спричиняє зміну її технічної і функціональної надійності. Якщо при цьому надійність опускається нижче мінімальної припустимої, виникає додаткова загроза катастрофи від підприємств-споживачів із безперервним циклом виробництва.

При зміні структури мережі диспетчер повинен вибрати найбільш раціональний режим подальшої роботи системи. Існуючий підхід до вибору режиму заснований на розрахунку критерію міні-



муму сумарних надлишкових напорів у вузлах мережі і не передбачає при цьому навіть оцінку показників технічної надійності. Тому факт падіння функціональної надійності нижче мінімально припустимого значення залишається просто непоміченим. Ця обставина часто є причиною виникнення так званих ланцюжкових аварій. Ситуація ускладнюється ще й тим, що не існує методики оперативного розрахунку або хоча б оцінки функціональної надійності залежно від зміни структури мережі. Саме тому диспетчер у процесі прийняття рішень не може враховувати кількісні показники надійності. Він також не може порівнювати між собою варіанти припустимих рішень за критерієм надійності й вибирати з них ті, що забезпечать максимально можливу надійність у створеній ситуації.

Відсутність методики розрахунку показників надійності для складних мережних структур негативно позначається на організації робіт з усунення аварій. Тільки за допомогою точного розрахунку надійності можна кваліфіковано визначити ступені важливості аварій, які одночасно виникають або одночасно усуваються. Тільки точний розрахунок може показати, усунення якої аварії забезпечує найбільш вагоме збільшення надійності системи в цілому і надійності постачання цільового продукту окремим споживачам.

Не менш важливий розрахунок надійності для організації робіт із реновації трубопроводів – профілактики і відновлення фізично зношених ділянок. Тут точний розрахунок надійності дозволяє не тільки виявляти ненадійні ділянки або підмережі, а і кваліфіковано складати графік профілактичних робіт для всієї мережі.

Аналогічна ситуація має місце при проектуванні мереж або їхньої реконструкції. Тільки точний розрахунок може дати відповідь на запитання, який з варіантів зміни структури мережі з погляду надійності є кращим і наскільки кращим.

Оскільки показники технічної і функціональної надійності в процесі експлуатації ТТС або не враховуються, або враховуються на інтуїтивному рівні, то експлуатація ТТС не може вважатися ефективною як з погляду досягнення кінцевої мети (постачання цільового продукту всім споживачам у заданій кількості і заданій якості), так і з погляду екологічної безпеки.

Запропонований підхід експлуатації і розвитку ТТС будується на основі модифікації існуючих підходів, шляхом додавання до них ряду нових положень, що вимагають *контролю, врахування і забезпечення кількісних показників надійності* на всіх етапах еволюції ТТС. Суть нового підходу полягає в наступному.

Нехай на момент часу  $t$  рішення  $r^*$  з проектування або керування ТТС, пов'язане зі зміною структури мережі, вибирається з множини  $\mathbf{R}$  альтернативних варіантів,  $\mathbf{R} = \{r_j\}$ ,  $j = \overline{1, m}$ . Прийняття будь-якого рішення  $r_j$  і його реалізація приводять до нової структури мережі з новим станом, що характеризується набором величин:

–  $h_{ji}(t)$ ,  $q_{ji}(t)$  – напір (тиск) і витрата на  $i$ -му споживачеві цільового продукту в ТТС після прийняття і реалізації  $j$ -го варіанта рішення,  $i = \overline{1, n_j}$ ;

–  $n_j$  – загальне число споживачів, підключених до ТТС, після прийняття і реалізації рішення  $r_j$ ;

–  $K_j(t)$  – показник ефективності функціонування ТТС, при виборі  $j$ -го варіанта рішення;

–  $p_{ji}^f(t)$  – у загальному випадку функціонал від технічної надійності елементів ТТС, що визначає функціональну надійність ТТС відносно  $i$ -го споживача при виборі  $j$ -го варіанта рішення.

Тоді вибір будь-якого варіанта рішення  $r_j$ , пов'язаного зі зміною структури мережі ТТС на будь-якому етапі її еволюції (проектування, експлуатації, розширення, реконструкції), повинен супроводжуватися *кількісним аналізом показників надійності*.

*Примітка.* При проектуванні трубопровідних систем з використанням запропонованого підходу слід прийняти  $t = 0$ , оскільки в процесі проектування ніякого зносу і старіння елементів ТТС не відбувається. У цьому випадку значення функціонала  $p_{ji}^f(t)$  встановлюється розрахунковим шляхом з використанням значень технічної надійності елементів ТТС, узятих з технічних паспортів,

тобто коли термін експлуатації всіх конструктивних елементів системи  $t = 0$ .

Запропонований підхід після проведення традиційно обов'язкового розрахунку і перевірки на допустимість показників потоко-розподілу для кожного альтернативного варіанта структури мережі вимагає в обов'язковому порядку здійснення кількісного розрахунку й перевірки на допустимість показників функціональної надійності. У разі одержання негативного результату в ході перевірки відношення  $p_{i \text{ аін.}}^f \leq p_{ji}^f$  хоча б для одного споживача треба негайно відмовитися від  $j$ -го альтернативного рішення.

Для проектувальників, ремонтних і диспетчерських служб ТТС процедура ухвалення рішення може відповідати схемі алгоритму, наведеного на рис. 1.11. Тут формування множини варіантів рішень  $\mathbf{R} = \{r_j\}$  ( $j = \overline{1, m}$ ) здійснюється евристичними методами на підставі досвіду особи, яка приймає рішення, або задається компетентними службами, наприклад, при проведенні експертизи. Величина  $G$  – константа зі значенням, набагато переважаючим будь-яке можливе значення критерію  $K$ , наприклад,  $10^{15}$  (більше бюджету будь-якої країни).

У схемі алгоритму як критерій ефективності проектування або експлуатації ТТС використаний показник сумарних надлишкових напорів на споживачах:

$$K_j(t) = \sum_i^{n_j} (h_i(t) - h_{i \text{ аін.}}), \quad (1.5)$$

де  $K_j(t)$  – поточне значення показника, що розраховується для кожного припустимого варіанта рішення  $r_j$  ( $j = \overline{1, m}$ );  $h_{ji}(t)$  – поточний напір (тиск) на  $i$ -му споживачеві після прийняття і реалізації  $j$ -го варіанта;  $h_{i \text{ аін.}}$  – необхідний напір на  $i$ -му споживачеві.

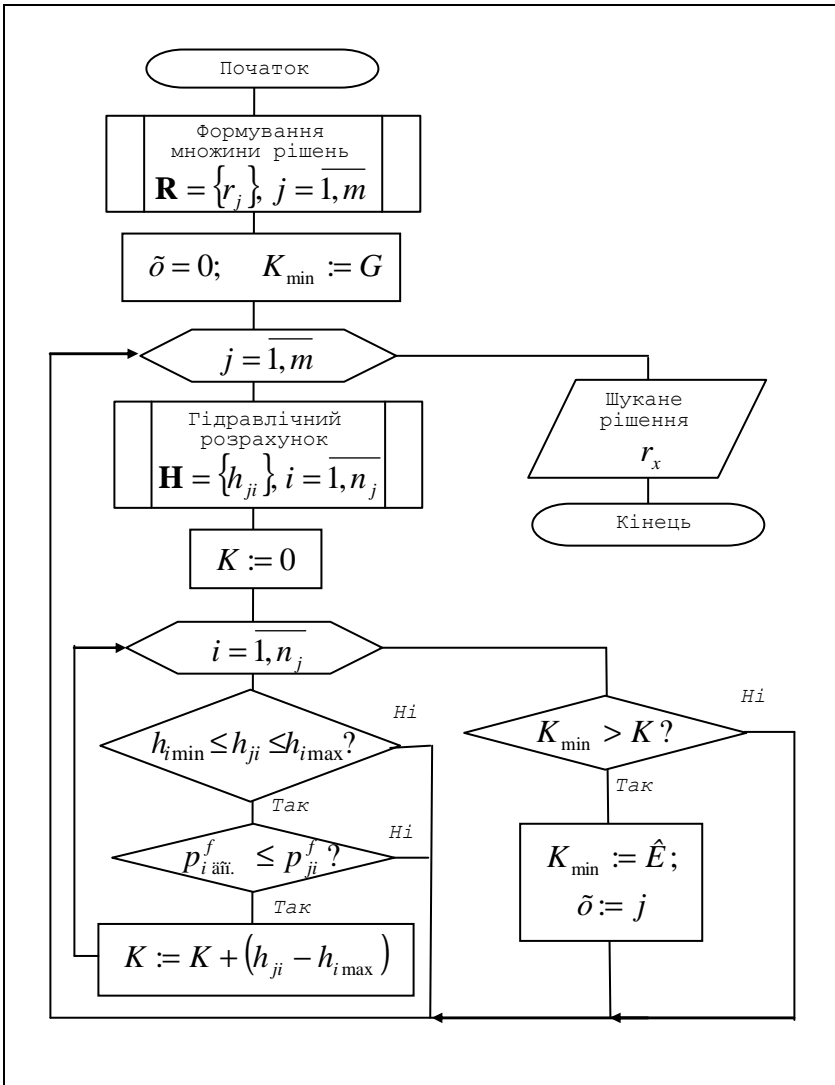


Рис. 1.11 – Схема алгоритму прийняття рішення

Мінімальне значення показника визначає вибір варіанта рішення.

Критерій мінімуму сумарних надлишкових напорів (1.5) найбільш часто використовується для оцінки ефективності проєктованих і діючих ТТС. Замість показника (1.5) при незначних модифікаціях схеми алгоритму можуть бути використані інші критерії ефективності, що наведені в [16, 20]. При цьому аналіз умов

$$p_{ji}^f(t) \geq p_{i_{\text{анн}}} , \quad i = \overline{1, n} , \quad (1.6)$$

які не дозволяють системі вийти з припустимої області безпечного функціонування, повинен бути присутній завжди.

Якщо в результаті роботи алгоритму одержимо  $x = 0$ , то це свідчить про відсутність прийнятного рішення. У даному випадку треба або наново сформулювати множину альтернативних рішень  $\mathbf{R}$ , або знизити вимоги до прийнятого рішення, а саме зменшити  $h_{i_{\text{мін}}}$  чи  $p_{i_{\text{анн}}}^f$ , збільшити  $h_{i_{\text{макс}}}$ .

Слід відзначити, що немає принципової різниці в послідовності проведення процедури гідравлічного розрахунку і процедури аналізу умов (1.6) для  $j$ -го варіанта. Рекомендується використовувати алгоритм, наведений на рис. 1.11, якщо час виконання процедури гідравлічного розрахунку менше часу виконання процедури аналізу (1.6). У протилежному разі алгоритм необхідно модифікувати, змінюючи порядок проведення процедур на зворотній.

Таким чином, запропонований підхід експлуатації і розвитку трубопровідної транспортної системи відрізняється від існуючих додатковими вимогами, що полягають у необхідності *контролю, обліку й забезпечення кількісних показників надійності* на всіх етапах еволюції ТТС. Природно, такий підхід вимагає наявності інженерної методики розрахунку величин  $p_{ji}^f$ , необхідних для проведення аналізу умов (1.6).

## 1.8. Завдання дослідження

Запропонований підхід до проектування і експлуатації ТТС можна реалізувати тільки за наявності методики інженерного розрахунку функціональної надійності системи відносно кожного споживача, тобто надійності постачання цільового продукту кожному споживачеві:

$$p_{ji}^f(t), \quad j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1.7)$$

Методи розрахунку надійності трубопровідних мереж пов'язані із завданням визначення часу, протягом якого трубопровідна мережа знаходиться у справному стані, стані з одною відключеною ділянкою, двома і т.д. Дане завдання досить докладно вивчене, відомі розрахункові формули для визначення шуканого часу. Також є можливість розрахувати відносний час знаходження ділянки у відключеному стані. Проте цю інформацію не можна вважати повною, оскільки вона не дозволяє визначити *поточну функціональну надійність* (1.7).

Для *конкретної* конфігурації мережі діючих ТТС для розрахунку величин (1.7) теоретично можна скористатися методами статистики, що вимагають досить великих часових витрат для набору самої статистики. Однак навіть для діючих ТТС практично забезпечити такий розрахунок для *довільної* конфігурації не можливо через астрономічне число варіантів структур мережі  $N = 2^z$ , де  $z$  – сумарна кількість одиниць запірної арматури в мережі. Для діючих ТТС величина  $z$  може досягати до тризначного числа. Для порівняння:  $2^{100} \approx 10^{30}$ . Для проєктованих ТТС статистичні методи оцінки функціональної надійності взагалі не прийнятні.

Дослідження авторів цієї монографії насамперед спрямоване на розробку формальних методів визначення функціональної надійності (1.7) для прийняття оперативних рішень у процесі проєктування та експлуатації ТТС у реальному масштабі часу або порівнянному із таким.

Для реалізації нового підходу до експлуатації і розвитку ТТС, а також досягнення мети дослідження (див. підрозділ 1.5), треба вирішити наступні завдання:

1. Виконати порівняльний аналіз існуючих методів розрахунку надійності функціонування ТТС з метою виявлення таких підходів до оцінки надійності системи, що враховували б показники, які відображують забезпеченість споживачів цільовим продуктом протягом певного періоду часу.

2. Розробити метод визначення відносного часу (в процентному вираженні), протягом якого споживач розподільних трубопроводних систем одержує цільовий продукт залежно від структури мережі й надійності її окремих елементів. Іншими словами, розробити метод розрахунку надійності постачання цільового продукту конкретному користувачеві в існуючих або проєктованих комунальних трубопроводних мережах.

3. Узагальнити розроблений метод на магістральні трубопроводні системи.

4. Продемонструвати доцільність і ефективність застосування розробленого методу розрахунку функціональної надійності при аналізі різних конструкцій магістральних трубопроводів.

5. Визначити напрямки подальшого розвитку теорії функціональної надійності трубопроводних транспортних систем.

Наведений перелік є змістовною постановкою завдань у даному дослідженні. Розв'язання цих завдань дозволить здійснити новий підхід до проєктування та експлуатації ТТС завдяки урахуванню функціональної надійності на всіх етапах розвитку систем.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ТРУБОПРОВІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

У попередньому розділі була дана загальна характеристика проблеми надійності для напірних трубопровідних транспортних систем. Розглянемо тепер існуючі підходи до оцінки надійності таких систем.

#### **2.1. Загальна характеристика методів і показників надійності трубопровідних систем**

Напірні трубопровідні транспортні системи є складними інженерними об'єктами, стан яких у процесі функціонування, як правило, відрізняється від запланованого внаслідок:

- змінного характеру споживання цільового продукту;
- подальшого розвитку трубопровідної мережі зі зміною її структури і параметрів окремих ділянок;
- наростаючих темпів зносу і старіння всіх конструктивних елементів системи;
- обмеженості фінансових ресурсів на відновлення та модернізацію інженерних систем;
- відсутності нормативно закріплених методів оцінки надійності трубопровідних транспортних систем складної топології і великої розмірності.

Невизначеність стану призводить до зниження надійності існуючих трубопровідних транспортних систем, порушує безперервність постачання цільового продукту (ЦП) споживачам, а в умовах



дефіциту ЦП не дозволяє вирішувати завдання його раціонального розподілу між споживачами.

У роботах [11, 18-19, 21-22] пропонуються різні показники для оцінки надійності. До них можна віднести:

- *відносні показники*, що відображують час перебування системи у справному стані, стані з одним, двома відключеними ділянками;

- *ймовірнісні показники* надійності, що характеризують надійність мережі в цілому, надійність окремих ділянок або фрагментів мережі, ймовірність одержання продукту кожним окремим споживачем.

Завдання визначення часу знаходження мережі у справному стані викликає підвищений інтерес у проектувальників і експлуатаційників трубопровідних транспортних систем. Пов'язано це з тим, що відносний час знаходження транспортної мережі у справному стані, крім свого основного призначення, служить ще для розрахунку інших показників, що характеризують різні експлуатаційні якості мережі. Але саме головне – розрахунок часу знаходження мережі у справному стані для нескладних мереж лінійно залежить від загальної протяжності трубопроводів мережі, тобто над дослідниками й інженерами-практиками не тяжіє «прокляття великої розмірності» мережі. Тому останнім часом завдання визначення часу знаходження мережі у справному стані, стані з одною відключеною ділянкою, двома і т.д. присвячується все більше робіт [11, 36] з описом методик оцінювання цієї величини.

Існуючі підходи до вирішення завдань аналізу технічної надійності ТТС базуються на застосуванні прямих і непрямих методів розрахунку надійності (рис. 2.1).

Застосування *прямих методів*, заснованих на обробці даних експлуатації або статистичних випробувань про відмови системи, для оцінки показників надійності ТТС і її підсистем (джерела ЦП і трубопровідної мережі) через їх специфіку обмежено. Основна причина полягає в тому, що статистична інформація, яка отримана у процесі експлуатації одного об'єкта, звичайно не може бути узагальнена на інші системи. Навіть в рамках однієї системи отримання сукупної інформації про всі підсистем ускладнено вна-

слідок унікальності самих підсистем і різних режимів їх функціонування. До того ж прямі методи не вирішують завдання оцінки надійності при довільній зміні структури мережі.

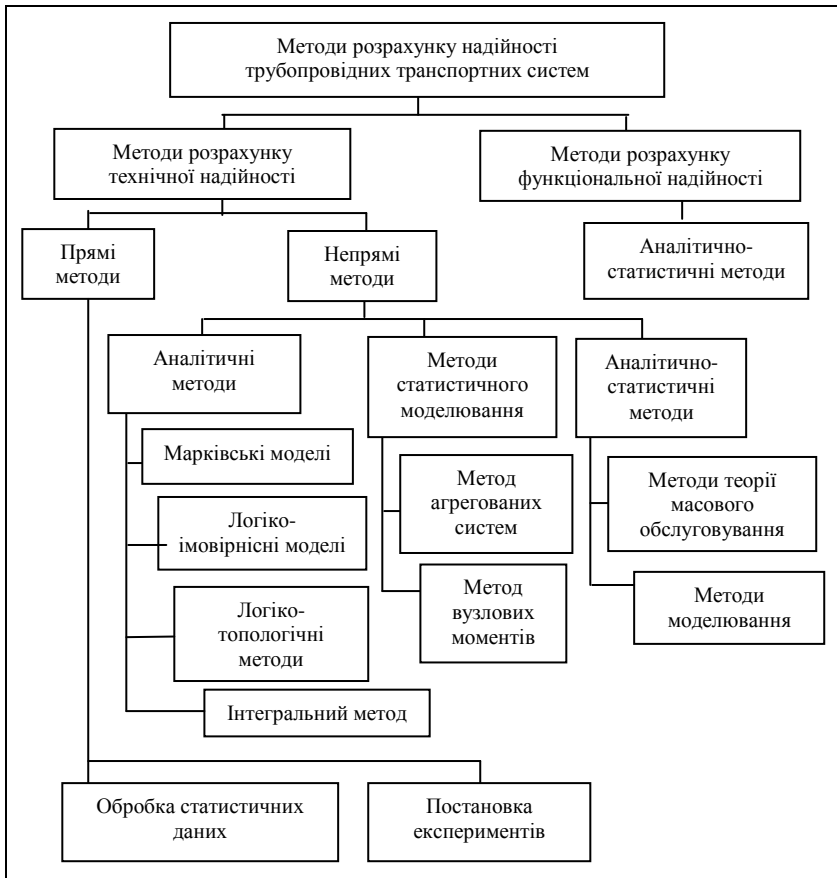


Рис. 2.1 – Класифікація методів розрахунку надійності трубопровідних транспортних систем

Основними для розв'язання завдань аналізу надійності ТТС є *непрямі методи*, що припускають розрахунок показників надійності складного об'єкта за характеристиками надійності його окремих елементів. Серед непрямих можна виділити три класи методів:

- аналітичні,
- статистичного моделювання,
- аналітично-статистичні.

Аналітичні методи [30, 32, 46] забезпечують високу точність розрахунків і дозволяють досліджувати залежності показників надійності від різних чинників і умов функціонування в будь-яких інтервалах часу. При цьому процес функціонування системи зводиться звичайно до моделі напівмарківського або багатомірного марківського процесу [12]. Основними *аналітичними методами* для розрахунку показників надійності ТТС є: пряме обчислення ймовірностей (включаючи логіко-ймовірнісні методи), диференціальні й інтегральні методи [46], які інтерпретовані до аналізу надійності систем.

Можливості аналітичних методів, як правило, обмежені складністю математичного опису системи (особливо при законах розподілу наробітку на відмову і часу відновлення, відмінних від експоненціальних). Додаткові обмеження виникають у зв'язку з необхідністю апріорного виділення суттєвих чинників, що впливають на надійність і залучені до математичної моделі.

Аналітичні методи розрахунку надійності ТТС об'єднують:

- методи, засновані на використанні марківських і напівмарківських моделей;
- логіко-ймовірнісні методи;
- логіко-топологічні методи.

*Марківські моделі* оцінки надійності ґрунтуються на апараті дискретних марківських процесів із неперервним часом. Теоретичні питання використання таких моделей для оцінки надійності технічних систем досить докладно висвітлені в роботах [24, 30, 48]. Область застосування цих моделей при аналізі надійності ТТС обмежується вимогою до закону розподілу часу наробітку на

відмову й часу відновлення елементів, який у даному разі повинен бути винятково експоненціальним.

*Напівмарківські моделі* [27] передбачають розв'язання систем інтегральних або алгебраїчних рівнянь, які описують процес функціонування ТТС як складної системи і які записані з використанням перехідних імовірностей. Для їх розв'язання застосовують пряме і зворотне операційні перетворення Лапласа і Лапласа-Карсона в сполученні з ітераційними методами [31].

Суттєвими перевагами напівмарківських моделей є: можливість одержання компактних наближених аналітичних залежностей для розрахунку показників надійності, зручність застосування чисельних методів і комп'ютерної обробки, малий час рахунку. До їх недоліків можна віднести трудність обґрунтування ряду припущень, пов'язаних з декомпозицією структури ТТС, а також швидке зростання складності аналізу при подальшій деталізації структури.

До *логіко-імовірнісних методів* (ЛІМ) відносяться методи [40, 41], в яких математичні моделі надійності елементів і системи описуються за допомогою алгебри логіки, а показники надійності – теоремами теорії ймовірностей, причому і те, й інше здійснюється в неявній формі [40, 41].

Основними перевагами логіко-імовірнісних методів є: чіткість, однозначність і високий ступінь формалізації при описі об'єкта дослідження; виконання розрахунку й аналізу надійності на єдиній методичній основі.

Розрахунок надійності за допомогою логіко-імовірнісних методів складається з двох етапів. Мета першого – перехід від словесного опису процесу функціонування системи до формалізованого опису. Мета другого – кількісне урахування у формальному описі показників надійності системи в цілому й показників надійності окремих її елементів.

Наближеним логіко-імовірнісним методом можуть вважатися *таблиці готових рішень*, що рекомендуються для вирішення часткових завдань аналізу надійності, але також можуть бути використані для наближеного аналізу великих систем.

Недоліком даного методу є необхідність вербального опису процесу функціонування системи на першому етапі і його заміни на формальний опис, що робить метод малоефективним при оперативному розрахунку надійності системи, пов'язаному зі зміною її структури.

До *логіко-топологічних методів* (ЛТМ) відносяться методи, в яких математичні моделі надійності елементів і системи описуються, як і в ЛІМ, за допомогою алгебри логіки, а на другому етапі, при знаходженні показників надійності систем, використовуються аналітичні вирази, отримані за допомогою спеціалізованих *топологічних методів* [28]. Для топологічних методів характерно подання умов функціонування системи у вигляді графа станів. При цьому показники надійності обчислюються без укладання і вирішення систем рівнянь, за допомогою різного роду аналітичних виразів і мнемонічних правил. Перевагою логіко-топологічних методів є безпосереднє знаходження показників надійності за допомогою логічних функцій без обчислення ймовірностей працездатного і непрацездатного станів системи. До недоліків їх можна віднести громіздкість обчислень при знаходженні точного рішення, тому що розрахунок фактично виконується не на основі обчислення логічних функцій, а за складними моделями, що описують можливі стани системи.

Для ЛІМ і ЛТМ на будь-якому з двох етапів розрахунку має місце як виконання точних, так і наближених дій з оцінкою знака і значення похибки.

Методи *статистичного моделювання* [3, 25], які базуються на тому, що ймовірність випадкової події можна оцінити частотою її появи за досить тривалий час функціонування, вільні від обмежень на складність об'єкта і тип функцій розподілу випадкових величин. Ці методи дозволяють враховувати індивідуальні властивості об'єктів, умови експлуатації і т.д. Основним недоліком їх є надмірні витрати часу при оцінці надійності систем з великим числом елементів при дослідженні залежностей показників надійності від суттєвих чинників, а також при аналізі систем із значною надійністю. Методи статистичного моделювання, як і прямі методи, не вирішують завдання оцінки надійності при довільній зміні структури трубопровідної мережі. Тому застосування їх більш ефекти-

вне при дослідженні надійності джерел ЦП, що мають у порівнянні з розподільною мережею набагато менше структурних елементів.

*Аналітико-статистичні методи* [25, 26, 32] – найбільш перспективний напрямок у дослідженні надійності як ТТС у цілому, так і її окремих підсистем. Пояснюється це тим, що, з одного боку, ці методи за рахунок своєї аналітичної частини дозволяють прискорити процес оцінки, а з другого – за рахунок статистичної збільшити її адекватність.

Як вже говорилося, відомі непрямі методи розрахунку надійності, що застосовуються до ТТС, можна класифікувати за використанням математичним апаратом на аналітичні, статистично-моделюючі й аналітико-статистичні. Крім того, всі методи можна розділити за підходом до відтворення властивостей об'єкта при оцінці його надійності на:

- методи, що враховують його окремі випадкові стани і дозволяють визначити частоту відмов і час відновлення;
- методи, що враховують випадкові процеси функціонування об'єкта і дозволяють визначати функції розподілу тривалості будь-яких його станів.

Зазначені методи, як правило, застосовуються для розрахунків надійності трубопровідних мереж в магістральних системах. Для розрахунків надійності розподільних мереж повинні застосовуватися модифікації вказаних методів, які б дозволили виконувати розрахунки для об'єктів великої розмірності.

Таким чином, аналіз існуючих методів розрахунку надійності трубопровідних транспортних систем дозволяє зробити наступні висновки:

- статистичні методи, що забезпечують найбільш адекватні оцінки технічної й функціональної надійності незалежно від складності й розмірності мереж, потребують надмірні витрати часу при визначенні надійності систем, не в змозі оцінити надійність залежно від складності структури мережі й не придатні для проектування нових мереж;
- аналітичні методи, що спроможні визначати показники надійності залежно від структури мережі, не забезпечують певної

адекватності і практично не придатні для оцінки надійності мереж великої розмірності;

– аналітично-статистичні методи, що вважаються найбільше перспективними для оцінювання показників надійності, потребують подальшого удосконалення та розвитку з метою їх застосування для розподільних мереж великої розмірності й складності.

Зроблені висновки висувають потребу в новому методі, який на відміну від існуючих дозволяв би здійснювати розрахунки функціональної надійності системи для великих і складних трубопровідних мереж. Метод повинен бути здатним вести розрахунки як для мереж, що тільки проектується, так і для мереж, що експлуатуються або набувають подальшого розвитку. Крім того, новий метод повинен бути досить оперативним, щоб диспетчерські служби були спроможні обчислювати й аналізувати зміни функціональної надійності при зміні структури або експлуатаційних режимів мереж, тобто всі необхідні розрахунки повинні робитися в реальному масштабі часу.

Наведені вимоги є головними орієнтирами для дослідників, які прагнуть удосконалити існуючі або розробити нові методи для розрахунку функціональної надійності складних мереж. Саме цими вимогами ми керувалися в своїх дослідженнях, спрямованих на розробку універсального методу обчислення функціональної надійності.

## **2.2. Аналіз чинників невизначеності у процесах експлуатації трубопровідних систем**

Експлуатація ТТС є складним технічним і організаційним завданням. При цьому проблеми, пов'язані з масштабністю і технічною складністю систем, наявністю різноманітних вимог до них, доповнюються проблемами невизначеності поведінки і стану системи в результаті впливу випадкових збурень, дефіциту інформації та участі людини в управлінні.

До випадкових збурень, що впливають на систему, слід віднести:

– *технічні* (аварійні відмови запірної арматури, устаткування насосних і компресорних станцій, пошкодження труб та ін.);

## Трубопровідні транспортні системи

– *технологічні* (знос ділянки мережі з наступним її вилученням із функціонуючої системи для проведення ремонтно-відбудовних робіт; введення в експлуатацію ділянки, що знаходилися у ремонті або на профілактиці; зміна режимів споживання і подачі ЦП);

– *метеорологічні* і *геологічні* (температура, тиск і вологість атмосферного повітря, швидкість вітру, температура ґрунту, зміщення шарів ґрунту).

Причинами наявності дефіциту інформації можуть бути:

- відмови датчиків;
- збої в системах збору й обробки інформації;
- недостатня частота або точність одержуваних результатів вимірів;
- відсутність датчиків у необхідних місцях;
- неможливість передачі даних про стан і параметри системи в центр прийняття управлінських рішень.

Участь людини в управлінні як особи, яка приймає рішення (ОПР), визначає ряд додаткових проблем:

- суб'єктивний характер формулювання цілей керування;
- суб'єктивність ухвалення рішення про видачу управлінських впливів;
- різний професійний рівень ОПР;
- об'єктивна складність обліку всіх чинників невизначеності й сукупності технологічних обмежень на режими роботи устаткування.

Усі вище перераховані випадкові впливи на ТТС і причини дефіциту інформації визначають наступні характерні для системи типи невизначеності:

- невизначеність моделі об'єкта керування, що виявляється в її неадекватності й неточності інформації про фактичні значення параметрів цієї моделі;
- невизначеність стану системи, що виявляється в неповноті й невірогідності інформації про параметри поточного режиму роботи;



– невизначеність середовища, в якому функціонує система, що виявляється у зміні процесів споживання і подачі ЦП, а також випадковому характері метеорологічних умов;

– невизначеність цілі керування, що виявляється в неоднозначності формалізації глобального критерію, і множини локальних показників якості й ефективності функціонування системи.

Завдання раціональної експлуатації і розвитку ТТС у широкому розумінні полягають в узгодженні поточного стану і тенденцій розвитку середовища з поточним станом і розвитком об'єкта дослідження. Неповнота і невірогідність інформації про поточні й майбутні стани середовища і об'єкта неминуче приводить до помилок у їх оцінці, що, в свою чергу, спричиняє помилки в розрахунку надійності системи. Тому на етапі проектування і реконструкції ТТС важливе врахування якщо не всіх, то хоча б основних чинників невизначеності умов функціонування ТТС.

Розглядаючи діючу трубопровідну мережу з урахуванням вищевикладених чинників невизначеності, доцільно скласти уявлення про її можливі стани в процесі функціонування, а також про характер переходів системи з одного стану в інший. При цьому будемо намагатися зв'язувати різні стани системи з її структурою. Тим більше що вихід з ладу будь-якого елемента і вилучення його зі складу системи безпосередньо тягне за собою зміну структури функціонуючої частини системи.

### **2.3. Аналіз потоків відмов і відновлення у трубопровідних транспортних системах**

Як вже відзначалося, причинами переходу мережі з одного стану в інший є зовнішні й внутрішні впливи, викликані технічними несправностями, зміною рівня споживання продукту, що транспортується, і подібними їм подіями, що мають стохастичний характер. Можливі стани системи наочно зображуються за допомогою так званого графа станів (рис. 2.2), на якому стани системи відображені прямокутниками, а можливі переходи системи зі одного стану в інший – стрілками, що з'єднують відповідні прямокутники.

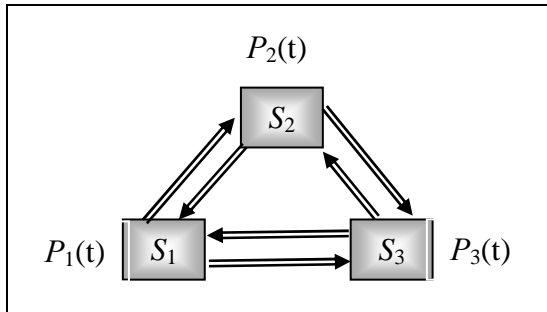


Рис. 2.2 – Граф станів системи, що має три можливих стани

Для опису випадкового процесу, що протікає в системі з дискретними станами  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , використовують *ймовірності станів*:

$$P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t), \quad (2.1)$$

де  $P_k(t)$  – ймовірність того, що в момент часу  $t$  система знаходиться у стані  $S_k$ .

Ймовірності  $P_k(t)$  задовольняють умові

$$\sum_{k=1}^n P_k(t) = 1. \quad (2.2)$$

Випадковий процес, що протікає в системі, є процесом з дискретним часом, якщо переходи системи зі стану в стан можливі тільки в конкретні моменти часу  $t_1, t_2, \dots$ . Для процесу з неперервним часом характерні переходи системи зі стану в стан у будь-який момент часу.

Якщо в системі з дискретними станами відбувається випадковий процес із перервним часом, то переходи системи зі стану в стан являють собою випадковий потік подій. Випадковий процес з дискретними станами є *марківським*, якщо всі імовірнісні характе-

ристики процесу в майбутньому залежать лише від того, в якому стані цей процес знаходиться в поточний момент часу, і не залежать від того, яким способом цей процес протікав у минулому («майбутнє залежить від минулого тільки через дійсне»). Якщо процес марківський, то всі потоки подій, що переводять систему зі стану в стан, є пуассонівськими.

Послідовність подій, що відбуваються один за одним у випадкові моменти часу, утворює потік подій [6]. Важливою властивістю потоку подій є його інтенсивність – середнє число подій, що відбуваються за одиницю часу. При функціонуванні трубопровідної мережі на неї впливають два потоки подій: потік відмов з інтенсивністю  $\lambda$  і потік відновлення з інтенсивністю  $\mu$ . Потік відмов є наслідком аварій мережі, що відбуваються в довільні проміжки часу. Потік відновлення є наслідком роботи ремонтних бригад.

Для моделювання процесу відмов і відновлення у трубопровідній мережі досить визначення величин  $\lambda$  і  $\mu$ .

Перебування мережі в різних можливих станах може бути описане за допомогою математичного апарата марківських випадкових процесів із перервним часом за умови, що потоки відмов і відновлення в напірних трубопровідних системах є найпростішими потоками подій. Для виконання даної умови потоки відмов і відновлення повинні володіти трьома властивостями: стаціонарністю, ординарністю і відсутністю післядії. Саме такі потоки прийнято називати пуассонівськими [6].

Аналіз потоків відмови і відновлення в ТТС показує, що вони мають всі три обов'язкові властивості найпростіших потоків подій.

Так, стаціонарним потоком подій називають потік, для якого ймовірність влучення певного числа подій на задану часову ділянку залежить тільки від довжини ділянки  $T$  і не залежить від того, де на часовій осі  $t$  розташована ця ділянка. Якщо деякі часові інтервали  $T_1$  і  $T_2$ , що знаходяться на часовій осі  $t$  у різних місцях, рівні між собою, то рівні і ймовірності появи певного числа подій  $m$  протягом цих інтервалів часу  $P_1(X=m)$  і  $P_2(X=m)$ :

$$T_1 = T_2 \Rightarrow P_1(X=m) = P_2(X=m).$$

Тут  $X$  – випадкова величина, що позначає число появи події за певний період часу  $T$ .

Статистичні відомості про поведінку різних трубопровідних мереж говорять про те, що інтенсивність потоків відмов  $\lambda$  у них практично не залежить від часу. Безумовно, в міру зносу і старіння трубопровідних систем інтенсивність відмов повільно зростає за експоненціальним законом. Тому через певні періоди часу (після кожного сезону) її бажано коректувати. Однак протягом періодів часу, що не перевищують сезонний часовий відрізок, інтенсивність відмов можна вважати постійною величиною. Що ж стосується інтенсивності відновлення, то вона ще менше схильна до часових змін. Більше того, інтенсивність у більшій мірі залежить від кваліфікації ремонтних бригад. А оскільки склад бригад постійно оновлюються (недосвідчені молоді робітники вливаються у бригади, а досвідчені робітники покидають їх), то часові коливання кваліфікації ремонтних бригад несуттєві, і інтенсивність відновлення  $\mu$  також можна вважати постійною величиною. Таким чином, обидва потоки можна вважати стаціонарними.

Ординарним називають потік подій, для якого імовірність влучення двох і більше подій на нескінченно малу ділянку  $\Delta t$  занадто мала в порівнянні з імовірністю влучення однієї події на цю ділянку. Іншими словами, дві і більше відмови або відновлення за нескінченно малий проміжок часу відбутися не можуть, тобто має місце ліміт

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{X > 1\}}{P(X = 1)} = 0.$$

Як показує досвід, для трубопровідних мереж одночасне виникнення двох, а тим більше декількох аварійних ситуацій або відмов мало ймовірне. Можна вважати, що потоки відмов у реальній трубопровідній мережі мають властивість ординарності. Те саме можна сказати про потік відновлення: час проведення відбудовних робіт набагато більше часу, необхідного на введення в експлуатацію відновленої ділянки. Крім того, введення декількох від-

новлених ділянок відпрацьовується послідовно. Наявність властивості ординарності в потоках відмови і відновлення відзначається в роботі Абрамова [2]. Дослідження діючих трубопровідних мереж показують, що ймовірність двох і більше відмов одночасно практично дорівнює нулю. У деяких випадках ефективність функціонування трубопровідної мережі перевіряється при виключенні тільки однієї ділянки [1]. Таким чином, потоки відмов і відновлення мережі можна вважати ординарними.

Для потоку подій без післядії характерна відсутність залежності ймовірності влучення певного числа подій на часову ділянку довжиною  $T$  від числа подій, що потрапляють на будь-яку іншу ділянку, що не перетинається з першою. Дана властивість означає, що одна подія не тягне за собою іншу подію, тобто відмова одного з трубопроводів не може спричинити за собою відмови інших ділянок, а відновлення однієї ділянки ніяк не впливає на відновлення іншої. У реальних трубопровідних мережах не виключено, що аварійна ситуація на одній ділянці трубопровідної мережі може спричинити за собою аварії на інших ділянках мережі. Такі випадки дійсно спостерігаються, однак за наявними відомостями [2, 14, 19] подібні ситуації спостерігаються досить рідко і в монографії вони не розглядаються. Тому можна стверджувати, що потік відмов має властивість відсутності післядії.

Таким чином, потоки відмов і відновлення у трубопровідних мережах мають всі три властивості, які характерні для найпростіших потоків подій. Дана обставина дозволяє потоки відмов і відновлення вважати пуассонівськими і, отже, використовувати для їх дослідження математичний апарат марківських процесів.

#### **2.4. Трубопровідна транспортна система як система масового обслуговування**

Для одержання математичної моделі функціонування трубопровідної мережі та графічної інтерпретації станів мережі скористаємося її поданням у вигляді розміченого графа, як показано на рис. 2.2. Для ТТС з пуассонівськими потоками відмови і відновлення розмічений граф трансформується в марківський ланцюг у вигляді «схеми загибелі й розмноження», як це прийнято в теорії систем масового обслуговування. Таким чином, ТТС з її відмова-

ми і ремонтами трубопроводів розглядається як система масового обслуговування (СМО).

Ланцюг Маркова являє собою розмічений граф станів, тобто орієнтований граф у вигляді ланцюжка прямокутних блоків (вершин), з'єднаних спрямованими дугами.

Вершина графа інтерпретується як один з можливих станів системи. Стан системи масового обслуговування будемо пов'язувати з імовірністю числа вимог на ремонт трубопроводів, що входять до системи:

– ймовірність стану  $P_0$  – у системі немає жодної вимоги, всі трубопроводи функціонують;

– ймовірність стану  $P_1$  – у системі знаходиться одна вимога, один трубопровід відключений від системи;

– ймовірність стану  $P_2$  – у системі знаходяться дві вимоги, два трубопроводи відключені від системи;

. . .

– ймовірність стану  $P_m$  – у системі знаходиться  $m$  вимог, усі трубопроводи непрацездатні й відключені від системи.

Ланцюжковий вигляд графа обумовлений ординарністю потоків вимог. Число вимог у кожний момент часу може збільшуватися або зменшуватися тільки на одиницю.

Дуги графа інтерпретуються як процеси переходу з одного стану в інший. Переходи, викликані відмовою ділянок, називають прямими, а переходи, викликані відновленням ділянок – зворотними.

Прямі переходи будемо пов'язувати з інтенсивністю появи вимог на ремонт трубопроводу в системі, зворотні – з інтенсивністю задоволення вимог. Будемо вважати, що потік вхідних вимог і потік задоволених вимог є найпростішими потоками подій, оскільки їх потоки відмов і відновлення є пуассонівськими. При цьому має місце спадковість інтенсивності, тобто інтенсивності потоків надходження вимог і їх задоволення відповідно рівні  $\lambda$  і  $\mu$ .

Інтенсивність надходження вимог  $\lambda$  чисельно дорівнює величині, зворотній середній тривалості роботи окремої ділянки мережі до настання відмови (середній час наробітку на відмову).

Інтенсивність задоволення вимог  $\mu$  чисельно дорівнює величині, зворотній тривалості ремонту, тобто періоду часу від моменту вилучення ділянки мережі із числа функціонуючих до моменту його введення в експлуатацію після ремонту.

Залежно від числа ремонтних бригад будемо розрізняти одноканальну СМО і багатоканальну СМО. Під каналом будемо розуміти ремонтну бригаду з усіма машинами, механізмами і матеріалами, здатну в автономному режимі усувати пошкодження на трубопроводі. При цьому кожний канал у будь-який момент часу може обслуговувати тільки одну вимогу.

Оскільки джерело вимог на ремонт трубопроводів знаходиться усередині системи і є результатом її функціонування, то відповідна СМО є замкнутою системою з максимальним числом вимог  $m$ , рівним числу трубопроводів.

Марківський ланцюг для трубопровідної мережі, що містить  $m$  ділянок (трубопроводів), містить  $(m + 1)$  вершину.

На рис. 2.3 і 2.4 показані марківські ланцюги для одноканальної і багатоканальної СМО відповідно. Ланцюги дозволяють побудувати математичні моделі розрахунку ймовірності знаходження системи в тому або іншому стані.

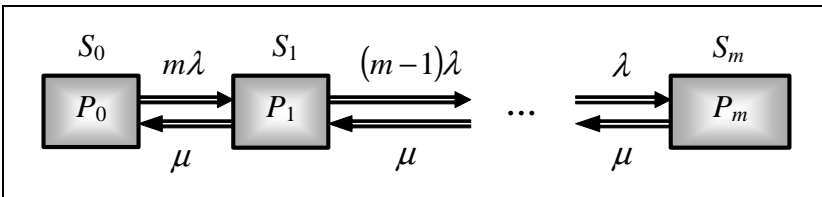


Рис. 2.3 – Замкнута одноканальна система масового обслуговування з обмеженим потоком вимог

Коли в одноканальну СМО (рис. 2.3) поступає вимога на обслуговування, то число працюючих трубопроводів зменшується на одиницю. Відповідно зменшується інтенсивність надходження нової вимоги.

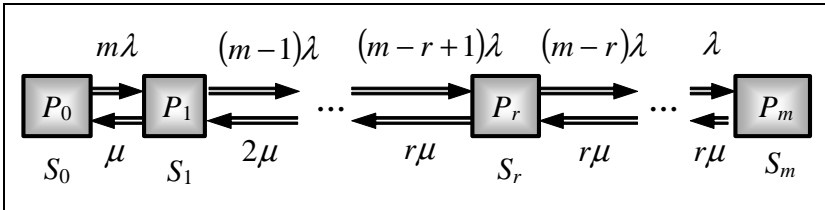


Рис. 2.4 – Замкнута багатоканальна система масового обслуговування з обмеженим потоком вимог

Багатоканальна СМО (рис. 2.4) з числом каналів  $r$  може одночасно обслуговувати від 0 до  $r$  вимог. На відміну від одноканальної у  $r$ -канальній системі черга на обслуговування утворюється тільки тоді, коли система знаходиться у стані  $P_r$  (всі канали зайняті), при цьому нова вимога поступає в систему раніше, ніж звільниться який-небудь із зайнятих каналів.

Коли всі канали зайняті (стан  $P_r$ ) або черга не порожня (стан  $P_i$ ,  $r < i \leq m$ ), інтенсивність обслуговування є величиною постійною і рівною  $r\mu$ .

Як приклад наведемо побудову марківського ланцюжка для ТТС, розподільна мережа якої має чотири трубопроводи кожний довжиною 1 км і середніми інтенсивностями відмови і відновлення  $\lambda$  і  $\mu$ , а підсистема допоміжного виробництва має дві ремонтні бригади (рис. 2.5).



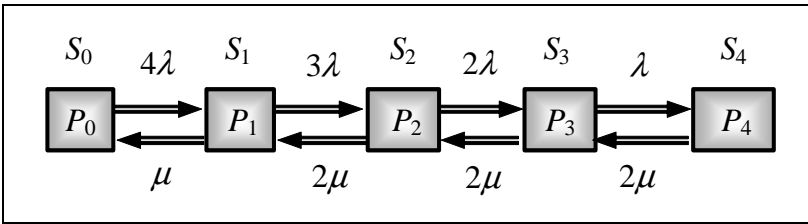


Рис. 2.5 – Марківський ланцюг для двоканальної СМО з чотирма об'єктами, що обслуговуються

Система може знаходитися в п'ятьох станах:

- $S_0$  – усі трубопроводи справні з ймовірністю  $P_0$ ;
- $S_1$  – один трубопровід несправний з ймовірністю  $P_1$ ;
- $S_2$  – два трубопроводи несправні з ймовірністю  $P_2$ ;
- $S_3$  – три трубопроводи несправні з ймовірністю  $P_3$ ;
- $S_4$  – усі трубопроводи несправні з ймовірністю  $P_4$ .

Побудований в такий спосіб марківський ланцюг дозволяє сформувати математичну модель функціонування мережі, яка може бути подана системою рівнянь Колмогорова:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0}{dt} = -4\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) - (\lambda_1 + \lambda_2) P_0(t), \\ \frac{dP_1}{dt} = 4\lambda P_0(t) - (\mu + 3\lambda) P_1(t) + 2\mu P_2(t), \\ \frac{dP_2}{dt} = 3\lambda P_1(t) - (2\mu + 2\lambda) P_2(t) + 2\mu P_3(t), \\ \frac{dP_3}{dt} = 2\lambda P_2(t) - (2\mu + \lambda) P_3(t) + 2\mu P_4(t), \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda P_3(t) - 2\mu P_4(t), \end{array} \right. \quad (2.3)$$

де  $P_i$  – ймовірність знаходження СМО в  $i$ -му стані,  $i = \overline{0,4}$ .

Рівняння Колмогорова є диференціальними рівняннями для СМО з однорідними елементами, в яких невідомими функціями є ймовірності станів. Вирішуючи систему (2.3) щодо цих невідомих, ми одержимо тільки оцінку шуканих функцій, оскільки в загальному випадку трубопровідна мережа складається з неоднорідних трубопроводів різної довжини, діаметра, товщини стінок і матеріалу виготовлення. У зв'язку з цим інтенсивності і відмов, і відновлення для різних трубопроводів будуть різні. Щоб якимось способом наблизити СМО до однорідної системи, вдаються до примусового усереднення інтенсивності. У нашому випадку усереднення було задано умовою задачі.

При допущенні про стаціонарність режимів роботи ТТС (імовірності станів не залежать від часу) система рівнянь Колмогорова (2.3) приймає вигляд системи алгебраїчних рівнянь, у яких невідомими вже є так звані фінальні ймовірності станів:

$$\begin{cases} -4\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ 4\lambda P_0 - (\mu + 3\lambda)P_1 + 2\mu P_2 = 0, \\ 3\lambda P_1 - (2\mu + 2\lambda)P_2 + 2\mu P_3 = 0, \\ 2\lambda P_2 - (2\mu + \lambda)P_3 + 2\mu P_4 = 0, \\ \lambda P_3 - 2\mu P_4 = 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

Розв'язання отриманої системи дозволяє визначити невідомі ймовірності станів  $P_i$ , що інтерпретуються як час (у процентному відношенні), протягом якого система цілком справна ( $P_0$ ); має один ( $P_1$ ); два ( $P_2$ ); три ( $P_3$ ) або чотири пошкоджені ділянки ( $P_4$ ).

Для більшості ТТС допущення про стаціонарність режимів роботи систем цілком правомірне. Тому для одержання математичних моделей систем доцільно використовувати систему рівнянь Колмогорова у вигляді (2.4).

Розв'язання системи рівнянь Колмогорова у формі (2.4) у випадку, коли СМО має один канал обслуговування (одна ремонтна

бригада) і  $m$  ділянок (трубопроводів), дає наступні розрахункові формули для шуканих імовірностей станів:

– ймовірність перебування в системі однієї вимоги

$$P_1 = m\rho P_0, \quad (2.5)$$

де  $P_0$  – ймовірність відсутності вимог у системі;  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$  – коефіцієнт завантаження;

– ймовірність одночасного перебування в системі двох вимог

$$D_2 = (m-1)\rho D_1 = m(m-1)\rho^2 D_0; \quad (2.6)$$

– ймовірність одночасного перебування в системі трьох вимог

$$D_3 = (m-2)\rho D_2 = m(m-1)(m-2)\rho^3 D_0; \quad (2.7)$$

...

– ймовірність одночасного перебування в системі  $i$  вимог

$$\begin{aligned} D_i &= (m-(i-1))\rho D_{i-1} = m(m-1)(m-2)\cdots(m-(i-1))\rho^i D_0 = \\ &= \rho^i D_0 \prod_{j=0}^{i-1} (m-j); \end{aligned} \quad (2.8)$$

...

– ймовірність одночасного перебування в системі  $m$  вимог

$$P_m = \frac{\rho}{r} P_{m-1} = \frac{m!}{r^{m-r} \cdot r!} \rho^m P_0. \quad (2.9)$$

– ймовірність відсутності вимог у системі  $P_0$  (із співвідношень (2.5) – (2.9) з урахуванням рівності  $\sum_{i=0}^m P_i = 1$ )

$$D_0 = \left( 1 + m\rho + \sum_{i=2}^m \rho^i \prod_{j=0}^{i-1} (m-j) \right)^{-1}. \quad (2.10)$$

У загальному випадку, коли СМО має  $r$  каналів і  $m$  ділянок (трубопроводів) вирішення системи рівнянь Колмогорова у формі (2.4) дає наступні розрахункові формули для шуканих імовірностей станів:

– ймовірність перебування в системі однієї вимоги

$$P_1 = m\rho P_0; \quad (2.11)$$

– ймовірність одночасного перебування в системі двох вимог

$$D_2 = (m-1) \frac{\rho}{2} D_1 = m(m-1) \frac{\rho^2}{2!} D_0; \quad (2.12)$$

– ймовірність одночасного перебування в системі трьох вимог

$$D_3 = (m-2) \frac{\rho}{3} D_2 = m(m-1)(m-2) \frac{\rho^3}{3!} D_0; \quad (2.13)$$

...

– ймовірність одночасного перебування в системі  $i$  вимог

$$D_i = (m - (i - 1)) \frac{\rho}{i} D_{i-1} = m(m-1)(m-2) \dots (m - (i - 1)) \frac{\rho^i}{i!} D_0 = \\ = \frac{\rho^i}{i!} D_0 \prod_{j=0}^{i-1} (m - j), \quad 1 \leq i \leq r; \quad (2.14)$$

...

– ймовірність одночасного перебування в системі  $r$  вимог

$$\begin{aligned}
 P_r &= (m - (r - 1)) \frac{\rho}{r} P_{r-1} = m(m-1)(m-2) \cdots (m - (r - 1)) \frac{\rho^r}{r!} P_0 = \\
 &= \frac{\rho^r}{r!} P_0 \prod_{j=0}^{r-1} (m - j), \quad 1 \leq r \leq m; \quad (2.15)
 \end{aligned}$$

– ймовірність одночасного перебування в системі  $(r+1)$ -ї вимоги

$$\begin{aligned}
 P_r &= (m - r) \frac{\rho}{r} P_r = m(m-1)(m-2) \cdots (m - r) \frac{\rho^r}{r \cdot r!} P_0 = \\
 &= \frac{\rho^r}{r \cdot r!} P_0 \prod_{j=0}^r (m - j); \quad (2.16)
 \end{aligned}$$

...

– ймовірність одночасного перебування в системі  $i$  вимог

$$\begin{aligned}
 P_i &= (m - (i - 1)) \frac{\rho}{r} P_{i-1} = m(m-1)(m-2) \cdots (m - (i - 1)) \frac{\rho^i}{r^{i-r} r!} P_0 = \\
 &= \frac{\rho^i}{r^{i-r} r!} P_0 \prod_{j=0}^{i-1} (m - j), \quad (r + 1) \leq i \leq m; \quad (2.17)
 \end{aligned}$$

...

– ймовірність одночасного перебування в системі  $m$  вимог

$$P_m = \frac{\rho}{r} P_{m-1} = \frac{m!}{r^{m-r} \cdot r!} \rho^m P_0; \quad (2.18)$$

– ймовірність відсутності вимог у системі  $P_0$  (із співвідношень (2.11) – (2.18) з урахуванням рівності  $\sum_{i=0}^m P_i = 1$ )

$$P_0 = \left( 1 + \sum_{i=1}^m \frac{\rho^i}{i!} \prod_{j=0}^{i-1} (m - j) + \sum_{i=r+1}^m \frac{\rho^i}{r^{i-r} r!} \prod_{j=0}^{i-1} (m - j) \right)^{-1}. \quad (2.19)$$

З порівнянь формул (2.5) – (2.10) для замкнутої одноканальної СМО і формул (2.11) – (2.19) для замкнутої багатоканальної СМО видно, що тільки ймовірність присутності однієї вимоги в системі  $P_1$  розраховується за ідентичними формулами: (2.5) і (2.11) відповідно. Ймовірності присутності двох і більше вимог у системі або їх відсутність взагалі розраховуються за принципово відмінними формулами.

Зазначимо, що співвідношення (2.5) – (2.19) справедливі тільки для однорідних стаціонарних СМО. При цьому складність розрахунків і похибки, які пов'язані з усередненням параметрів СМО, роблять ці співвідношення неефективними при оперативній оцінці надійності реальних транспортних мереж навіть невеликої розмірності.

Для неоднорідних СМО знаходження шуканих ймовірностей станів системи пов'язано з формуванням системи рівнянь Колмогорова на основі розміченого сильно зв'язаного графа, що містить  $(m+1)$  вершину. Система Колмогорова в цьому разі складається з  $2^m$  рівнянь. Навіть порівняно нескладна трубопровідна мережа вимагає вирішення досить громіздкої системи рівнянь. Так, для мережі з 20 ділянок система рівнянь налічує з  $2^{20} \approx 10^6$  рівнянь. Розв'язання такої системи вимагає великих обсягів пам'яті і великих часових витрат. У реальній розподільній трубопровідній мережі число ділянок визначається величиною на порядок більше, ніж 20, а відповідна система Колмогорова має більше ніж  $10^{60}$  рівнянь. Астрономічні розміри системи не дозволяють використовувати її для оперативної оцінки надійності неоднорідних трубопровідних транспортних мереж високої розмірності.

## **2.5. Усереднення показників знаходження трубопровідної транспортної мережі у справному й несправному станах**

Аналіз виразів (2.5) – (2.19) показує, що всі ймовірності станів ТТС залежать від числа ділянок  $m$ , числа ремонтних бригад  $r$ , інтенсивності відмов  $\lambda$  і інтенсивності відновлення  $\mu$ .

Число ремонтних бригад  $r$ , що обслуговують водогінну мережу, залежить від довжини мережі. У середньому розмір  $r$  визначається з розрахунку: одна бригада на 50 км мережі.

Інтенсивність відновлення  $\mu$  характеризує здатність ремонтної бригади здійснювати ремонтні роботи. При однаковому кадровому складі й технічному забезпеченні ремонтних бригад величину  $\mu$  можна вважати константою, тобто величиною, що залежить не від будь-яких параметрів мережі.

Інтенсивність відновлення  $\mu$  і число ремонтних бригад у більшій мірі характеризують ремонтні служби, ніж саму розподільну трубопровідну мережу. Тому при розгляді питань надійності трубопровідних мереж увагу в першу чергу привертають параметри  $m$  і  $\lambda$ .

Розглянемо однорідну трубопровідну мережу із сумарною довжиною трубопроводів 50 км. Мережа обслуговується однією ремонтною бригадою з інтенсивністю відновлення пошкоджених трубопроводів  $\mu = 182,5 \text{ рік}^{-1}$ , тобто ремонт одного пошкодження триває дві доби. Усі трубопроводи мають однакову довжину ( $l$  км) і однаковий діаметр, виготовлені з одного матеріалу й експлуатуються в однакових умовах. При заданій довжині мережі число трубопроводів складе  $m = \frac{50}{l}$ . Нехай  $\lambda_0$  – параметр потоку

відмов на ділянці трубопроводу довжиною 1 км протягом року (питома інтенсивність відмов). Для реально діючих трубопроводів він коливається від  $0,2 \text{ (км/рік)}^{-1}$  (для знову введених в експлуатацію) до  $0,93 \text{ (км/рік)}^{-1}$  (для сильно зношених).

У табл. 2.1 подано результати розрахунку ймовірності  $P_0$  (відсутності вимог у системі) і ймовірностей  $P_1$ ,  $P_2$  і  $P_3$  станів системи відповідно з 1-ю, 2-ма і 3-ма вимогами залежно від середньої довжини трубопроводів  $l$  (1 км, 1,5 км, 2 км, 3 км, 4 км і 5 км) при  $\lambda_0 = 0,93 \text{ (км/рік)}^{-1}$ . Розрахункові формули ймовірностей з урахуванням одноканалності СМО відповідно до формул (2.5) – (2.7) і (2.10)) мають наступний вигляд:

$$D_1 = m\rho D_0,$$

$$D_2 = (m - 1)\rho D_1,$$

$$D_3 = (m - 2)\rho D_2,$$

$$D_0 = \left( 1 + m\rho + \sum_{i=2}^m \rho^i \prod_{j=0}^{i-1} (m - j) \right)^{-1}.$$

Таблиця 2.1 – Розрахункові ймовірності станів

$l$ (км)	$m$	$\lambda = \lambda_0 l$ (км/рік) <sup>-1</sup>	$\mu$ (рік) <sup>-1</sup>	$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
1	50	0,93	182,5	0,0051	0,7516	0,1879	0,0442	0,0054
1,5	33	1,395	182,5	0,0076	0,7516	0,1885	0,0458	0,0054
2	25	1,86	182,5	0,0102	0,7516	0,1917	0,0470	0,0054
3	17	2,79	182,5	0,0153	0,7516	0,1956	0,0508	0,0057
4	12	3,72	182,5	0,0204	0,7516	0,1840	0,0412	0,0042
5	10	4,65	182,5	0,0255	0,7516	0,1917	0,0446	0,0045

Аналіз даних табл. 2.1 дозволяє зробити три важливих висновки:

– по-перше, розрахункові ймовірності станів  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  і  $P_3$  не залежать від числа трубопроводів  $m$  у мережі;

– по-друге, суттєвими станами системи є стани  $S_0$  (усі трубопроводи справні) і  $S_1$  (пошкоджений один трубопровід), оскільки ймовірності  $P_2$  і  $P_3$ , станів  $S_2$  (пошкоджено два трубопроводи) і  $S_3$  (пошкоджені три трубопроводи), а тим більше ймовірності станів з великими індексами, настільки малі, що можна вважати стани  $S_i$  при  $i > 1$  неможливими;

– по-третє, число аварій на одному трубопроводі протягом року визначається за виразом

$$\lambda = \lambda_0 l, \quad (2.20)$$



тобто воно пропорційно параметру потоку відмов  $\lambda_0$  і довжині трубопроводу  $l$ .

Обидві величини  $\lambda_0$  і  $l$  у (2.20) дуже важливі.

Число відмов в одиницю часу трубопроводу одиничної довжини (параметр потоку відмови)  $\lambda_0$  залежить від діаметра труби і матеріалу її виготовлення. Труби великих діаметрів мають і параметри  $\lambda_0$  з великими значеннями. Труби, виготовлені з більш міцних матеріалів, мають параметри  $\lambda_0$  з меншими значеннями. Чим менше параметр  $\lambda_0$ , тим надійніший трубопровід.

Довжина  $l$  – це другий параметр трубопроводу, від якого залежить його надійність. Чим більше довжина трубопроводу, тим менше надійність.

Побудова таблиці, аналогічної табл. 2.1, для довільної розподільної трубопровідної мережі вимагає знання усередненого параметра  $\lambda_{0\bar{n}\delta}$  й усередненої довжини трубопроводу  $l_{cp}$ .

Усереднена інтенсивність відмов для проєктованих ТТС визначається за формулою

$$\lambda_{0\bar{n}\delta} = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_{0j\bar{n}\delta} \sum_{i=1}^{n_j} l_{ji}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n l_{ji}}, \quad (2.21)$$

де  $m$  – число типів трубопроводів, що відрізняються діаметром труб або матеріалом виготовлення;  $n_j$  – число трубопроводів  $j$ -го типу;  $\lambda_{0j\bar{n}\delta}$  – питома інтенсивність відмов для трубопроводів певного діаметра і матеріалу виготовлення;  $l_{ji}$  – довжина  $i$ -го трубопроводу  $j$ -го типу.

Усереднена довжина трубопроводу визначається як середнє арифметичне довжин усіх трубопроводів:

$$l_{\bar{n}\delta} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m l_j, \quad (2.22)$$

де  $m$  – загальне число трубопроводів у мережі;  $l_j$  – довжина  $j$ -го трубопроводу, км.

З урахуванням формул (2.21) і (2.22) усереднена інтенсивність відмови трубопроводу з усередненою довжиною відповідно до формули (2.20) складе

$$\lambda_{\bar{n}\delta} = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_{0j\bar{n}\delta} \sum_{i=1}^{n_j} l_{ji}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n l_{ji}} \cdot \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m l_j. \quad (2.23)$$

Для експлуатованих ТТС із досить великим накопиченим об'ємом статистичних відомостей про відмови трубопроводів усереднену інтенсивність відмов слід розраховувати за формулою

$$\lambda_{\bar{n}\delta} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \lambda_j, \quad (2.24)$$

де  $m$  – загальне число трубопроводів;  $\lambda_j$  – інтенсивність відмови  $j$ -го трубопроводу.

Побудова таблиці розрахункових ймовірностей станів для довільної розподільної трубопровідної мережі, крім знання числа трубопроводів  $m$  і питомої інтенсивності відмов  $\lambda_{0\bar{n}\delta}$  або серед-

ньої інтенсивності відмов  $\lambda_{\text{н\delta}}$ , вимагає ще знання числа каналів обслуговування СМО (число ремонтних бригад)  $r$  і середньої інтенсивності відновлення трубопроводів  $\mu_{\text{н\delta}}$ .

Кількість ремонтних бригад, або каналів обслуговування СМО, для проєктованих ТТС визначається за формулами

$$r_1 = \left\lceil \frac{1}{50} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n l_{ji} \right\rceil \quad \lambda_{\text{н\delta}} \quad r_2 = r_1 + 1 . \quad (2.25)$$

Тут  $\lceil \cdot \rceil$  – оператор взяття цілої частини числа.

Для більш ретельного дослідження проєктованої ТТС рекомендується аналізувати два можливих варіанти систем: при числі ремонтних каналів, рівному відповідно  $r_1$  і  $r_2$ .

Для експлуатованих ТТС число каналів  $r$  беруть рівним числу ремонтних бригад в аварійно-ремонтній службі.

Як середня інтенсивність відновлення для проєктування довільної розподільної трубопроводної мережі  $\mu_{\text{н\delta}}$ , як і в розглянутому прикладі, виступає величина  $182,5 \text{ рік}^{-1}$ , яку беруть з розрахунку проведення одного ремонту протягом двох діб.

Для експлуатованих ТТС середня інтенсивність відновлення визначається за накопиченими статистичними даними як середнє арифметичне інтенсивностей відновлення трубопроводів для всіх ремонтних бригад:

$$\mu_{\text{н\delta}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mu_i , \quad (2.26)$$

де  $k$  – кількість ремонтних бригад;  $\mu_i$  – інтенсивність відновлення трубопроводів для  $i$ -ї ремонтної бригади.

У формулах (2.5) – (2.19) для визначення ймовірностей станів замість інтенсивностей відмов і відновлення фігурує їх відношен-

Трубопровідні транспортні системи

ня у вигляді коефіцієнта завантаження  $\rho$ . Щоб скористатися цими формулами для довільної трубопровідної мережі, необхідно коефіцієнт  $\rho$  замінити усередненим аналогом  $\rho_{\bar{n}\delta}$ .

Усереднений коефіцієнт завантаження для проєктованих мереж визначається виразом

$$\rho_{\bar{n}\delta} = \frac{\lambda_{\bar{n}\delta}}{282,5} \cdot k_{\mu} . \quad (2.27)$$

Тут  $\lambda_{\bar{n}\delta}$  розраховують за формулою (2.23),  $k_{\mu}$  – коефіцієнт розмірності, рівний величині 1 рік.

Усереднений коефіцієнт завантаження для експлуатованих мереж визначається за виразом

$$\rho_{\bar{n}\delta} = \frac{\lambda_{\bar{n}\delta}}{\mu_{\bar{n}\delta}} . \quad (2.28)$$

Тут  $\lambda_{\bar{n}\delta}$  розраховують за формулою (2.24), а  $\mu_{\bar{n}\delta}$  – за формулою (2.26).

Заміняючи у формулі (2.19) коефіцієнт завантаження  $\rho$  на його усереднене значення, що визначається для проєктованих мереж за формулою (2.27), а для експлуатованих – за формулою (2.28), одержуємо усереднену ймовірність безвідмовної роботи довільно обраної мережі:

$$D_0 = \left( 1 + \sum_{i=1}^m \frac{\rho_{\bar{n}\delta}^i}{i!} \prod_{j=0}^{i-1} (m-j) + \sum_{i=r+1}^m \frac{\rho_{\bar{n}\delta}^i}{r^{i-r} r!} \prod_{j=0}^{i-1} (m-j) \right)^{-1} . \quad (2.29)$$

Тут параметри  $m$  і  $r$  беруть для експлуатованих мереж на підставі фактичних даних, а для проєктованих – відповідно до проєктних даних і формули (2.25).

Ймовірність, обчислена за формулою (2.29), може служити оцінкою *технічної надійності* розподільної транспортної мережі. Відповідно ймовірність несправного стану мережі (наявність одного, двох або більш пошкоджених трубопроводів), обчислена за формулою  $D_0 = 1 - D_0$ , може служити оцінкою технічної ненадійності системи.

Ймовірність  $P_0$ , будучи помножена на 100%, показує в процентному відношенні, скільки часу в році система знаходиться в абсолютно справному стані. Ймовірність  $D_0$  показує відносний час несправного стану системи.

З формули (2.29) випливає, що технічна надійність не залежить від структури мережі.

З аналізу табл.1.1 виходить, що при однаковій сумарній довжині трубопроводів їх кількість практично не впливає на технічну надійність всієї системи.

З виразу (2.20) випливає, що технічна ненадійність пропорційна сумарній довжині трубопроводів мережі. Чим більше сумарна довжина трубопроводів, тим менше експлуатаційна надійність мережі.

Знаючи величини  $D_0$  і довжину  $j$ -го трубопроводу  $l_j$ , можна оцінити відносний час несправного стану і технічну надійність цього трубопроводу відповідно за формулами

$$\tilde{Q}_j = \frac{P_0 l_j}{L}; \quad (2.30)$$

$$\tilde{P}_j = 1 - \tilde{Q}_j = 1 - \frac{P_0 l_j}{L}. \quad (2.31)$$

Тут  $L$  – сумарна довжина всіх трубопроводів мережі.

Оскільки функціональну надійність знаходять залежно від структури мережі, зроблені висновки стосуються тільки технічної надійності протяжних трубопроводів.

## РОЗДІЛ 3

### **ФУНКЦІОНАЛЬНА НАДІЙНІСТЬ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ**

У попередньому розділі була дана загальна характеристика проблеми надійності для ТТС. Було відзначено, що функціональна надійність, під якою розуміється здатність ТТС безперебійно поставляти цільовий продукт споживачам, при виконанні умов (1.3) не залежить від параметрів поточкорозподілу і показників якості цільового продукту. Було показано, що функціональна надійність залежить від технічної надійності конструктивних елементів системи, топографічних і топологічних властивостей системи, таких як ступінь старіння і зносу всіх конструктивних елементів ТТС, довжина, діаметр, товщина, матеріал труб і структура трубопроводної мережі. Для формалізації показника надійності й аналітичного опису методу розрахунку надійності постачання ЦП споживачеві треба мати математичну модель ТТС, яка б однозначно відображала топологію трубопроводної мережі, просторові й часові параметри її елементів: наявність, місце розташування і стан запірної арматури, технічні характеристики трубопроводів, інтенсивність виходу з ладу і відновлення конструктивних елементів ТТС.

#### **3.1. Математична модель трубопроводних транспортних систем**

Насамперед обмежимо розгляд об'єкта дослідження розглядом тільки її найбільш складної частини – розподільної трубопроводної мережі, тобто зведемо розрахунок надійності ТТС до розрахунку надійності постачання цільового продукту споживачам за допомогою тільки трубопроводної мережі, не звертаючи уваги на надійність активних джерел і невизначеність споживання.

Далі для спрощення і конкретизації вербальних описів обмежимо об'єкт дослідження тільки водопровідними ТТС, хоча немає ніяких принципових причин для їх особливого виділення з множини існуючих напірних мережних систем.

Введемо ряд визначень.

**Визначення 1.** Трубопровід – це труба довжиною  $l$  з однако-вим діаметром і однаковою товщиною стінок, виготовлена з одно-рідного матеріалу, має один початок і один кінець (відповідно по-чаток і кінець трубопроводу) і призначена для напірного транспор-тування цільового продукту.

**Визначення 2.** Запірна арматура, або засувка – пристрій вен-тильного типу, що знаходиться на кінці трубопроводу (на початку, наприкінці або на початку і наприкінці труби трубопроводу) і при-значений для припинення або поновлення транспортування ці-льового продукту через трубопровід.

**Визначення 3.** Колодязь – місце розташування кінця трубоп-роводу або стикування двох і більше трубопроводів, що характе-ризується висотою над рівнем моря.

З наведених визначень виходять наступні твердження:

– з *визначень 1 і 2* випливає, що один трубопровід може мати дві (на початку і наприкінці), одну (на початку або наприкінці) або жодної засувки;

– з *визначень 1 і 3* випливає, що кожний трубопровід обмеже-ний двома колодязями (один – на початку, другий – наприкінці трубопроводу);

– з *визначень 2 і 3* випливає, що запірна арматура при її наяв-ності на кінці трубопроводу розташовується в тому ж колодязі, що і кінець трубопроводу.

**Визначення 4.** Система розподільних трубопроводів, або роз-подільна трубопровідна мережа являє собою множину просторово розташованих трубопроводів, з'єднаних у мережу, вузлами якої є колодязі з запірною арматурою.

**Визначення 5.** Система розподільних трубопроводів має вхідні колодязі, в яких стикуються трубопроводи з активними джерела-ми, і вихідні, в яких стикуються трубопроводи зі споживачами.

З визначень 3 – 5 випливає твердження: активні джерела й споживачі стикаються з трубопроводами, але в поняття трубопровідної мережа не входять, тому фігурувати в математичній моделі трубопровідної мережі не можуть.

На підставі визначень 1 – 5 і тверджень, що випливають з них, а також з урахуванням мети наступного використання (розробки методу розрахунку функціональної надійності) визначимо математичну модель розподільної трубопровідної транспортної мережі. Такою однозначною моделлю є орієнтований зважений граф

$$\mathbf{G}[h, z, l, \lambda, \mu, \delta] = (\mathbf{V}, \mathbf{E}; h, z, l, \lambda, \mu, \delta), \quad (3.1)$$

де  $\mathbf{V}$  – множина вершин графа, що відповідають водопровідним колодязям;  $\mathbf{E}$  – множина дуг графа, що відповідають реальним трубопроводам;  $h$  – вагова функція на вершинах графа, що визначає висоту колодязя над рівнем моря;  $z, l, \lambda, \mu, \delta$  – вагові функції на ребрах графа, що відповідно визначають наявність і розташування арматури, довжину, інтенсивність зносу й інтенсивність відновлення трубопроводів, технічну надійність запірної арматури.

Уточнимо всі елементи математичної моделі (3.1).

Нехай множина вершин графа визначається виразом

$$\mathbf{V} = \{v_i\}_{i=1}^n. \quad (3.2)$$

Тоді множина дуг визначиться виразом

$$\mathbf{E} = \{e_{ij} = (v_i v_j) \mid i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j\}. \quad (3.3)$$

Позначимо множину дуг, що виходять з вершини  $v_k$ , як

$$\mathbf{E}_k^- \subseteq \{e_{kj} \mid e_{kj} \in \mathbf{E}\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3.4)$$

а множину дуг, що входять у вершину  $v_k$ , як



$$\mathbf{E}_k^+ \subseteq \{e_{ik} \mid e_{ik} \in \mathbf{E}\}, \quad k = \overline{1, n}. \quad (3.5)$$

Тоді підмножина  $\mathbf{E}_k = \mathbf{E}_k^- \cup \mathbf{E}_k^+$  являє собою підмножину дуг, що є інцидентними до  $k$ -ї вершини, а їх об'єднання  $\bigcup_{k=1}^n \mathbf{E}_k = \mathbf{E}$  визначає множину усіх дуг графа мережі.

Напрямок дуг у графі (3.1) збігається з напрямком ЦП у відповідних трубопроводах і визначається або на основі першого проєктного розрахунку поточкорозподілу, або за експериментальними даними, накопиченими у процесі тривалої експлуатації мережі, або за допомогою вагової функції  $h$ :

- дуга  $\overset{\circ}{a}_{ij}$  орієнтована від вершини  $v_j$  до  $v_i$ , якщо  $h_{v_i} \geq h_{v_j}$ ;
- дуга  $\overset{\circ}{a}_{ij}$  орієнтована від вершини  $v_j$  до  $v_i$ , якщо  $h_{v_i} < h_{v_j}$ .

Визначення напрямків дуг краще робити за допомогою вагової функції  $h$ , оскільки в цьому разі вони будуть збігатися з напрямком руху ЦП самотечею.

У будь-якому випадку вважаємо, що напрямки потоків відомі, тобто їх визначення не є завданням цих досліджень.

Для математичного опису множини всіх засувок і їх розташування на трубопроводі вводиться вагова функція  $z$  на множині  $\mathbf{E}$ , що відображає його на множині  $\{0, 1, 2, 3\}$  за правилом  $z(e_{ij}) = z_{ij}$ , причому

$$z_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \overset{\circ}{a}_{ij} \text{ орієнтована від } v_j \text{ до } v_i, \text{ якщо } h_{v_i} \geq h_{v_j}; \\ 1, & \text{якщо } \overset{\circ}{a}_{ij} \text{ орієнтована від } v_j \text{ до } v_i, \text{ якщо } h_{v_i} < h_{v_j}; \\ 2, & \text{якщо } \overset{\circ}{a}_{ij} \text{ орієнтована від } v_i \text{ до } v_j, \text{ якщо } h_{v_i} \geq h_{v_j}; \\ 3, & \text{якщо } \overset{\circ}{a}_{ij} \text{ орієнтована від } v_i \text{ до } v_j, \text{ якщо } h_{v_i} < h_{v_j}. \end{cases} \quad (3.6)$$

Для визначення параметрів трубопроводів, що впливають на результати розрахунку надійності постачання ЦП конкретним користувачам, введені чотири вагові функції:

– функція відстані  $l$ , що відносить кожній дузі графа  $\hat{a} \in \hat{\mathbf{A}}$  дійсне число  $l(e) > 0$  в якості параметра довжини відповідного трубопроводу;

– функція інтенсивності відмов  $\lambda$ , що відносить кожній дузі графа  $\hat{a} \in \hat{\mathbf{A}}$  дійсне число  $\lambda(e) > 0$  в якості параметра інтенсивності відмов відповідного трубопроводу;

– функція відновлення  $\mu$ , що відносить кожній дузі графа  $\hat{a} \in \hat{\mathbf{A}}$  дійсне число  $\mu(e) > 0$  в якості параметра інтенсивності відновлення відповідного трубопроводу після його виходу з ладу;

– вагова вектор-функція технічної надійності запірної арматури  $\mathbf{p}$ , що відносить до кожної дуги графа  $\hat{a} \in \hat{\mathbf{A}}$  двокомпонентний вектор-рядок  $\delta_{ij}^{\circ} = \left[ \delta^{-} \quad \delta^{+} \right]$ , компонентами якого є ймовірності безвідмовної роботи запірної арматури, розташованої на початку і в кінці відповідного трубопроводу, причому

$$\delta_{ij}^{\circ} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} & \text{їдє } z(e_{ij}) = 0; \\ \begin{bmatrix} \delta^{-}(\hat{a}) & 1 \end{bmatrix} & \text{їдє } z(e_{ij}) = 1; \\ \begin{bmatrix} 1 & \delta^{+}(\hat{a}) \end{bmatrix} & \text{їдє } z(e_{ij}) = 2; \\ \begin{bmatrix} \delta^{-}(\hat{a}) & \delta^{+}(\hat{a}) \end{bmatrix} & \text{їдє } z(e_{ij}) = 3. \end{cases} \quad (3.7)$$

У виразі (2.7) величини  $\delta^{-}(\hat{a})$  і  $\delta^{+}(\hat{a})$ , будучи ймовірностями, являють собою дійсні числа з діапазону  $[0, 1]$  і визначають ступінь зносу і стан запірної арматури, що знаходиться відповідно на початку або наприкінці трубопроводу. При відсутності запірної арматури на будь-якій ділянці трубопроводу ці величини дорівнюють одиниці.

Вирази (3.1) – (3.7) являють собою математичну модель водогінної мережі для вирішення завдання розрахунку функціональної надійності.

Введені вагові функції  $h, l, \lambda, \mu, \delta$  визначають основну відмінність математичної моделі (3.1) – (3.7) для водопровідних розподільних мереж від математичної моделі, запропонованої в [43] для вирішення завдання локалізації аварійно-ремонтної зони в інженерних мережах.

### 3.2. Надійність аварійно-ремонтних зон розподільної трубопроводної мережі

У розрахунку функціональної надійності ТТС фігурують поняття «аварійно-ремонтна зона» і «несуттєва запірна арматура». Для однозначного тлумачення цих понять введемо два визначення.

**Визначення 6.** Аварійно-ремонтною зоною (АРЗ) трубопроводу  $e_{ij}$  будемо називати ту частину трубопроводної мережі з мінімально можливим числом споживачів (вершин графа), що відсікається запірною апаратурою у стані «закрито» від усїєї мережі з метою припинення доступу цільового продукту в трубопровід  $e_{ij}$  у випадку проведення аварійних або профілактичних робіт.

**Визначення 7.** Несуттєвою називають запірну арматуру на трубопроводі, що належить конкретній АРЗ, стан якої («закритий» або «відкрито») не впливає на доступ цільового продукту як у самий трубопровід, так і в конкретну АРЗ.

Приклади аварійно-ремонтних зон і несуттєвих засувок показано на рис. 3.1. Тут трубопроводи  $t_1, t_2$  і  $t_3$  утворюють аварійно-ремонтну зону АРЗ<sub>1</sub>, що відсікається засувками  $a_1, a_2, a_3$  і  $a_4$  від іншої частини мережі. Трубопроводи  $t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$  і  $t_9$  утворюють аварійно-ремонтну зону АРЗ<sub>2</sub>, що відсікається засувками  $a_2, a_3$ , і  $a_5$  від іншої частини мережі. Засувки  $\bar{a}_{n1}$  і  $\bar{a}_{n2}$ , що належать зоні АРЗ<sub>2</sub>, є несуттєвими, оскільки їх стани не впливають на доступ цільового продукту в трубопроводи  $t_4, t_5$  і АРЗ<sub>2</sub>.

Незважаючи на те, що несуттєва засувка не має ніякого впливу на доступ цільового продукту в мережу, проте від її положення («закрите» або «відкрито») залежать результати гідравлічного розрахунку. Положення засувки «відкрито» змінює її гідравлічний опір, а положення «закрите» – і структуру мережі.

АРЗ цікава тим, що для всіх споживачів однієї і тієї ж зони ймовірність (відносний час) постачання цільового продукту однакова, тобто функціональна надійність мережі щодо споживачів однієї АРЗ має те саме значення. Пов'язано це з тим, що всі споживачі однієї зони залежать від працездатності кожного трубопроводу цієї зони. Будь-який трубопровід, що вийшов з ладу, змушено припиняє постачання цільового продукту до всіх споживачів зони.

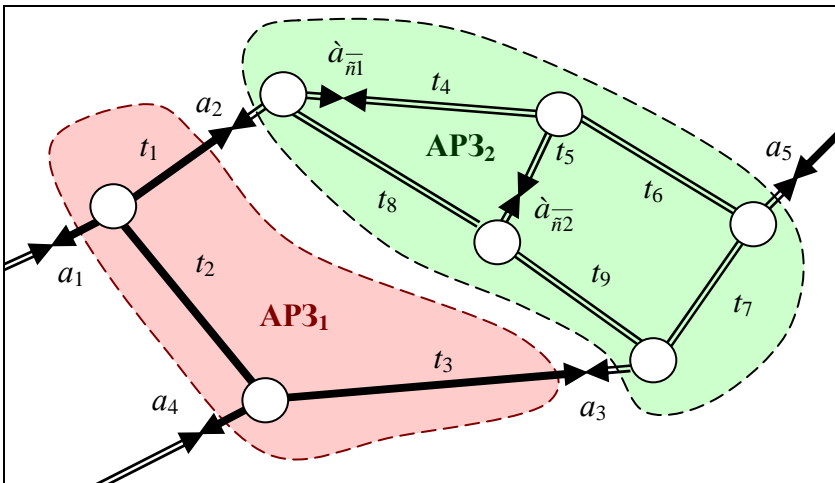


Рис. 3.1 – Фрагмент трубопроводної мережі

Оскільки АРЗ вважається працездатною, якщо всі її елементи працездатні, то їй відповідає послідовна модель надійності технічних систем (рис. 3.2).

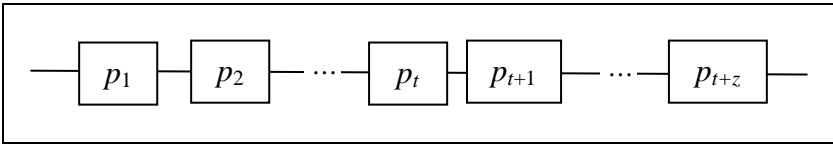


Рис. 3.2 – Послідовна модель надійності технічних систем

Послідовна модель надійності АРЗ включає надійності всіх трубопроводів  $p_1, p_2, \dots, p_t$  і несуттєвих засувок  $p_{t+1}, p_{t+2}, \dots, p_{t+z}$ . Тут  $t$  – загальна кількість трубопроводів в АРЗ,  $z$  – кількість несуттєвих засувок у зоні. Технічна надійність усієї зони  $P_Z$  у цьому разі визначається за формулою

$$P_Z = \left( \prod_{i=1}^t p_i \right) \cdot \left( \prod_{i=t+1}^{t+z} p_i \right) = \prod_{i=1}^{t+z} p_i . \quad (3.8)$$

Топологічна структура АРЗ може мати саму різну конфігурацію, але як би трубопроводи і несуттєві засувки не об'єднувалися в єдину АРЗ, модель надійності (3.8) цієї зони буде залишатися однією і тією самою.

Зі сказаного випливають два дуже важливих висновки:

– **технічна надійність будь-якої АРЗ не залежить від структури цієї АРЗ;**

– **функціональна надійність мережі щодо споживачів одній і тій ж АРЗ також не залежить від її структури.**

Формула (3.8) для розрахунку надійності АРЗ може бути використана, якщо відомі надійності всіх елементів зони. Вона ефективна при проектуванні нових мереж, коли надійність кожного елемента зони може бути визначена за паспортними даними. У діючих мережах за різними причинами надійність елемента в процесі експлуатації може зазнати значних змін і відрізнятись від паспортної. В останньому випадку перевага віддається статистичним або аналітико-статистичним методам розрахунку надійності.

Функціональна надійність

Статистичний розрахунок дає найбільш адекватну оцінку надійності АРЗ. Якщо статистичні дані накопичені за досить тривалий період часу  $T$ , то технічна надійність  $k$ -ї зони ( $k \in \{1, 2, \dots, z\}$ ;  $z$  – загальна кількість зон в експлуатованій мережі) може бути визначена за формулою

$$P_{Zk} = \frac{t_k}{T}, \quad (3.9)$$

де  $t_k$  – сумарний час перебування зони в справному стані протягом періоду часу  $T$ .

Надійність  $k$ -ї зони може бути оцінена за допомогою формули

$$P_{Zk} = 1 - \frac{D_0 l_k}{L}, \quad (3.10)$$

де  $D_0$  – ймовірність знаходження всієї мережі в несправному стані,  $D_0 = 1 - D_0$ ,  $D_0$  – ймовірність знаходження всієї мережі в працездатному стані, розрахована за формулою (2.29);  $l_k$  – сумарна довжина трубопроводів  $k$ -ї зони;  $L$  – сумарна довжина всіх трубопроводів мережі.

Оцінка (3.10) тим точніше, чим вище середня надійність засувки мережі. Оскільки засувки умовно не мають довжини, то при їх низькій надійності й великій різниці у строках експлуатації вирази (3.9) і (3.10) можуть мати значну похибку.

Нарешті, надійність  $k$ -ї зони може бути визначена за формулою (2.29), якщо розглядати аварійно-ремонтну зону як самостійну мережу

$$P_{Zk} = D_{0k}. \quad (3.11)$$

Таким чином, технічну надійність АРЗ можна визначити за однією з формул (3.8) – (3.11). Жодна з наведених формул не пов'язана зі структурою мережі. Саме тому технічна надійність – це вихідний «матеріал» для визначення функціональної надійності.

### 3.3. Функціональна надійність мережі щодо споживачів аварійно-ремонтної зони

Розробка методу розрахунку функціональної надійності мережі базується на двох твердженнях.

**Твердження 1.** *Функціональна надійність трубопровідної мережі щодо споживачів однієї і тієї ж  $k$ -ї зони за своїм значенням менше або дорівнює технічній надійності цієї зони:*

$$P_{Zk}^f \leq P_{Zk} . \quad (3.12)$$

Обґрунтуванням цього твердження є те, що ймовірність (відносний час) споживання цільового продукту в зоні не може бути більше ймовірності справного стану цієї зони.

**Твердження 2.** *Функціональна надійність трубопровідної мережі щодо споживачів однієї і тієї ж  $k$ -ї зони дорівнює добутку технічної надійності  $k$ -ї зони і функціональної надійності мережі відносно цієї ж зони:*

$$P_{Zk}^f = P_{Zk} \cdot D_{Xk}^f . \quad (3.13)$$

Пояснюється це тим, що надходження ЦП від джерела в будь-яку зону відповідає послідовній моделі надійності. Для нормального постачання споживачів  $k$ -ї зони справними повинні бути й сама зона (усі трубопроводи і несуттєві засувки зони), й частина трубопровідної мережі, без якої ЦП від джерела в  $k$ -ю зону не поступає.

Твердження (3.13) при наявності тільки одного джерела ЦП в мережі породжує дві моделі розрахунку функціональної надійності.

Перша модель має місце, коли  $k$ -а зона стикується з джерелом ЦП безпосередньо через одну або декілька засувок. У цьому разі функціональна надійність мережі відносно споживачів  $k$ -ї зони визначається за допомогою виразу

$$P_{Zk}^f = P_{Zk} \cdot \prod_{i=1}^{card W_k} \check{\delta}_{ki}, \quad (3.14)$$

де  $W_k$  – множина всіх суттєвих засувок, що відсікають  $k$ -у зону від усієї мережі;  $\check{\delta}_{ki}$  – технічна надійність  $i$ -ї суттєвої засувки  $k$ -ї зони.

Перша модель функціональної надійності мережі у вигляді графічної схеми показана на рис. 3.3. Тут  $k$ -а зона з'єднується з іншою частиною мережі трубопроводом, позначеним пунктирною лінією. Це означає, що сполучний трубопровід може мати місце в мережі або бути відсутнім. Крім того,  $k$ -а зона може з'єднуватися декількома трубопроводами з іншою частиною мережі.

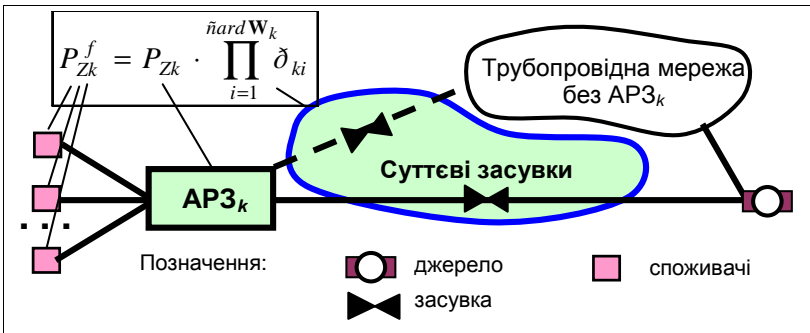


Рис. 3.3 – Перша модель функціональної надійності мережі стосовно споживачів  $k$ -ї аварійно-ремонтної зони трубопровідної мережі

Друга, або основна модель має місце, коли  $k$ -а зона не стикується з джерелом, тобто ЦП до споживачів  $k$ -ї зони поступає через інші зони мережі. Основна модель відповідає загальному випадку. Розрахункова формула для функціональної надійності збігається з (3.13):

$$P_{Zk}^f = P_{Zk} \cdot D_{Xk}^f.$$



Тут індекс  $X$  говорить про те, що величина  $D_{Xk}^f$  поки є невідомою, і її ще треба знайти. Ця модель показана на рис. 3.4.

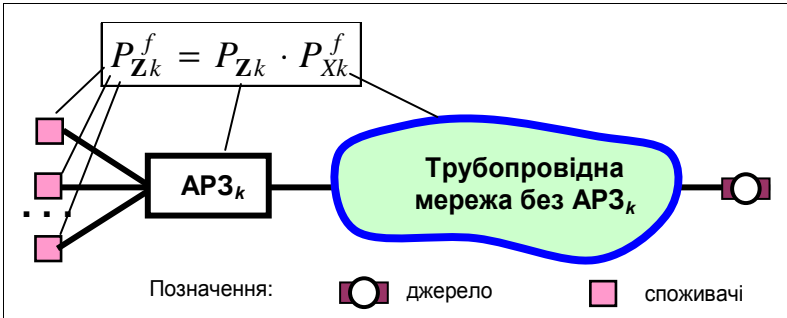


Рис. 3.4 – Друга модель функціональної надійності мережі стосовно споживачів  $k$ -ї аварійно-ремонтної зони трубопровідної мережі

Аналіз моделей дозволяє зробити такі висновки:

- принципово неможливо ніякими засобами домогтися того, щоб функціональна надійність мережі щодо споживачів однієї і тієї ж зони чисельно перевищувала технічну надійність цієї зони;

- підвищити функціональну надійність мережі щодо споживачів однієї і тієї ж зони можна за рахунок збільшення функціональної надійності мережі щодо цієї зони, тобто за рахунок зростання ймовірності подачі ЦП в цю зону;

- збільшення загальної довжини трубопроводів у конкретній АРЗ приводить до зниження функціональної надійності мережі щодо споживачів цієї зони і навпаки;

- перетворення АРЗ на дві чи більше АРЗ за рахунок введення нових суттєвих засувок дозволяє підвищити функціональну надійність мережі щодо споживачів цієї зони;

- для розрахунку функціональної надійності за основною моделлю (3.13) необхідно мати метод розрахунку функціональної надійності мережі  $D_{Xk}^f$  відносно довільно обраної  $k$ -ї зони.

Функціональна надійність

З моделі (3.13) з урахуванням (3.14) отримуємо універсальну модель розрахунку функціональної надійності трубопровідної мережі  $D_{Zk}^f$  щодо споживачів довільно обраної  $k$ -ї зони:

$$P_{Zk}^f = \begin{cases} P_{Zk} \cdot \prod_{i=1}^{n_{ard} W_k} \delta_{ki}, & \text{якщо } k - \text{à çîâ} \\ & \text{îðèèà°òuîñý ç äæãðäèîï \text{ Öï}; \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Zk} \cdot D_{Xk}^f \\ \hat{a}^3 \text{íøîó} \quad \delta\grave{a}\zeta^3. \end{array} \right.$$

Величину  $P_{Zk}$  у (3.8) визначаємо за однією з формул (3.8) – (3.12) і надалі будемо її вважати відомою. Тому проблема розрахунку функціональної надійності, по суті, зводиться до визначення величини  $D_{Xk}^f$ , тобто до визначення функціональної надійності мережі стосовно довільно обраної  $k$ -ї аварійно-ремонтної зони, коли вона безпосередньо не стикається з джерелом ЦП.

### 3.4. Розрахунок функціональної надійності мережі щодо аварійно-ремонтної зони

Визначення функціональної надійності в загальному випадку, тобто відповідно до виразу (3.13) потребує розрахунку функціональної надійності мережі  $D_{Xk}^f$  щодо довільно обраної  $k$ -ї аварійно-ремонтної зони,  $k \in \{1, 2, \dots, z\}$ .

Якщо технічна надійність  $P_{Zk}$  у (3.15) є внутрішньою властивістю  $k$ -ї АРЗ, що не залежить від структури  $k$ -ї зони і структури всієї мережі, то шукана величина  $D_{Xk}^f$  визначає властивість усієї мережі стосовно  $k$ -ї зони і знаходиться залежно від структури мережі і місця знаходження  $k$ -ї зони в цій структурі. Для кожної АРЗ мережі величина  $D_{Xk}^f$  має своє власне значення.

Розіб'ємо вихідний зважений орієнтований граф  $G[h, z, l, \lambda, \mu, \delta]$ , що відповідає розподільній трубопроводній мережі, на підграфи, кожний з яких відповідає одній аварійно-ремонтній зоні. Якщо тепер розглядати отримані підграфи як найпростіші елементи мережі і скомпонувати з них новий граф, то одержимо наочну схему структури всієї мережі щодо АРЗ. У новому графі кожній  $k$ -й вершині ( $k = \bar{1}, z$ ) відповідатиме  $k$ -а зона. Кожній дузі графа буде відповідати суттєва засувка, що об'єднує дві зони (дві вершини). При цьому напрямок дуги збігається з напрямком руху ЦП за гідравлічним розрахунком, а кількість дуг з однієї вершини в іншу збігається з кількістю суттєвих засувок між двома зонами. Вершина, що відповідає джерелу ЦП, зберігає своє положення, яке вона займала у вихідному графі. Усі споживачі однієї зони, якщо вони є, зводяться до одного умовного споживача, тому що функціональна надійність мережі стосовно всіх споживачів однієї і тієї ж зони завжди однакова.

Перетворення вихідного графа  $G[h, z, l, \lambda, \mu, \delta]$  у граф аварійно-ремонтних зон (граф АРЗ) виконують за строгим алгоритмом, що не допускає якоїсь неоднозначності. Для підтвердження сказаного продемонструємо перетворення графа гіпотетичної мережі у відповідний граф АРЗ.

Нехай граф гіпотетичної розподільної трубопроводної мережі має вигляд, зображений на рис. 3.5. У даному разі трубопроводна мережа складається з одного джерела ЦП  $h_1$ , вісімнадцятьох трубопроводів  $t_1, t_2, \dots, t_8$ , одинадцятьох засувок  $\dot{a}_1, \dot{a}_2, \dots, \dot{a}_{11}$  і тринадцятьох колодязів  $1, 2, \dots, 13$ ...

Трубопроводна мережа має шість АРЗ, що визначаються за строгою процедурою залежно від розташування суттєвих засувок у мережі. Дана процедура і відповідна обчислювальна функція будуть розглянуті пізніше.

У запропонованій мережі всі засувки є істотними. Склад всіх АРЗ відображений у табл.3.1.

Функціональна надійність

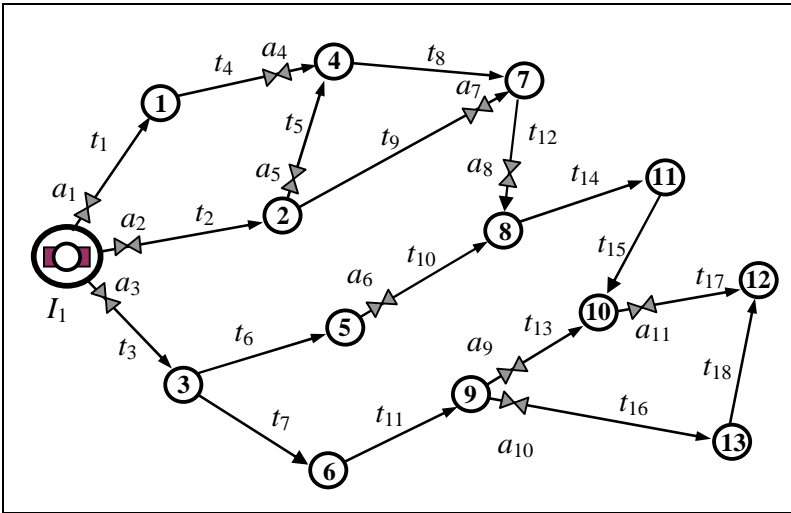


Рис. 3.5 – Визначальний граф гіпотетичної розподільної трубопроводної мережі

Таблиця 3.1 – Склад аварійно-ремонтних зон гіпотетичної мережі

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопроводи	Відсікаючі засувки	Колодязі
1	$t_1, t_4$	$\dot{a}_1, \dot{a}_4$	1
2	$t_2, t_9$	$\dot{a}_2, \dot{a}_5, \dot{a}_7$	2
3	$t_3, t_6, t_7, t_{11}$	$\dot{a}_3, \dot{a}_6, \dot{a}_9, \dot{a}_{10}$	3, 5, 6, 9
4	$t_5, t_8, t_{12}$	$\dot{a}_4, \dot{a}_5, \dot{a}_7, \dot{a}_8$	4, 7
5	$t_{10}, t_{13}, t_{14}, t_{15}$	$\dot{a}_6, \dot{a}_8, \dot{a}_9, \dot{a}_{11}$	8, 10, 11
6	$t_{16}, t_{17}, t_{18}$	$\dot{a}_{10}, \dot{a}_{11}$	12, 13

Граф АРЗ, отриманий у результаті перетворення вихідного графа, зображений на рис. 3.6. Граф є гарним наочним засобом для вираження загальної структури ТТС. Він показує, яким способом і за допомогою якої запірної арматури аварійно-ремонтні зони стикаються між собою і з джерелом ЦП.

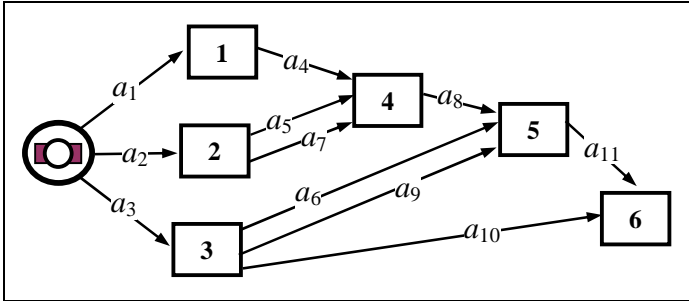


Рис. 3.6 – Граф аварійно-ремонтних зон гіпотетичної трубопровідної мережі

Граф на рис. 3.7 можна спростити. Засувки  $a_2$  і  $a_7$ , що з'єднують зони №2 і 4, несуть однакове функціональне навантаження. Якщо одна з зон №2 і 4 перебуває в аварійному стані, то обидві засувки  $a_2$  і  $a_7$  повинні знаходитися в положенні «закрито». Якщо обидві зони №2 і 4 перебувають у справному стані, то обидві засувки повинні знаходитися в робочому стані «незакрито». Тому рівнобінні дуги, що з'єднують вершини 2 і 4, можна замінити однією узагальненою дугою. Цій дузі відповідатиме узагальнена засувка з технічною надійністю  $\delta_{a_{5,7}} = \delta_{a_5} \cdot \delta_{a_7}$ . При цьому орієнтація дуги повинна збігатися з орієнтацією замінних дуг. Якщо напрямки замінних дуг протилежні, то узагальнена дуга повинна бути двоспрямованою. Те саме стосується і засувок  $a_6$  і  $a_9$ , що з'єднують аварійно-ремонтні зони №3 і 5. Узагальнена засувка у цьому випадку матиме технічну надійність  $\delta_{a_{6,9}} = \delta_{a_6} \cdot \delta_{a_9}$ .

### Функціональна надійність

Аналіз графа АРЗ показує, що зони №1, 2 і 3 безпосередньо стикаються з джерелом ЦП, а зони №4, 5 і 6 не мають безпосереднього стикування з джерелом. Отже функціональні надійності мережі щодо споживачів 1-ї, 2-ї і 3-ї зон визначаються співвідношенням (3.14):

$$P_{Z_1}^f = P_{Z_1} \cdot \delta_{\dot{a}_1} \cdot \delta_{\dot{a}_4};$$

$$P_{Z_2}^f = P_{Z_2} \cdot \delta_{\dot{a}_2} \cdot \delta_{\dot{a}_5} \cdot \delta_{\dot{a}_7} = P_{Z_2} \cdot \delta_{\dot{a}_{2,5,7}};$$

$$P_{Z_3}^f = P_{Z_3} \cdot \delta_{\dot{a}_3} \cdot \delta_{\dot{a}_6} \cdot \delta_{\dot{a}_9} \cdot \delta_{\dot{a}_{10}} = P_{Z_3} \cdot \delta_{\dot{a}_{3,6,9,10}}.$$

АРЗ з номерами 4, 5 і 6 не мають безпосереднього стикування з джерелом ЦП. Для визначення функціональної надійності мережі щодо споживачів цих зон необхідно попередньо визначити функціональну надійність мережі  $D_{Xk}^f$  стосовно кожною з цих зон.

Процедура визначення  $D_{Xk}^f$ , коли АРЗ не стикається з джерелом ЦП, є найбільш складним етапом у розрахунку функціональної надійності.

Кожна  $k$ -а АРЗ, що не стикається з джерелом ЦП, має власну унікальну модель для розрахунку  $D_{Xk}^f$ , яка залежить від структури графа АРЗ і місця знаходження  $k$ -ї зони в цій структурі. Так, для розглянутої гіпотетичної трубопровідної мережі розрахункові моделі для 4-ї, 5-ї і 6-ї зон мають вигляд, показаний на рис. 3.7.

Розрахункова модель для функціональної надійності гіпотетичної мережі щодо АРЗ №4 (рис. 3.7а) має елемент 6, що відповідає АРЗ №6, яка зображена пунктирними лініями. Це означає, що функціональна надійність мережі щодо АРЗ №4 не залежить від технічної надійності АРЗ №6. Цільовий продукт від джерела може поступати в АРЗ №4 через АРЗ №5. Але надходження ЦП в АРЗ №5 не залежить від працездатності зони №6. Постачання ЦП в

АРЗ №5 залежить тільки від працездатності АРЗ №3. Тому АРЗ №6 ніяким способом не впливає на надійність постачання ЦП в АРЗ №4 і її треба виключити з моделі.

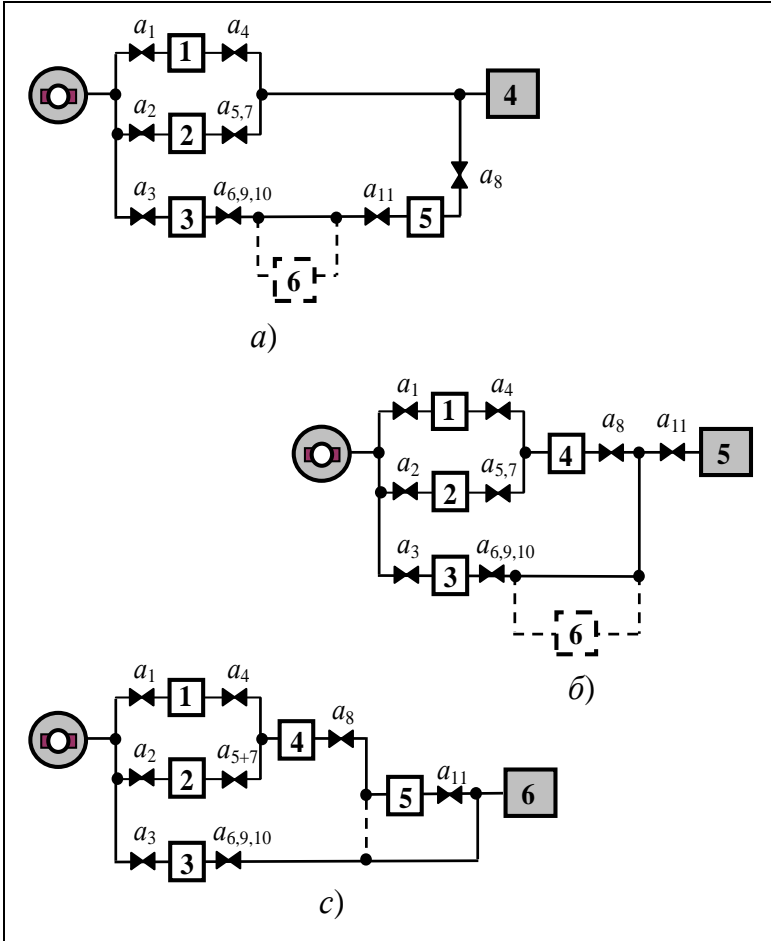


Рис. 3.7 – Розрахункові моделі функціональної надійності мережі щодо аварійно-ремонтних зон

Функціональна надійність

Аналогічна ситуація спостерігається в моделі функціональної надійності мережі щодо АРЗ №5 (рис. 3.7,б).

Розрахункова модель для функціональної надійності гіпотетичної мережі щодо АРЗ №6 (рис. 3.7,с) має несуттєвий зв'язок між АРЗ №3 і АРЗ №5, що зображено пунктирною лінією. Оскільки АРЗ №3 безпосередньо стикається з АРЗ №6, то її вплив на функціональну надійність АРЗ №6 не залежить від АРЗ №5. Тому зв'язок між АРЗ №3 і АРЗ №5 треба виключити з моделі.

Таблиця 3.2 – Функціональна надійність мережі стосовно окремих елементів системи

№ АРЗ, $k$	Функціональна надійність мережі стосовно	
	$k$ -ї аварійно-ремонтної зони, $D_{X_k}^f$	споживачів $k$ -ї АРЗ, $D_{Z_k}^f$
1	$\delta_{a_1} \cdot \delta_{a_4}$	$P_{Z_1} \cdot \delta_{a_{1,4}}$
2	$\delta_{a_2} \cdot \delta_{a_{5,7}}$	$P_{Z_2} \cdot \delta_{a_{2,5,7}}$
3	$\delta_{a_3} \cdot \delta_{a_{6,9,10}}$	$P_{Z_3} \cdot \delta_{a_{3,6,9,10}}$
4	$1 - \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \delta_{a_1} P_{Z_1} \delta_{a_4} \right) \left( 1 - \delta_{a_2} P_{Z_2} \delta_{a_{5,7}} \right) \right] \right\} \times$ $\times \left\{ 1 - \delta_{a_3} P_{Z_3} \delta_{a_{6,9,10}} \delta_{a_1} P_{Z_5} \delta_{a_8} \right\}$	$D_{Z_4} \cdot P_{Z_4}^f$
5	$\left\langle 1 - \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \delta_{a_1} P_{Z_1} \delta_{a_4} \right) \left( 1 - \delta_{a_2} P_{Z_2} \delta_{a_{5,7}} \right) \right] \right\} \times \right.$ $\times P_{Z_4} \delta_{a_8} \cdot \left. \left\{ 1 - \delta_{a_3} P_{Z_3} \delta_{a_{6,9,10}} P_{Z_5} \delta_{a_8} \right\} \right\rangle \delta_{a_{11}}$	$D_{Z_5} \cdot P_{Z_5}^f$
6	$1 - \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \delta_{a_1} P_{Z_1} \delta_{a_4} \right) \left( 1 - \delta_{a_2} P_{Z_2} \delta_{a_{5,7}} \right) \right] \right\} \times$ $\times P_{Z_4} \delta_{a_8} P_{Z_5} \delta_{a_{11}} \cdot \left\{ 1 - \delta_{a_3} P_{Z_3} \delta_{a_{6,9,10}} \right\}$	$D_{Z_6} \cdot P_{Z_6}^f$



При розрахунку функціональної надійності мережі щодо  $k$ -ї зони, незалежно від її розташування в мережі, розрахункова модель обов'язково повинна включати всі суттєві засувки, що відсікають її від іншої частини мережі.

Після побудови розрахункових моделей обчислення шуканої функціональної надійності мережі щодо АРЗ  $D_{Xk}^f$  робиться за методикою розрахунку надійності технічних систем із змішаним з'єднанням елементів. Результати цих розрахунків зведені в табл. 3.2.

### **3.5. Основи методу розрахунку функціональної надійності трубопровідних мереж**

Послідовність дій для визначення функціональної надійності мережі щодо споживачів  $k$ -ї аварійно-ремонтної зони в гіпотетичній мережі складає основу аналітичного методу розрахунку функціональної надійності в ТТС великої розмірності.

Запропонований метод розрахунку надійності постачання ЦП у складних ТТС дозволяє одержати ймовірність надходження ЦП конкретному споживачеві з урахуванням структури мережі й надійності функціонування окремих елементів мережі (паспортної або статистично накопиченої). Метод орієнтований на трубопровідні мережі, що є основними структурними компонентами складних трубопровідних систем. До того ж ці мережі за складністю структури порівнянні зі складністю трубопровідних транспортних мереж, що експлуатуються тепер у різних галузях народного господарства (водо-, тепло-, газопостачання). Розрахункова величина відповідає прийнятним державним стандартам з надійності [10].

Вихідними даними для розрахунку функціональної надійності мережі з постачання ЦП конкретному споживачеві за допомогою запропонованого методу є:

- топологічна структура мережі з вказівкою довжини просторово протяжних елементів (трубопроводів), місць розташування запірної арматури й активних елементів (насосних станцій, компресорів) і споживачів;

## Функціональна надійність

- інтенсивності відмов просторово протяжних елементів мережі й інтенсивності їх відновлення;
- імовірності безвідмовної роботи просторово непротяжних елементів мережі (активних елементів, запірної арматури, розподільних пунктів та ін.).

Базовою теоретичною основою методу є дослідження Самойленка М.І. [35, 43 – 45], Рудя І.О. [36 – 39], Гавриленко І.О. [7 – 10] і класичні методи розрахунку надійності технічних систем малої розмірності.

Основними теоретичними передумовами для розробки методу розрахунку надійності постачання ЦП конкретному споживачеві служать такі твердження:

- надійність функціонування (технічна надійність) аварійно-ремонтної зони не залежить від її структури, оскільки вихід з ладу будь-якого структурного елемента АРЗ приводить до змушеного припинення експлуатації всіх елементів АРЗ на період усунення несправності;
- надійність постачання ЦП (функціональна надійність) інваріантна стосовно споживачів однієї і тієї ж аварійно-ремонтної зони;
- функціональна надійність щодо споживачів конкретної аварійно-ремонтної зони в загальному випадку залежить від технічної надійності всіх АРЗ мережі, структури об'єднання АРЗ у мережу і місця розташування конкретної АРЗ у цій структурі;
- функціональна надійність щодо споживачів однієї і тієї ж аварійно-ремонтної зони за своїм значенням менше або дорівнює технічній надійності цієї зони.

*Метод розрахунку функціональної надійності включає сім етапів (завдань):*

1. Формування математичної моделі складної трубопровідної транспортної мережі у вигляді зваженого графа.
2. Розбивка вихідного зваженого графа трубопровідної транспортної мережі на підграфи, кожний з яких відповідає одній АРЗ.
3. Розрахунок надійності функціонування (технічної надійності) АРЗ.

4. Перетворення вихідного зваженого графа мережі великої розмірності в зважений граф АРЗ малої розмірності (заміна кожної АРЗ однією вершиною).

5. Побудова розрахункових моделей функціональної надійності стосовно АРЗ, що не стикаються безпосередньо з джерелом ЦП.

6. Аналіз кожної розрахункової моделі з метою виявлення і видалення з моделі несуттєвих зв'язків між аварійно-ремонтними зонами і самих зон, що не впливають на функціональну надійність.

7. Розрахунок функціональної надійності мережі щодо АРЗ і функціональної надійності мережі стосовно споживачів однієї і тієї ж зони за допомогою класичних методів розрахунку надійності технічних систем.

Розглянемо кожний етап докладніше.

### **3.5.1. Формування математичної моделі складної трубопровідної транспортної мережі**

Математична модель складної трубопровідної транспортної мережі у вигляді зваженого графа, яка орієнтована на розрахунок технічної і функціональної надійності, докладно наведена в п.3.1. Тому розгляд етапу формування математичної моделі обмежимо тільки рекомендацією щодо його реального виконання.

Математична модель трубопровідної мережі являє собою зважений граф, що описується математичними виразами (3.1) – (3.7). Найбільш сприятливим комп'ютерним середовищем для формування математичної моделі є графічне середовище системи автоматизованого виконання графічних робіт *AutoCAD*. Важливими перевагами системи *AutoCAD* є наявність убудованих засобів з автоматичного формування баз даних після синтезу графа мережі і наявність вбудованої алгоритмічної мови програмування *AutoLISP*, що дозволяє вирішувати будь-які розрахунково-графічні інженерні завдання.

Граф мережі в системі створюється один раз, а потім підтримується в робочому стані, адекватному проектній або реально існуючій мережі, засобами графічного редагування.

На нашу думку, графічне середовище *AutoCAD* – найбільш зручне і корисне середовище для створення і підтримки графічної і математичної моделей сучасних регіональних і міських розподільних трубопроводних системи, які постійно еволюціонують у просторі й часі.

### 3.5.2. Розбивка зваженого графа трубопроводної мережі на підграфи аварійно-ремонтних зон

Для вирішення задачі розбивки графа мережі на підграфи АРЗ як визначальну математичну модель мережі використовуються вирази (3.1) – (3.6) без участі вагових функцій  $h, l, \lambda, \mu, \delta$ .

Розв'язання задачі розбивки графа (будемо називати її глобальною) включає вирішення двох частинних задач:

- задачі виділення підграфа АРЗ для довільно обраної дуги графа, або задачі локалізації АРЗ для довільно обраного трубопроводу;
- задачі виділення з підграфа АРЗ підмножини суттєвих засувок.

При вирішенні глобальної задачі на кінцевий результат впливають тільки суттєві засувки. Щоб уникнути помилок, пов'язаних із розбивкою запірної арматури на суттєву і несуттєву, рекомендується в математичній моделі (3.1) – (3.6) враховувати всі наявні в мережі засувки. Коректна розбивка засувок здійснюється автоматично у процесі вирішення частинної задачі локалізації аварійно-ремонтної зони для довільно обраного трубопроводу.

На рис. 3.8 зображена схема алгоритму вирішення глобальної задачі, що здійснює повну розбивку вихідного графа мережі на підграфи АРЗ і виділення в кожній АРЗ суттєвих засувок.

У схемі алгоритму на рис. 3.9 у блоці 4 вводиться допоміжна множина дуг графа ( $\Delta E$ ) і встановлюється вихідне значення лічильника АРЗ.

Блок 6 (підпрограма локалізації АРЗ для трубопроводу  $e_{pq}$ ) при кожному циклічному виконанні формує одну АРЗ.

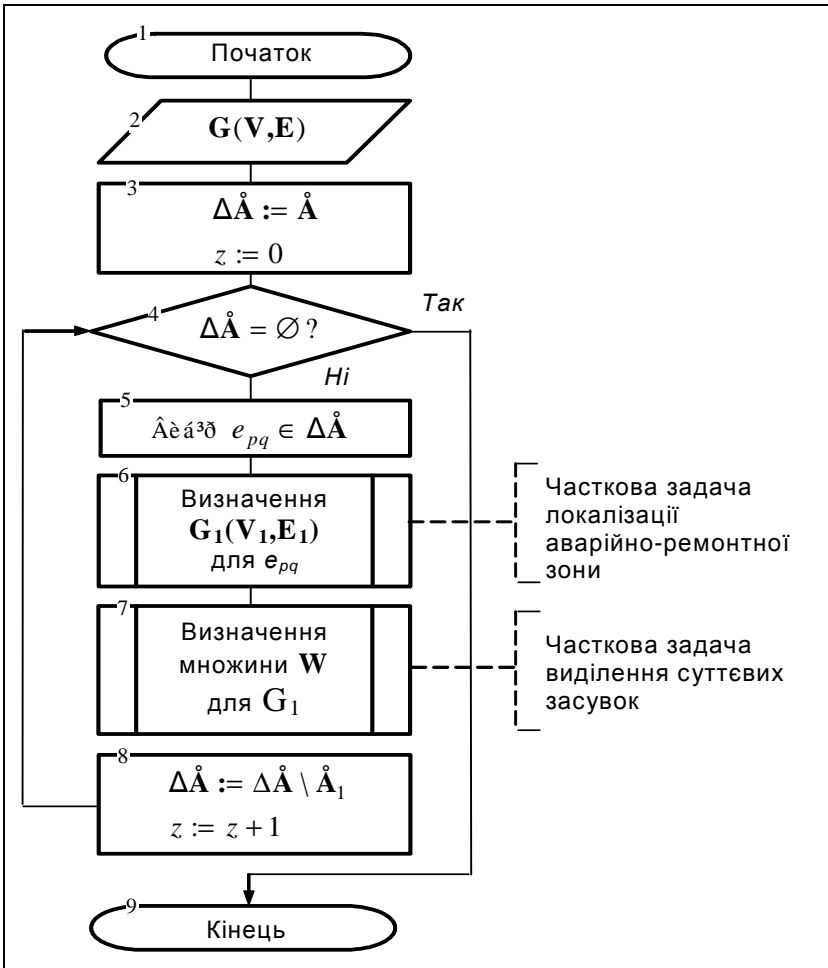


Рис. 3.8 – Схема алгоритму вирішення глобальної задачі розбивки графа мережі на підграфи аварійно-ремонтних зон

Функціональна надійність

У блоці 5 здійснюється довільний вибір дуги з множини дуг графа мережі, які у процесі роботи алгоритму ще не охоплені вже сформованими АРЗ.

Блок 7 (підпрограма формування множини суттєвих засувок  $\mathbf{W}$ ) визначає множину засувок, що відсікають АРЗ, сформовану в блоці 6, від іншої частини мережі. Сформована множина засувок  $\mathbf{W}$ , з одного боку, допомагає відокремити АРЗ від усієї мережі, а з іншого – дозволяє візуально контролювати правильність розбивки.

Блок 8 видаляє з допоміжної множини  $\Delta\mathbf{E}$  дуги чергового побудованого підграфа АРЗ і збільшує лічильник зон мережі на одиницю.

**Перша частинна задача – задача локалізації аварійно-ремонтної зони АРЗ для довільно обраного трубопроводу.**

Кожний трубопровід (дуга)  $e_{ij}$  входить у декілька зон (підграфів)

$\mathbf{G}_r^{ij}$ ,  $r = \overline{1, m_{ij}}$ , що можуть бути відсічені від усієї мережі різними комбінаціями суттєвих засувок. Тут  $m_{ij}$  – загальна кількість таких зон для трубопроводу  $e_{ij}$ . Найбільша зона – уся мережа без активних елементів. Принаймні, одна з зон, нехай нею буде

$\mathbf{G}_r^{ij} = \mathbf{G}_1(\mathbf{V}_1, \mathbf{E}_1)$ , має найменшу кількість споживачів (вершин):

$$\text{card}(\mathbf{V}_1) = \min_r \{ \text{card} \mathbf{V}_r \}, \quad r = \overline{1, m_{ij}}. \quad (3.16)$$

Тоді задачу локалізації АРЗ для конкретного трубопроводу  $e_{ij}$  можна сформулювати в такий спосіб.

*Дано: математична модель трубопровідної мережі у вигляді зв'язного графа (3.1); функція (3.6), яка визначена для кожної дуги графа; трубопровід  $e_{ij} \in \mathbf{E}$ .*

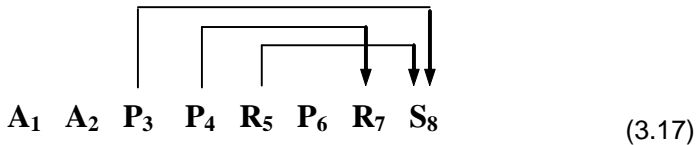
Потрібно визначити підграф  $G_1(V_1, E_1) \subseteq G(V, E)$ , що відповідає АРЗ трубопроводу  $e_{ij}$  і задовольняє вимозі (3.16).

Теоретично вирішення даної задачі може бути отримано шляхом прямого перебору. Однак практично такий спосіб нездійснений через велику розмірність задачі: граф міської водогінної мережі може нараховувати понад тисячу дуг  $e_{ij}$ .

Розв'язати дану задачу можна за допомогою рекурсивного алгоритму локалізації АРЗ, запропонованого Самойленко М.І. у [49]. Даний алгоритм оперує тільки дугами графа мережі, що безпосередньо сполучаються з дугою  $e_{ij}$ . Це дозволяє вилучити з вирішення задачі переважну кількість дуг, а саме вирішення зробити компактним, наочним і простим, особливо при відстеженні процесу вирішення за допомогою комп'ютерної графіки.

Вирішення задачі – шуканий підграф  $G_1(V_1, E_1)$  – однозначно визначає не тільки АРЗ трубопроводу  $e_{ij}$ , але й підготовляє дані до однозначного визначення множини засувок, перекриття яких гарантує припинення доступу ЦП до АРЗ.

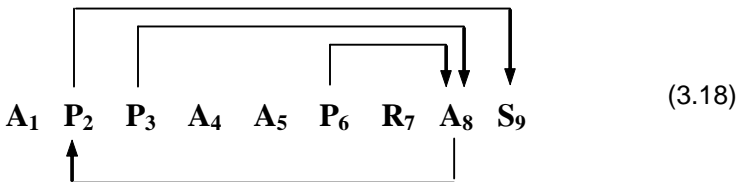
Алгоритм локалізації АРЗ, тобто визначення графа  $G_1(V_1, E_1)$  описується операторною схемою



Тут  $A_1$  – формування початкової підмножини  $E_1 = \{e_{pq}\}$ ;  $A_2$  – формування початкової підмножини  $V_1 = \{v_p, v_q\}$ ;  $P_3$  – аналіз пара-

метра вагової функції  $z_{pq}$ : якщо  $z_{pq} = 3$ , то шуканий підграф  $G_1$  визначається початковими підмножинами  $E_1$  і  $V_1$  і здійснюється перехід до оператора  $S_8$ ; в іншому разі виконується наступний оператор;  $P_4$  – аналіз параметра  $z_{pq}$ : якщо  $z_{pq} = 2$ , то керування передається рекурсивному підалгоритму  $R_7$  з фактичним параметром  $v_p$ , в іншому разі керування одержує рекурсивний підалгоритм  $R_5$  з фактичним параметром  $v_q$ ;  $R_5$  і  $R_7$  – рекурсивні підалгоритми модифікації підмножин  $E_1$  і  $V_1$  з формальним параметром  $v_r$ ;  $P_6$  – аналіз параметра  $z_{pq}$ : якщо  $z_{pq} = 1$ , то рішення знайдене і здійснюється перехід до оператора  $S_8$ , в іншому разі вирішення продовжує рекурсивний підалгоритм  $R_7$  з фактичним параметром  $v_p$ ;  $S_8$  – закінчення розв’язання задачі.

У свою чергу, рекурсивний підалгоритм  $R_7$  (він же  $R_5$ ) з формальним параметром  $v_r$  описується операторною схемою



Тут  $A_1$  – визначення підмножини  $E_r^c = E_r \setminus E_1$ . Це те саме, що видалення з підмножини  $E_r$  раніше оброблених елементів (дуг);  $P_2$  – аналіз підмножини  $E_r^c$ : якщо  $E_r^c = \emptyset$ , то підалгоритм завершує свою роботу; якщо  $E_r^c \neq \emptyset$ , то починається циклічна обро-



бка дуг з підмножини  $\mathbf{E}_r^c$ ;  $P_3$  – аналіз параметра  $z_{ij}$  довільно обраної дуги  $e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c$ : якщо  $z_{ij} = 3 \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^+ \vee z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^-$ , то здійснюється перехід до останнього оператора циклу, інакше виконується наступний оператор;  $A_4$  – модифікація підмножини  $\mathbf{E}_1 := \mathbf{E}_1 \cup e_{ij}$ ;  $A_5$  – модифікація підмножини  $\mathbf{V}_1 := \mathbf{V}_1 \cup v_j$ ;  $P_6$  – аналіз параметра  $z_{ij}$  обраної дуги: якщо  $z_{ij} \neq 0$ , то робиться рекурсивний виклик підалгоритму  $R_7$ , з фактичним параметром  $v_r (r = i \vee r = j, i \neq j)$ ;  $A_8$  – модифікація підмножини  $\mathbf{E}_r^c := \mathbf{E}_r^c \setminus e_{ij}$  і перехід до початкового оператора циклу;  $S_9$  – завершення роботи підалгоритму.

Алгоритми (3.17) і (3.18) відповідають обчисленню функції

$$f(e_{pq}) = \begin{cases} \mathbf{G}_0, & \text{якщо } z_{pq} = 3; \\ R(\mathbf{G}_0, v_p), & \text{якщо } z_{pq} = 2; \\ R(\mathbf{G}_0, v_q), & \text{якщо } z_{pq} = 1; \\ R(R(\mathbf{G}_0, v_p), v_q), & \text{якщо } z_{pq} = 0, \end{cases} \quad (3.19)$$

де

$$\forall e_{pq} \in \mathbf{E}, \quad \mathbf{E}_0 = \{e_{pq}\}, \quad \mathbf{V}_0 = \{v_p, v_q\}, \quad \mathbf{G}_0 = \mathbf{G}(\mathbf{V}_0, \mathbf{E}_0); \quad (3.20)$$

$$R(\mathbf{G}_1, v_r) = \begin{cases} \mathbf{G}_1, & \text{якщо } v_r \in \mathbf{V}_1 \vee \text{card } \mathbf{E}_r^c = 0; \\ R(Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), v_r), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{якщо } \text{card } \mathbf{E}_r^c > 1; \\ Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{якщо } \text{card } \mathbf{E}_r^c = 1, \end{cases} \quad (3.21)$$

$$Q(\mathbf{G}_1, v_r) = \begin{cases} \mathbf{G}_1, & \text{якщо } z_{ij} = 3 \vee z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^- \vee \\ & \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^+; \\ \mathbf{G}_1 \cup \mathbf{G}_{ij}, & \text{якщо } z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^+ \vee \\ & \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^-; \\ \mathbf{G}_1 \cup \mathbf{G}_{ij} \cup R(\mathbf{G}_1, v_s \mid v_s \in \{v_i, v_j\}, v_s \neq v_r \\ & \text{якщо } z_{ij} = 0. \end{cases} \quad (3.22)$$

Тут  $\mathbf{G}_1 \cup \mathbf{G}_{ij} \Leftrightarrow (\mathbf{V}_1 \cup \{v_r\}, \mathbf{E}_1 \cup e_{ij})$  за умови  $i = r \vee j = r$ .

При великому ступені кільцювання мережі рекурсивна обробка графа може повернутися до вершини, що вже була оброблена. При цьому повторна циклічна обробка в (3.21) утрачає зміст, хоча і не впливає на кінцевий результат. Щоб анулювати і тим самим зменшити глибину рекурсії, необхідно модифікувати умову (3.21) в такий спосіб:

$$R(\mathbf{G}_1, v_r) = \begin{cases} \mathbf{G}_1, & \forall v_r \in \mathbf{V}_1 \vee \text{card } \mathbf{E}_r^c = 0; \\ R(Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), v_r), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \forall v_r \notin \mathbf{V}_1 \wedge \text{card } \mathbf{E}_r^c > 1; \\ Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \forall v_r \notin \mathbf{V}_1 \wedge \text{card } \mathbf{E}_r^c = 1. \end{cases} \quad (3.23)$$

Модифікація (3.23) суттєва для роботи алгоритмів (3.17) і (3.18) в умовах обмеженої пам'яті комп'ютера.

Вирази (3.19) – (3.23) являють собою математичну модель процесу розбивки графа мережі на підграфи АРЗ.

Розв'язання задачі локалізації АРЗ в графічному середовищі *AutoCAD* дозволяє диспетчерській службі візуально стежити за процесом розбивки загального графа мережі на підграфи АРЗ.

**Друга частинна задача – задача виділення із заданої аварійно-ремонтної зони суттєвої запірної арматури.** Задача виділення з підграфа АРЗ суттєвих засувок не є основною для розбивки мережі на підграфи АРЗ. Але вона має велике значення для служб експлуатації складних ТТС при проведенні аварійних або профілактичних робіт, коли необхідно швидко відокремити АРЗ від усієї мережі. Помилкове перекриття не тієї засувки або неперекриття необхідної тягне за собою значні матеріальні і трудові втрати, а часом і значне погіршення екологічного стану навколишнього середовища.

Завдання виділення із заданої аварійно-ремонтної зони суттєвої запірної арматури формулюється в такий спосіб.

Функціональна надійність

Дано: математична модель АРЗ у вигляді підграфа  $G_1(V_1, E_1)$  як результат вирішення попередньої частинної задачі (задачі локалізації АРЗ), функція (3.6), що визначена для кожної дуги підграфа  $G_1(V_1, E_1)$ .

Потрібно визначити множину суттєвих засувок  $W$ , яка гарантовано відсікає аварійно-ремонтну зону з математичною моделлю  $G_1(V_1, E_1)$  від іншої частини мережі.

Розв'язання даної задачі зводиться до визначення множини  $W$  граничних засувок заданої АРЗ, тобто до виділення всіх граничних засувок із підграфа  $G_1$ , отриманого в результаті вирішення завдання локалізації АРЗ.

Для опису алгоритму визначення множини  $W$  введемо наступні підмножини:

– підмножина вихідних і вхідних дуг  $E_i$ , інцидентних до вершини  $v_i$ ,

$$E_i = E_i^- \cup E_i^+ ; \quad (3.24)$$

– підмножина  $E_i^1$ , в якій кожний елемент відповідає трубопроводу колодязя (вершини)  $v_i$ , що не має запірної арматури в цьому колодязі, тобто

$$E_i^1 = \{e_{ij} \mid e_{ij} \in E_i^- \wedge z_{ij} = 2 \vee e_{ij} \in E_i^+ \wedge z_{ij} = 1\} ; \quad (3.25)$$

– підмножина  $E_i^2$ , в якій кожний елемент відповідає трубопроводу колодязя  $v_i$ , що належить АРЗ, тобто

$$E_i^2 = E_i \cap E_1 ; \quad (3.26)$$

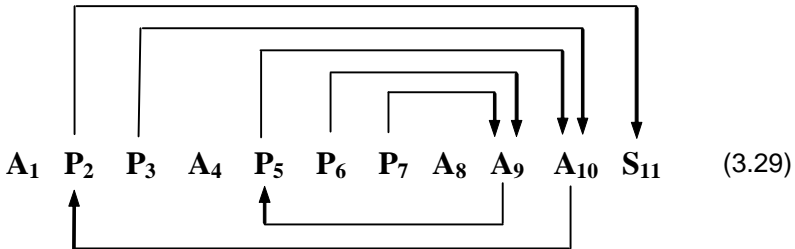
– підмножина  $\mathbf{E}_i^3$ , в якій кожний елемент відповідає трубопроводу колодязя  $v_i$ , що не належить АРЗ, тобто

$$\mathbf{E}_i^3 = \mathbf{E}_i \setminus \mathbf{E}_1 ; \quad (3.27)$$

– підмножина  $\mathbf{E}_i^4$ , в якій кожний елемент відповідає трубопроводу колодязя  $v_i$ , що належить АРЗ і не має запірної арматури в цьому колодязі, тобто

$$\mathbf{E}_i^4 = \mathbf{E}_i^2 \setminus \mathbf{E}_i^1 . \quad (3.28)$$

Алгоритм визначення множини  $\mathbf{W}$  відповідає операторній схемі



Тут  $A_1$  – формування початкової порожньої множини засувок  $\mathbf{W} = \emptyset$ ;  $P_2$  – аналіз множини вершин підграфа  $\mathbf{G}_1$ : якщо  $\mathbf{V}_1 = \emptyset$ , то всі вершини множини  $\mathbf{V}_1$  вже оброблені, множина  $\mathbf{W}$  остаточно сформована і треба перейти до оператора завершення алгоритму  $S_{11}$ , у протилежному разі починається цикл з обробки довільного елемента  $v_i \in \mathbf{V}_1$ ;  $P_3$  – аналіз дуг, інцидентних до

вершини  $v_i$ : якщо  $\mathbf{E}_i^3 = \emptyset$ , то всі трубопроводи колодзя  $v_i$  належать АРЗ і треба одразу ж перейти до кінцевого оператора циклу  $A_{10}$ , інакше виконується наступний оператор;  $A_4$  – введення допоміжної множини  $\mathbf{M} = \mathbf{E}_1$ ;  $P_5$  – аналіз підмножини  $\mathbf{M}$ : якщо  $\mathbf{M} = \emptyset$ , то всі дуги  $e_{ij}$ , інцидентні до вершини  $v_i$ , оброблені й треба перейти до оператора  $A_{10}$ , в іншому разі починає виконуватися вбудований цикл з обробки довільного елемента  $e_{ij} = \mathbf{M}$ ;  $P_6$  – аналіз дуги  $e_{ij}$ : якщо  $e_{ij} = \mathbf{E}_i^2 \wedge \mathbf{E}_i^4 \neq \emptyset$ , то всі трубопроводи колодзя  $v_i$ , що належать АРЗ, мають запірну арматуру і треба відразу ж перейти до кінцевого оператора вбудованого циклу  $A_9$ , інакше починають послідовно виконуватися оператори цього циклу;  $P_7$  – аналіз дуги  $e_{ij}$ : якщо  $e_{ij} = \mathbf{E}_i^3 \wedge \mathbf{E}_i^4 \neq \emptyset$ , то хоча б один з трубопроводів, що належать АРЗ, не має запірної арматури, а всі не приналежні – мають, то треба перейти на кінцевий оператор вбудованого циклу, в іншому разі виконується наступний оператор;  $A_8$  – модифікація підмножини  $\mathbf{W} := \mathbf{W} \cup \{e_{ij}, v_i\}$ ;  $A_9$  – модифікація підмножини  $\mathbf{M} := \mathbf{M} \setminus e_{ij}$  і перехід на початок вбудованого циклу  $P_4$ ;  $A_{10}$  – модифікація підмножини  $\mathbf{V}_1 := \mathbf{V}_1 \setminus v_i$  і перехід на початок зовнішнього циклу  $P_2$ ;  $S_{11}$  – закінчення розв’язання задачі.

Алгоритму (3.29) відповідає функція

$$\mathbf{W}(\mathbf{G}_1 = (\mathbf{E}_1 \setminus \mathbf{V}_1)) = \bigcup_{v_i \in \mathbf{V}_1} \mathbf{W}(\mathbf{V}_i), \quad (3.30)$$

де

$$\mathbf{W}(\mathbf{v}_i) = \begin{cases} \emptyset, & \text{якщо } \mathbf{E}_i^3 = \emptyset; \\ \bigcup_{e_{ij} \in \mathbf{E}_i^2} \{e_{ij}, v_i\}, & \text{якщо } \mathbf{E}_i^3 \neq \emptyset \wedge \mathbf{E}_i^4 \neq \emptyset; \\ \bigcup_{e_{ij} \in \mathbf{E}_i^3} \{e_{ij}, v_i\}, & \text{якщо } \mathbf{E}_i^3 \neq \emptyset \wedge \mathbf{E}_i^4 = \emptyset. \end{cases} \quad (3.31)$$

Вирази (3.30) і (3.31) являють собою математичну модель процесу формування із заданого підграфа  $\mathbf{G}_1$  множини  $\mathbf{W}$ , що визначає місце положення на мережі запірної арматури, що відсікає відповідну АРЗ від цієї мережі.

### 3.5.3. Розрахунок технічної надійності аварійно-ремонтних зон

Вихідними даними для розв'язання задачі з визначення надійності функціонування АРЗ  $\mathbf{Z}_k$  ( $k = \overline{1, z}$ ) у загальному випадку є підграфи АРЗ в кількості  $z$  і множини  $\mathbf{W}_k$  суттєвих засувок для кожної  $k$ -ї зони ( $k = \overline{1, z}$ ), що були отримані в результаті вирішення глобальної задачі розбивки визначального графа мережі, а також вагові функції  $h, z, l, \lambda, \mu, \delta$ .

Як було викладено раніше, технічну надійність кожної зони  $P_{\mathbf{Z}_k}$  можна розрахувати чотирма методами:

– *аналітичним* методом за допомогою виразу (3.8), що в даному разі набуває вигляду

$$P_{Z_k} = \left( \prod_{i=1}^{t_k} p_i \right) \cdot \left( \prod_{i=t+1}^{t_k+z_k} p_i \right) = \prod_{i=1}^{t_k+z_k} p_i, \quad (3.32)$$

де  $t_k$  – кількість дуг (трубопроводів) у графі АРЗ  $Z_k$ ;  $z_k$  – кількість засувок у зоні  $Z_k$ ;

- статистичним методом з використанням формули (3.9);
- статистико-аналітичними методами теорії масового обслуговування на основі використання виразів (3.10) і (3.11).

Вибір методу залежить від обставин, при яких треба зробити розрахунок технічної надійності. Так, при проектуванні нових мереж використання статистичного методу недоцільно через відсутність статистичних даних. При експлуатації мережі протягом  $5 \div 20$  років перевага надається статистико-аналітичним методам. При тривалій експлуатації мережі протягом більше 20 років найбільш точні результати забезпечує статистичний метод.

#### 3.5.4. Побудова зваженого графа аварійно-ремонтних зон

Два попередні етапи підготовляють визначальні дані для задачі побудови зваженого графа АРЗ. Так, етап розбивки визначального графа мережі на підграфи АРЗ дає поточному етапу такі дані:

- підграф  $Z_1$  аварійно-ремонтної зони, еквівалентний підграфу  $G_1(V_1, E_1)$ , що є результатом вирішення першої частинної задачі розбивки для довільно обраної 1-ї дуги з визначальної множини дуг  $E$ ;
- підграф  $Z_2$ , еквівалентний подграфу  $G_1(V_1, E_1)$  при довільному виборі 2-ї дуги з множини дуг  $E_{1_2} = E \setminus E_1$ ;



– підграф  $Z_3$ , еквівалентний підграфу  $G_1(V_1, E_1)$  при довільному виборі 3-ї дуги з множини дуг  $E_{13} = E_{12} \setminus E_1$ ;

...

– підграф  $Z_z$ , еквівалентний підграфу  $G_1(V_1, E_1)$  при довільному виборі  $z$ -ї дуги з множини дуг  $E_{1z} = E_{1z-1} \setminus E_1$ ;

– множина суттєвих засувок  $W_1$  у підграфі  $Z_1$ , еквівалентна множині засувок  $W$ , що є вирішенням другої частинної задачі розбивки визначального графа мережі на підграфи АРЗ;

– аналогічна множина  $W_2$  у підграфі  $Z_2$ ;

...

– аналогічна множина  $W_z$  у підграфі  $Z_z$ ;

– величина  $z$ , що відповідає кінцевому значенню лічильника АРЗ (див. алгоритм вирішення глобальної задачі розбивки на рис. 3.9).

Етап розрахунку технічної надійності АРЗ дає чисельні значення  $P_{Z_1}, P_{Z_2}, \dots, P_{Z_k}, \dots, P_{Z_z}$ , що встановлюють працездатність  $k$ -ї зони.

Для кожної суттєвої засувки з множини  $\bigcup_{k=1}^z W_k$  повинна бути відома ймовірність  $\delta_{\dot{a}}$  безвідмовної роботи за певний період часу  $T$ .

За наведеними вихідними даними будують зважений граф

$$Z[p, \delta_{\dot{a}}] = (Vz, Ez_z; p, \delta_{\dot{a}}), \quad (3.33)$$

де  $Vz$  – множина вершин графа, що відповідають джерелу ЦП (0-а вершина) і аварійно-ремонтним зонам,  $V_z = \{v_k\}_0^z$ ;  $Ez$  – мно-

жина дуг графа, що відповідають суттєвій запірній арматурі й об'єднують джерело ЦП з АРЗ в єдину мережу,  $\mathbf{Ez} = \{e_{ij} = (v_i v_j) \mid i, j = \overline{0, z}, i \neq j\}$ ;  $z$  – кількість АРЗ у мережі;  $p$  – вагова функція на вершинах графа, що визначає технічну надійність відповідної АРЗ;  $\delta_a$  – вагова функція на дугах графа, що визначає технічну надійність відповідної запірної арматури.

Побудова графа починається з 0-ї вершини (джерела ЦП), що має тільки вихідні дуги. Запірна арматура (засувки) на вихідних дугах вказує на ті АРЗ, що стикаються з джерелом ЦП. Для кожної такої АРЗ будують вершину з індексом, рівним номеру зони. Вихідні дуги з побудованих вершин АРЗ, яким у вихідному графі мережі відповідають суттєві засувки, вказують на наступні АРЗ, що вже не стикаються з джерелом ЦП.

Процес побудови продовжується доти, поки всім зонам у кількості  $z$  не будуть відповідати вершини в тій же кількості. Напрямок кожної дуги в побудованому графі повинен збігатися з напрямком потоку ЦП у відповідній запірній арматурі. Якщо в процесі побудови вихідна дуга вкаже на зону, для якої вершина вже побудована, то дугу спрямовують на побудовану вершину, і нову вершину не будують.

Сформований граф рекомендується перевірити на кількість вершин і дуг:

- кількість вершин повинна дорівнювати величині  $z + 1$  (кількість АРЗ плюс джерело ЦП);

- кількість дуг  $\text{card } \mathbf{Ez}$  повинно відповідати кількості сутєвих засувок мережі  $\text{card} \bigcup_{k=1} \mathbf{W}_k$ .

Спрощення графа АРЗ  $\mathbf{Z}[p, \delta_a]$ , тобто заміна паралельних дуг при їхній наявності однією дугою (односпрямованою або двоспрямованою), робиться тільки після проведення контролю кількості дуг і вершин у графі.

Результатом виконання етапу є спрощений граф АРЗ  $\mathbf{Z}_{\text{спр}}[p, \delta_a]$

### 3.5.5. Побудова розрахункових моделей функціональної надійності мережі

Розіб'ємо множину індексів  $\{k\}_1^z$  аварійно-ремонтних зон  $\mathbf{Z}_k$  на дві підмножини  $\{k\}_1^{z_c}$  і  $\{k\}_{z_c+1}^z$ . Нехай перша підмножина містить індекси тих АРЗ, що стикаються з джерелом ЦП. При цьому загальне число зон, що стикаються з джерелом, складе  $z_c$ . Тоді інші зони, що не мають стикування з джерелом ЦП, у кількості  $(z - z_c)$  матимуть індекси, що належать другій множині. Таку розбивку можна здійснити завжди. Якщо нумерація зон не дозволяє зробити зазначену розбивку, то зони треба перенумерувати. Для перенумерування необхідно забезпечити умову: перші індекси в кількості  $z_c$  повинні належати зонам, що безпосередньо стикаються з джерелом ЦП.

Етап побудови розрахункових моделей функціональної надійності для кожної аварійно-ремонтної зони виконують окремо. При цьому побудова розрахункових моделей для перших зон  $\mathbf{Z}_k$  з індексами від 1 до  $z_c$  не викликає особливого інтересу через свою очевидність і простоту. Кожна  $k$ -а розрахункова модель буде складатися тільки з двох вершин, одна з яких відповідає джерелу ЦП, інша – зоні  $\mathbf{Z}_k$ . Для збереження цілісності викладу будемо вважати, що розрахункові моделі для них також побудовані.

Для АРЗ, що не стикаються безпосередньо з джерелом ЦП, розрахункову модель будують в обов'язковому порядку. Вся інформація, необхідна для побудови розрахункових моделей, міститься у зваженому графі АРЗ  $\mathbf{Z}_{\text{oid}} [p, \delta_a]$ , сама розрахункова модель являє собою зважений підграф  $\mathbf{Z}_{f_k} [p, \delta_a]$  ( $k = \overline{1, z}$ ):

$$\mathbf{Z}_{f_k} [p, \delta_a] \subseteq \mathbf{Z}_{\text{oid}} [p, \delta_a].$$

У процесі побудови  $k$ -ї розрахункової моделі треба дотримуватися наступних правил:

Функціональна надійність

– кожна  $k$ -а розрахункова модель має початкову 0-у вершину (джерело ЦП) і кінцеву з індексом  $k$ , що відповідає  $k$ -ї АРЗ;

– кожна  $k$ -а модель повинна відображувати всі альтернативні варіанти надходження ЦП від джерела до  $k$ -ї АРЗ;

– напрямки дуг у моделі повинні збігатися з напрямком дуг у графі  $\mathbf{Z}_{\text{сiд}} [p, \delta_a]$ ;

– якщо напрямки потоків показують, що якась зона не є транзитною для  $k$ -ї АРЗ, то її вилучають з розрахункової моделі;

– двоспрямована дуга у транзитних зонах замінюється односпрямованою дугою, орієнтованою від джерела ЦП у бік  $k$ -ї АРЗ.

У результаті виконання етапу спрощений граф АРЗ  $\mathbf{Z}_{\text{сiд}} [p, \delta_a]$  перетвориться в систему розрахункових моделей:

$$\mathbf{Z}_{\text{сiд}} [p, \delta_a] \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{Z}_{f_1} [p, \delta_a]; \\ \mathbf{Z}_{f_2} [p, \delta_a]; \\ \dots \\ \mathbf{Z}_{f_z} [p, \delta_a] \end{cases} \quad (3.34)$$

### 3.5.6. Аналіз і корекція розрахункових моделей

Аналіз кожної  $k$ -ї розрахункової моделі в (3.34) виконують з метою виявлення і видалення з неї несуттєвих зв'язків між вершинами (аварійно-ремонтними зонами) і вершин (зон), що не впливають на функціональну надійність мережі щодо  $k$ -ї АРЗ.

Виконання даного етапу повинно здійснюватися фахівцями, які володіють основами теорії надійності. Цей етап важко піддається формалізації. Програмну реалізацію етапу треба робити в інтерактивному режимі. Будь-яке видалення елемента (зв'язку або вершини) повинно супроводжуватися підтвердженням фахівця (диспетчером, експертом або іншою компетентною особою).

При аналізі розрахункових моделей і видалення несуттєвих елементів з них рекомендується використовувати прийоми, що мали місце в гіпотетичному прикладі в п.3.4.

У результаті виконання даного етапу система розрахункових моделей (3.34) перетворюється в нову систему розрахункових моделей:

$$\begin{matrix} \mathbf{Z}_{f_1} [p, \delta_{\dot{a}}]; \\ \mathbf{Z}_{f_2} [p, \delta_{\dot{a}}]; \\ \dots \\ \mathbf{Z}_{f_z} [p, \delta_{\dot{a}}]; \end{matrix} \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{Z}'_{f_1} [p, \delta_{\dot{a}}]; \\ \mathbf{Z}'_{f_2} [p, \delta_{\dot{a}}]; \\ \dots \\ \mathbf{Z}'_{f_z} [p, \delta_{\dot{a}}], \end{cases} \quad (3.35)$$

де  $\mathbf{Z}'_{f_k} [p, \delta_{\dot{a}}] \subseteq \mathbf{Z}_{f_k} [p, \delta_{\dot{a}}]$ ,  $k = \overline{1, z}$ .

### 3.5.7. Розрахунок функціональної надійності мережі

Розрахунок функціональної надійності мережі стосовно АРЗ  $D_{Xk}^f$  ( $k = \overline{1, z}$ ) і функціональної надійності мережі стосовно споживачів  $k$ -ї зони  $P_{Zk}^f$  ( $k = \overline{1, z}$ ) є останнім етапом у методі розрахунку функціональної надійності [10].

Вихідними даними для виконання етапу є:

– зважені графи (розрахункові моделі надійності) без кінцевої вершини  $\mathbf{Z}'_{f_k} [p, \delta_{\dot{a}}] \setminus \mathbf{Z}_k$ ,  $k = \overline{1, z}$ ;

–  $p$  – вагова функція, яка кожній вершині графа  $\mathbf{Z}'_{f_k}$  ставить у відповідність значення технічної надійності  $k$ -ї зони  $P_{Zk}$ , отримане на 3-му етапі розрахунку;

–  $\delta_{\dot{a}}$  – вагова функція, яка кожній дузі графа  $\mathbf{Z}'_{f_k}$  ставить у відповідність значення технічної надійності  $i$ -ї заірної арматури  $k$ -ї зони  $\delta_{ki}$ ;

–  $z$  – кількість АРЗ у мережі;

–  $z_c$  – кількість зон, що стикаються з джерелом ЦП;

Функціональна надійність

$$- \left[ \left( \text{card} \bigcup_{i=1}^z \mathbf{W}_k \right) - \Delta a_k \right] - \text{кількість дуг у графі } \mathbf{Z}'_{fk} [p, \delta_a],$$

де  $\Delta a_k$  – кількість віддалених несуттєвих і спрощених дуг у графі  $\mathbf{Z}_{fk} [p, \delta_a]$ .

Розрахунок функціональної надійності мережі щодо  $k$ -ї зони АРЗ  $D_{Zk}^f$  для кожної розрахункової моделі  $\mathbf{Z}'_{fk} [p, \delta_a]$  проводять за методикою розрахунку надійності технічних систем із змішаним (послідовним і паралельним) з'єднанням елементів. Порядок розрахунку відображено на схемі алгоритму (рис. 3.9).

Згідно з алгоритмом розрахунок функціональної надійності за розрахунковими моделями є циклічним процесом заміни ділянок графа  $\mathbf{Z}'_{fk} [p, \delta_a] \setminus \mathbf{Z}_k$  з однотипним з'єднанням вершин одним елементом з еквівалентною надійністю, розрахованою за формулою (1.1) у випадку послідовного з'єднання або за формулою (1.2) у випадку паралельного з'єднання вершин.

Циклічний процес заміни продовжується доти, поки граф не буде містити тільки один елемент (вершину). Розрахована еквівалентна надійність цього елемента є шуканою функціональною надійністю мережі щодо  $k$ -ї зони

$$P_{Zk}^f = D_k^f, \quad k = \overline{z+1, z_c}. \quad (3.36)$$

Величина  $D_{Xk}^f$  показує, з якою ймовірністю трубопровідна мережа забезпечує надходження ЦП від джерела до  $k$ -ї АРЗ. З погляду споживачів, найбільш привабливими є зони зі значеннями  $D_{Xk}^f$ , близькими до одиниці. Тому при всіх рівних інших умовах АРЗ, що стикаються з джерелом ЦП, є найбільш надійними.

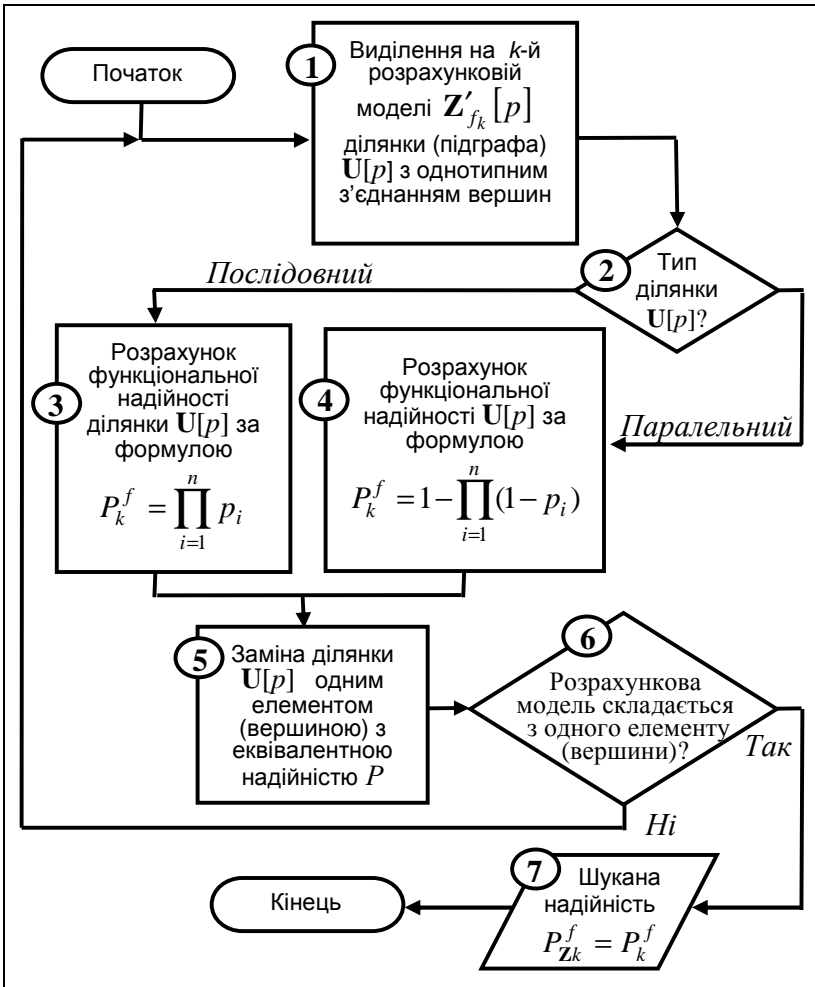


Рис. 3.9 – Схема алгоритму розрахунку надійності системи зі змішаним з'єднанням елементів

З урахуванням АРЗ, що мають стикування з джерелом ЦП, вираз (3.36) набуває вигляду

$$P_{Z_k}^f = \begin{cases} P_{Z_k} \cdot \prod_{i=1}^{aard W_k} \delta_{ki}, & k = \overline{1, z}; \\ D_k^f, & k = \overline{z+1, z_c}. \end{cases} \quad (3.37)$$

Вираз (3.37) є кінцевим шуканим результатом розробленого авторами методу розрахунку функціональної надійності ТТС.

Аналіз виразу (3.37) дозволяє зробити важливі висновки щодо проблеми підвищення функціональної надійності, а саме:

– функціональну надійність мережі стосовно споживачів аварійно-ремонтної зони, що стикається з джерелом ЦП, можна підвищити тільки за рахунок збільшення технічної надійності цієї зони, тобто за рахунок поділу зони на дві і більше зон (з меншою довжиною трубопроводів) шляхом введення нових суттєвих засувок;

– функціональну надійність мережі стосовно споживачів зони, що не стикається з джерелом ЦП, можна підвищити за рахунок збільшення технічної надійності цієї зони або за рахунок збільшення функціональної надійності мережі щодо цієї ж зони.

Другий висновок стосується загального випадку, тому підвищення надійності для зон, що не стикаються з джерелом цільового продукту, заслуговує особливої уваги.

Для зон, в які ЦП від джерела потрапляє, минаючи інші зони, підвищення надійності може бути досягнуто і за рахунок дроблення АРЗ, і за рахунок структурних змін мережі, а саме: кільцювання мережі, збільшення кількості альтернативних шляхів доставки ЦП від джерела в зону та ін.

*Зауваження.* Функціональна надійність мережі стосовно споживачів однієї і тієї ж зони, обчислена за формулою (3.37), враховує тільки властивості самої розподільної мережі. Для урахування впливу всіх елементів трубопровідної системи необхідно розрахункове значення функціональної надійності скоригувати, примноживши його на технічну надійність джерела ЦП.



## РОЗДІЛ 4

### **ФУНКЦІОНАЛЬНА НАДІЙНІСТЬ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ**

Запропонований у попередньому розділі метод розрахунку функціональної надійності для розподільних мереж у трубопровідних транспортних системах з повним правом може бути застосований для розрахунку функціональної надійності магістральних мереж. Однак різка відмінність у відстанях від джерела до споживача, що для магістральних систем більше на 2 – 3 порядки, вимагає додаткових досліджень. Цей розділ присвячений дослідженню проблеми функціональної надійності в протяжних магістральних мережах і порівняльному аналізу функціональної надійності таких мереж при різних конструктивних рішеннях.

#### **4.1. Особливості магістральних трубопровідних транспортних систем і способи підвищення їх функціональної надійності**

Трубопровідні транспортні системи у своєму складі можуть мати трубопроводи підвищеної довжини. У якості таких можуть виступати наступні ділянки напірних мереж:

- звичайний трубопровід до віддаленого споживача;
- колектори відведення, що поставляють відпрацьовану воду на віддалені заміські очисні споруди;
- водопроводи від забірних споруд до міської розподільної мережі;
- газопроводи від видобувних свердловин до газорозподільних пунктів;

Функціональна надійність

- повітроводи від компресорної станції до віддалених об'єктів споживання;
- практично всі трубопровідні ділянки магістральних транспортних систем.

Незалежно від того, який цільовий продукт (газ, вода, нафта, тепло, стиснуте повітря, сипучі матеріали і т.п.) транспортується системою, всі протяжні трубопровідні ділянки повинні мати підвищену надійність. Вихід з ладу такої ділянки в розподільних мережах приводить до того, що мережа перестає відповідати своєму призначенню і стає об'єктом підвищеної небезпеки, здатної викликати екологічну катастрофу. У магістральних мережах вихід з ладу такої ділянки збільшується ще й масштабами втрат і збитків.

Надалі всі ділянки підвищеної довжини розподільних і магістральних мереж будемо називати магістральними трубопроводами.

Магістральні трубопроводи потрапляють у суперечливу ситуацію. З одного боку, до них ставиться вимога підвищеної надійності внаслідок їх високої значущості для функціонування всієї системи і підвищеної небезпеки для навколишнього середовища. А з іншого боку, відповідно до виразу (2.20) магістральні трубопроводи приречені на низьку надійність через їх довжину: чим більше довжина трубопроводу, тим менше його надійність.

У зв'язку із суперечливістю ситуації виникає гостра необхідність у розробці методів підвищення функціональної надійності магістральних систем. Одним з очевидних методів підвищення функціональної надійності магістральних систем є дублювання трубопроводів, тобто спорудження двох паралельних ниток трубопроводів. Схема магістральної трубопровідної системи, що складається з двох паралельних трубопроводів, показана на рис. 4.1. Оскільки обидва трубопроводи за звичаєм споруджуються одночасно і мають однаковий матеріал, довжину і діаметр, то вони повинні мати і однакову технічну надійність. Оскільки в загальному випадку перелічені умови спорудження трубопроводів можуть бути порушені, то будемо вважати, що відповідні технічні надійності в загальному випадку можуть відрізнитися один від одного.

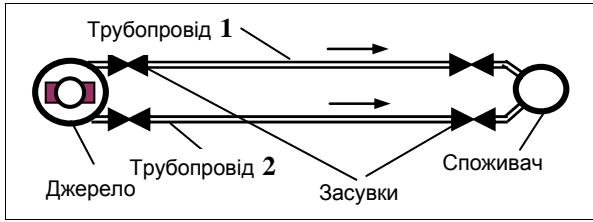


Рис. 4.1 – Схема дублювання магістрального трубопроводу

Коли покласти, що технічна надійність усіх засувок на схемі рис. 4.1 набагато вище технічної надійності трубопроводів, то розрахункова модель функціональної надійності, що відповідає такій ТТС, матиме вигляд, зображений на рис. 4.2. Тут  $\delta_1, \delta_2$  – технічні надійності 1-го і 2-го трубопроводів.

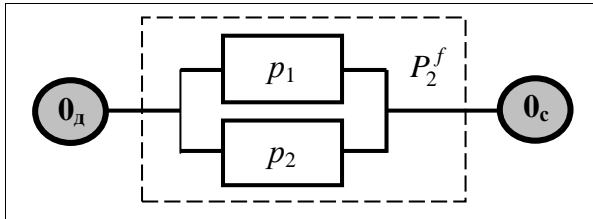


Рис. 4.2 – Розрахункова модель функціональної надійності мережі з двома паралельними трубопроводами

Функціональна надійність трубопровідної мережі з двох паралельних трубопроводів, відповідно до формули (1.2), визначається виразом

$$D_2^f = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - \delta_i) = 1 - (1 - \delta_1)(1 - \delta_2) . \quad (4.1)$$

Для трубопровідної мережі, що складається з трьох трубопроводів, ця надійність визначається виразом

Функціональна надійність

$$D_3^f = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - \delta_i) = 1 - (1 - \delta_1)(1 - \delta_2)(1 - \delta_3). \quad (4.2)$$

Табл.4.1 показує ефект підвищення функціональної надійності мережі за рахунок резервування трубопроводу при різних значеннях технічної надійності  $\delta_1$ . У таблиці величина  $k^f$  – коефіцієнт підвищення надійності показує, в скільки разів збільшується функціональна надійність за рахунок резервування трубопроводу. Дані в таблиці отримані в припущенні, що  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$ , тобто паралельні трубопроводи мають рівну довжину, діаметр, матеріал виготовлення і час введення в експлуатацію.

Таблиця 4.1 – Функціональна надійність у залежності від ступеня резервування

Технічна надійність трубопроводу $p_1$	Два паралельних трубопроводи		Три паралельних трубопроводи	
	$P_2^f = 1 - (1 - \delta)^2$	$k^f$	$P_3^f = 1 - (1 - p)^3$	$k^f$
0,01	0,0199	1,99	0,0297	2,97
0,1	0,19	1,9	0,271	2,71
0,3	0,51	1,7	0,657	2,19
0,5	0,75	1,5	0,875	1,75
0,7	0,91	1,3	0,973	1,39
0,9	0,99	1,1	0,999	1,11
0,99	0,9999	1,01	0,999999	1,0101

Згідно з табл. 4.1 функціональна надійність за рахунок дублювання трубопроводу може бути збільшена не більше ніж у 2 рази, за рахунок дворазового резервування (три нитки трубопроводів) – не більше ніж у 3 рази. При високій технічній надійності трубопро-

водів ( $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 \approx 1$ ) ефект підвищення функціональної надійності не спостерігається.

Подальше ефективне підвищення надійності паралельно прокладених трубопроводів досягається за допомогою спорудження перемичок між ними. Уведення коротких перемичок, що мають високу технічну надійність через їх малу довжину, дозволяє не тільки підвищити функціональну надійність, але й забезпечити умови для профілактичних і ремонтних робіт, не припиняючи при цьому транспортування ЦП споживачеві.

На рис. 4.3 схематично показана конструкція перемички. На рисунку перемичка розбиває два паралельних трубопроводи на чотири ділянки 1, 2, 3 і 4. Кожна ділянка може бути відсічена від магістральної мережі за допомогою пари засувок на кінцях відповідного трубопроводу. При цьому цільовий продукт продовжує поступати до споживача через інші працездатні ділянки. До того ж перемичка дозволяє проводити аварійно-профілактичні роботи на двох ділянках без припинення постачання ЦП споживачу. Так, 1-а або 2-а ділянки можуть бути одночасно відключені відповідно з 3-ю або 4-ю ділянкою.

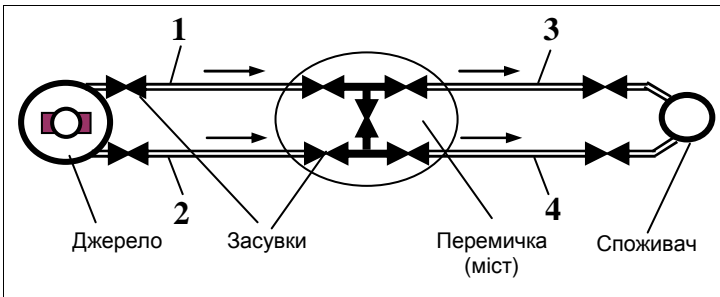


Рис. 4.3 – Конструкція перемички

Установка перемички приводить до мостової конструкції трубопроводів і сприяє підвищенню функціональної надійності магістральної мережі в цілому. Мостове з'єднання є ефективним способом підвищення надійності трубопровідних систем, оскільки

## Функціональна надійність

спорудження дешевої короткої перемички набагато краще, ніж будівництво додаткової третьої нитки трубопроводу.

На рис. 4.4 наведена розрахункова модель функціональної надійності мережі, що відповідає ТТС з однією перемичкою (мостом) за умови, що всі засувки і сама перемичка за певний період часу працюють безвідмовно. Тут  $p_{ij}$  – технічна надійність плеча моста (ділянки трубопроводу),  $i = \overline{1,2}$ ,  $j = \overline{1,2}$ .

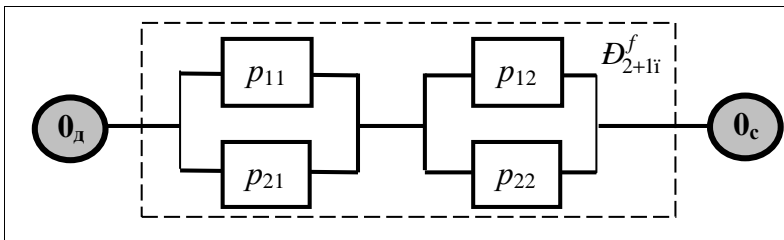


Рис. 4.4 – Розрахункова модель функціональної надійності мережі з мостовим з'єднанням трубопроводів

Функціональна надійність трубопровідної мережі з двох паралельних трубопроводів, розділених одною перемичкою, визначається виразом

$$P_{2+i}^f = [1 - (1 - p_{11})(1 - p_{21})][1 - (1 - p_{12})(1 - p_{22})]. \quad (4.3)$$

Вираз (4.3) є математичною моделлю функціональної надійності для системи трубопроводів з одним мостовим з'єднанням елементів при нерівноважних плечах моста і перемичкою з технічною надійністю, рівною одиниці.

Коли покласти, що всі плечі моста рівноважні, технічна надійність перемички дорівнює одиниці, а технічна надійність не розділеного перемичкою трубопроводу дорівнює  $\delta$ , то

$$P_{11} = P_{21} = P_{12} = P_{22} = 1 - \frac{1 - \delta}{2} = \frac{1 + \delta}{2}. \quad (4.4)$$

Рівність (4.4) випливає з твердження, що технічна ненадійність трубопроводів пропорційна їх довжинам. Оскільки кожне плече моста за довжиною в два рази менше, ніж довжина нерозділеного трубопроводу, то технічна ненадійність кожного плеча буде в два рази менше ненадійності цілого трубопроводу. Відповідно до залежності (2.30) ненадійність кожного плеча складе  $\left(\frac{1 - \delta}{2}\right)$ .

Отже технічна надійність як імовірність протилежної події складе  $\left(1 - \frac{1 - \delta}{2}\right)$ , або  $\left(\frac{1 + \delta}{2}\right)$ , що і зазначено в (4.4).

З урахуванням (4.4) вираз (4.3) набуває вигляду

$$D_{2+1i}^f = \left(\frac{3 + 2\delta - \delta^2}{4}\right)^2. \quad (4.5)$$

Цікавим є порівняльний аналіз функціональної надійності системи, що складається з двох паралельних трубопроводів з рівною технічною надійністю  $p$ , при двох варіантах зміни структури системи:

- перший варіант відповідає введенню третього паралельного трубопроводу;
- другий варіант відповідає установці однієї перемички між двома паралельними трубопроводами.

У табл.4.2 наведені дані для порівняння обох вказаних варіантів. При цьому в першому варіанті передбачається, що третій трубопровід має технічну надійність також рівну  $p$ . Функціональна надійність усієї магістральної мережі в цьому разі визначається виразом

$$D_3^f = 1 - (1 - \delta)^3 . \quad (4.6)$$

У другому варіанті передбачається, що перемичка симетрично розділяє два паралельних трубопроводи на чотири рівних за довжиною ділянки, тобто має місце рівноважне мостове з'єднання трубопроводів із технічною надійністю кожного плеча, обумовленою виразом (4.4). Крім того, передбачається, що надійність перемички  $\delta_1 = 1$ . Функціональна надійність такої магістральної мережі визначається за допомогою виразу (4.5)

Таблиця 4.2 – Порівняння двох варіантів структури системи

Техн. надійність трубопр. $p_1 = p_2 = p$	Три паралельні трубопроводи (1-й варіант)		Два паралельні трубопроводи с однією перемичкою (2-й варіант)	
	$P_3^f$	$k^f = \frac{P_3^f}{\delta}$	$P_{2+1i}^f$	$k^f = \frac{P_{2+1i}^f}{\delta}$
0,01	0,0297	2,97	0,5700	57,0
0,1	0,271	2,71	0,6360	6,36
0,3	0,657	2,19	0,7700	2,5667
0,5	0,875	1,75	0,8789	1,7578
0,7	0,973	1,39	0,9555	1,365
0,9	0,999	1,11	0,9950	1,1056
0,99	0,999999	1,0101	0,99995	1,0101

Як видно з табл. 4.2, установка перемички між двома паралельними трубопроводами набагато ефективніше спорудження третього паралельного трубопроводу в діапазоні малих значень технічної надійності  $p$  (від 0 до 0,5). У діапазоні значень  $p$  від 0,5 до 1 обидва варіанти зміни структури приводять приблизно до однакового підвищення функціональної надійності магістральної мережі. Оскільки витрати на спорудження перемички набагато менше спорудження третього паралельного трубопроводу, то 2-й варіант



зміни структури магістральної мережі, безумовно, набагато ефективніше за 1-й.

Якщо між двома паралельними трубопроводами з однаковою технічною надійністю, рівною  $p$ , установити дві безвідмовні перемички так, щоб трубопроводи розділилися на шість рівних за довжиною ділянок, то функціональна надійність такої магістральної мережі визначиться виразом

$$D_{2+2i}^f = \left( \frac{8 + 2\delta - \delta^2}{9} \right)^3. \quad (4.7)$$

Розрахункові значення функціональної надійності  $D_{2+2i}^f$ , що відповідають формулі (4.7), подані в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Функціональна надійність у залежності від кількості перемичок

Технічна надійність трубопроводів $p_1 = p_2 = p$	Два паралельні трубопроводи		Два паралельні трубопроводи з однією перемичкою		Два паралельні трубопроводи з двома перемичками	
	$P_2^f$	$k^f = \frac{P_2^f}{\delta}$	$P_{2+1i}^f$	$k^f = \frac{P_{2+1i}^f}{\delta}$	$P_{2+2i}^f$	$k^f = \frac{P_{2+2i}^f}{\delta}$
0,01	0,0199	1,99	0,5700	57,0	0,7076	70,75
0,1	0,19	1,9	0,6360	6,36	0,7536	7,536
0,3	0,51	1,7	0,7700	2,5667	0,8454	2,8180
0,5	0,75	1,5	0,8789	1,7578	0,9190	1,838
0,7	0,91	1,3	0,9555	1,365	0,9703	1,4001
0,9	0,99	1,1	0,9950	1,1056	0,9967	1,1074
0,99	0,9999	1,01	0,99995	1,0101	0,999967	1,0101

Аналіз табл. 4.3 показує:

Функціональна надійність

– введення однієї перемички доцільне при технічній надійності паралельних трубопроводів  $p \leq 0,9$ ;

– введення двох перемичок доцільне тільки при низкій технічній надійності паралельних трубопроводів, тобто при  $p \leq 0,5$ ;

– при високій початковій надійності трубопроводів ( $p \geq 0,99$ ) навіть спорудження другого паралельного трубопроводу не дає відчутного ефекту: коефіцієнт підсилення функціональної надійності в цьому випадку складає тільки 1,01.

У загальному випадку при кількості перемичок, рівній  $n$ , функціональна надійність двох паралельних трубопроводів визначається виразом

$$D_{2+n}^f = \left[ 1 - \left( \frac{1 - \delta}{n + 1} \right)^2 \right]^{n+1}. \quad (4.8)$$

Згідно з виразом (4.8) при кількості перемичок  $n \rightarrow \infty$  функціональна надійність системи двох паралельних трубопроводів  $D_{2+n}^f \rightarrow 1$ , тобто система стає безвідмовною.

При складанні табл.4.2 і 4.3 технічну надійність перемичок приймали рівною одиниці. Останні висновки щодо введення однієї або двох перемичок у магістральні мережі зроблені без урахування технічної надійності перемичок. Тому розрахункові значення функціональної надійності  $P_{2+1}^f$  і  $P_{2+2}^f$  в табл.4.2 і 4.3 треба розглядати як їх верхні оцінки.

## **4.2. Функціональна надійність магістральних трубопроводних транспортних систем з урахуванням надійності й місця розташування перемичок**

Для гарантованого транспорту ЦП за допомогою магістральної трубопроводної системи її функціональна надійність повинна бути не нижче припустимої. Якщо технічна надійність системи не дозволяє забезпечити належну функціональну надійність, необхідно

вжити заходи для її підвищення, що вимагає відповідних матеріальних, трудових і тимчасових витрат. Чим менше витрати, тим менше їх вартість і тим ефективніше досягнення заданої функціональної надійності. А чим вище функціональна надійність системи, тим краще вона відповідає своєму функціональному призначенню.

У зв'язку із суперечливістю двох критеріїв (функціональна надійність і вартісні витрати на її досягнення) точний розрахунок надійності є дуже важливим завданням, оскільки дозволяє оптимізувати витрати на досягнення заданої надійності.

З існуючих способів підвищення функціональної надійності найбільш ефективним є спорудження перемичок між двома паралельними трубопроводами. Даний спосіб щонайкраще задовольняє суперечливі вимоги надійності й економії, тобто забезпечує розумний компроміс між ними. Оскільки спорудження перемичок приводить до мостових з'єднань, то виникає необхідність у розробці точних математичних моделей для визначення функціональної надійності таких з'єднань.

Розв'язання проблеми точного розрахунку функціональної надійності приводить до вирішення багатьох прикладних завдань з експлуатації і проектування транспортних систем, зокрема, до такого важливого завдання, як порівняння з безвідмовності в роботі системи з різними варіантами структури.

Верхня оцінка функціональної надійності  $D_{2+1i}^f$  за формулою (4,5), (4,7), (4.8) була отримана при двох допущеннях:

- технічна надійність перемички  $\delta_i = 1$ ;
- два паралельних трубопроводи розбиваються перемичкою

на рівні ділянки з рівною технічною надійністю  $\left(\frac{1+\delta}{2}\right)$ , де  $p$  визначає технічну надійність кожного з двох паралельних трубопроводів до їх розбивки перемичкою.

Щоб одержати точне значення функціональної надійності, необхідно:

– по-перше, сформуванати математичну модель функціональної надійності з урахуванням технічної надійності моста  $\delta_1$ , коли остання менше одиниці;

– по-друге, довести, що тільки розбивка трубопроводів на рівні ділянки приводить до максимального підвищення функціональної надійності.

#### **4.2.1. Функціональна надійність двох паралельних трубопроводів з урахуванням надійності перемички**

Повернемося до конструкції перемички між двома паралельними трубопроводами (рис. 4.3). Спорудження перемички припускає використання п'ятьох засувок, що керують потоками ЦП у системі. Крім цих п'ятьох засувок, система ще має чотири засувки – по одній на кожній з чотирьох трубопровідних ділянок. Надійність усіх дев'яти згаданих засувок при одержанні формули (4.3) для визначення функціональної надійності була прийнята рівною одиниці. Таке допущення припустиме для оцінки функціональної надійності, оскільки засувки набагато надійніші, ніж трубопровідні ділянки. Однак для точного розрахунку функціональної надійності магістральних трубопровідних систем ігнорування надійністю засувок неприпустиме. Кожна додаткова перемичка добавляє в систему п'ять засувок.

Обчислимо надійність трубопровідної магістральної системи з двох паралельних трубопроводів і однією перемичкою за допомогою методу, викладеного в попередньому розділі.

Визначальний граф системи на рис. 4.3 відповідає графу, зображеному на рис. 4.5. На графі засувки  $\dot{a}_3 - \dot{a}_6$  належать перемичці, засувки  $\dot{a}_1 - \dot{a}_2$  розділяють джерело і систему, засувки  $\dot{a}_7 - \dot{a}_8$  розділяють систему і споживача, засувка  $\dot{a}_1$  з'єднує два паралельних трубопроводу (міст). Усі засувки є суттєвими. Ділянки  $t_1 \in t_3$  належать одному трубопроводові, ділянки  $t_2 \in t_4$  – іншому.

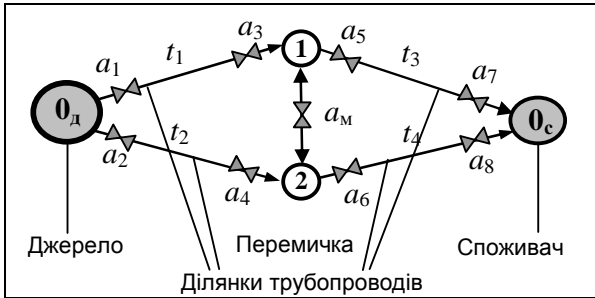


Рис. 4.5 – Визначальний граф магістральної системи з двох паралельних трубопроводів з однією перемичкою

Склад аварійно-ремонтних зон відображений у табл.4.4. Перемичка подана двома зонами: 5-ю і 6-ю. Оскільки труби перемички мають дуже малу довжину в порівнянні з довжиною трубопроводів, то зони 5 і 6 не мають трубопроводів, і, отже, технічна надійність цих АРЗ дорівнює одиниці.

Незважаючи на те, що 5-а і 6-а зони працюють безвідмовно, вилучати їх із графа АРЗ не можна, оскільки вони є елементами структури мережі й впливають на функціональну надійність системи.

Таблиця 4.4 – Склад аварійно-ремонтної зони

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопроводи	Відсікаючі засувки	Колодязі
1	$t_1$	$\dot{a}_1, \dot{a}_3$	–
2	$t_2$	$\dot{a}_2, \dot{a}_4$	–
3	$t_3$	$\dot{a}_5, \dot{a}_7$	–
4	$t_4$	$\dot{a}_6, \dot{a}_8$	–
5	–	$\dot{a}_3, \dot{a}_5, a_i$	1
6	–	$\dot{a}_4, \dot{a}_6, a_i$	2

## Функціональна надійність

На рис. 4.6 показаний граф аварійно-ремонтних зон для магістральної системи, що складається з двох паралельних трубопроводів з однією перемичкою.

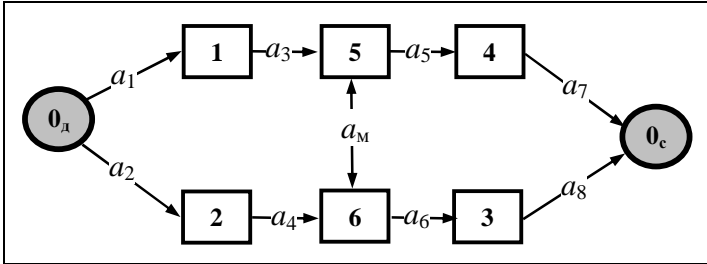


Рис. 4.6 – Граф аварійно-ремонтних зон

Побудова розрахункової моделі для функціональної надійності системи щодо зони  $0_n$  (єдиного споживача) має свої особливості. Якщо засувка  $\hat{a}_i$  виходить з ладу, то для її ремонту треба припинити доступ ЦП у зони 5 і 6. Але якщо ці зони відсікаються від магістральної мережі, то подача ЦП споживачеві також припиняється. Тому засувка  $\hat{a}_i$  й інша частина графа АРЗ створюють послідовну модель розрахунку функціональної надійності, що і показано на рис. 4.7. Аналогічна ситуація складається із засувками  $\hat{a}_1$  і  $\hat{a}_2$ : для їхнього ремонту необхідно відключити джерело від мережі.

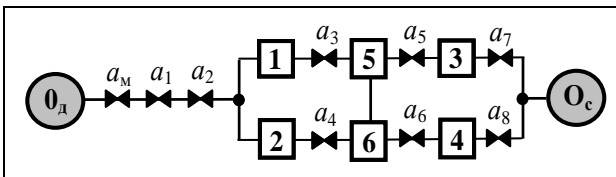


Рис. 4.7 – Розрахункова модель функціональної надійності мережі

Технічна надійність 5-ї і 6-ї зон дорівнює одиниці, тому розрахункова модель системи може бути спрощена за рахунок вилучення цих зон з моделі (рис. 4.8).

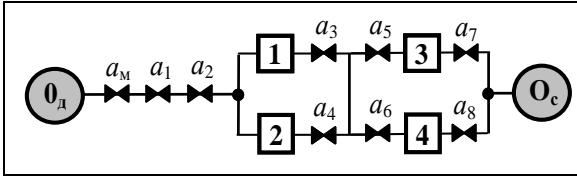


Рис. 4.8 – Спрощена розрахункова модель функціональної надійності мережі

Відповідно до спрощеної розрахункової схеми, функціональна надійність трубопровідної мережі з двох паралельних трубопроводів, розділених однією перемичкою, визначиться виразом

$$P_{2+1\ddot{u}}^f = p_{\dot{a}_1} p_{\dot{a}_1} p_{\dot{a}_2} \left[ 1 - (1 - D_{Z_1} p_{\dot{a}_3}) (1 - D_{Z_2} p_{\dot{a}_4}) \right] \cdot \left[ 1 - (1 - p_{\dot{a}_5} D_{Z_3} p_{\dot{a}_7}) (1 - p_{\dot{a}_6} D_{Z_4} p_{\dot{a}_8}) \right]. \quad (4.9)$$

Вираз (4.9) є математичною моделлю функціональної надійності для системи з двох паралельних трубопроводів з одним мостовим з'єднанням елементів при нерівноважних плечах моста й однією перемичкою з технічною надійністю, рівною одиниці.

У разі мостового з'єднання з рівноважними плечами  $P_{Z_1} = P_{Z_2} = P_{Z_3} = P_{Z_4} = \frac{1 + \check{\delta}}{2}$ , де  $p$  – технічна надійність одного з двох паралельних трубопроводів до установки перемички, і запірної арматури з однаковою технічною надійністю  $p_{\dot{a}_i} = \check{\delta}_i = p_a$  ( $i = \overline{1,9}$ ), вираз (4.3) набуває вигляду

Функціональна надійність

$$P_{2+i}^f = p_{\dot{a}}^3 \left[ 1 - \left( 1 - p_{\dot{a}} \cdot \frac{1 + \delta}{2} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - p_{\dot{a}}^2 \cdot \frac{1 + \delta}{2} \right)^2 \right]. \quad (4.10)$$

При установці двох перемичок з рівною технічною надійністю розрахункова модель відповідає моделі, що показана на рис. 4.9.

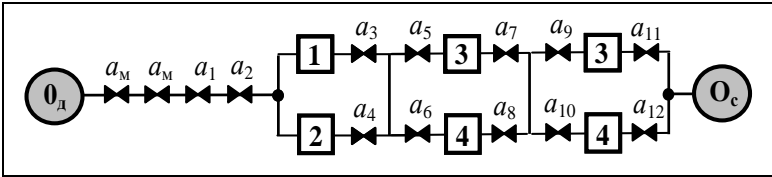


Рис. 4.9 – Спрощена розрахункова модель функціональної надійності мережі з двома перемичками

Для магістральної системи трубопроводів з двома перемичками вираз (4.10) набуває вигляду

$$P_{2+2i}^f = p_{\dot{a}}^4 \left[ 1 - \left( 1 - p_{\dot{a}} \cdot \frac{2 + \delta}{3} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - p_{\dot{a}}^2 \cdot \frac{2 + \delta}{3} \right)^2 \right]^2. \quad (4.11)$$

Узагальнення (4.10) на випадок  $n$  перемичок з однаковими технічними характеристиками приводить до виразу

$$P_{2+i}^f = p_{\dot{a}}^{i+2} \left[ 1 - \left( 1 - p_{\dot{a}} \cdot \frac{i + \delta}{i + 1} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - p_{\dot{a}}^2 \cdot \frac{i + \delta}{i + 1} \right)^2 \right]^i. \quad (4.12)$$

Останній вираз є математичною моделлю функціональної надійності магістральної системи трубопроводів для довільного числа перемичок і може виступати як критерій функціональної надій-



ності при розв'язанні різних екстремальних задач, пов'язаних із симетричним розташуванням перемичок.

#### 4.2.2. Оптимальне розташування перемичок у магістральних трубопроводах

Математичні моделі (4.10) – (4.12) функціональної надійності отримані при рівноважних плечах мостового з'єднання, що утворюються за рахунок симетричної установки перемички між двома паралельними трубопроводами. Правомірність симетричного розташування перемички для одержання максимальної вигоди від її установки треба довести.

Нехай система двох паралельних трубопроводів буде асиметрична стосовно установки перемички (рис. 4.10). При цьому довжина трубопроводу від джерела ЦП до споживача складає  $L$  км, а до перемички –  $l$  км.

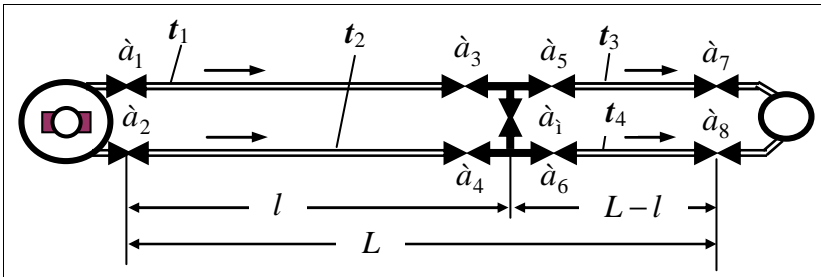


Рис. 4.10 – Асиметрична установка перемички

При асиметричній установці перемички технічна надійність кожної ділянки трубопроводу  $t_1$  і  $t_2$  складе  $\left(1 - \frac{(1-p)l}{L}\right)$ , а кожної ділянки  $t_3$  і  $t_4$  –  $\left(1 - \frac{(1-p)(L-l)}{L}\right)$ . Тоді, якщо прийняти техніч-

Функціональна надійність

ну надійність для всіх перемичок  $p_{\dot{a}_i} = p_i = 1$  ( $i = \overline{1,8}$ ), то функціональна надійність системи за формулою (4.9) буде визначатися виразом

$$P_{2+\dot{1}\dot{1}}^f = \left[ 1 - \left( 1 - \left( 1 - \frac{(1-\delta)l}{L} \right) \right)^2 \right] \times \\ \times \left[ 1 - \left( 1 - \left( 1 - \frac{(1-\delta)(L-l)}{L} \right) \right)^2 \right]. \quad (4.13)$$

Введемо в (4.13) заміни  $x = \frac{l}{L}$ ,  $(1-x) = \frac{L-l}{L}$  і спростимо отриманий вираз:

$$P_{2+\dot{1}\dot{1}}^f = \left[ 1 - (1 - (1 - (1 - \delta)x))^2 \right] \cdot \left[ 1 - (1 - (1 - (1 - \delta)(1-x)))^2 \right] = \\ = \left[ 1 - (1 - \delta)^2 x^2 \right] \cdot \left[ 1 - (1 - \delta)^2 (1-x)^2 \right] = \\ = (1 - \delta)^4 \left[ \frac{1}{(1 - \delta)^2} - x^2 \right] \cdot \left[ \frac{1}{(1 - \delta)^2} - (1-x)^2 \right]. \quad (4.14)$$

У (4.14) невідома величина  $\delta$  може знаходитися тільки в діапазоні від 0 до 1, оскільки довжина  $l$  може приймати значення від 0 до  $L$ . Для визначення оптимального розташування перемички досить знайти значення  $x^*$ , що доставляє максимум функції (4.14).

Таким чином, визначення оптимального розташування перемички зводиться до задачі одновірної умовної мінімізації цільової функції (4.14) при двосторонній обмеженості змінної  $x$

$$P_{2+li}^f = (1 - \delta)^4 \left[ \frac{1}{(1 - \delta)^2} - x^2 \right] \cdot \left[ \frac{1}{(1 - \delta)^2} - (1 - x)^2 \right] \rightarrow \max_{0 \leq \delta \leq 1} . \quad (4.15)$$

Для унімодальних цільових функцій розв'язання задачі такого класу можна здійснити за допомогою поширених прямих методів одновірної мінімізації, таких як метод дихотомії, метод Фібоначчі, метод золотого перетину. При цьому в якості визначального інтервалу невизначеності треба взяти  $\Delta \delta = [0; 1]$ . Але для використання перелічених методів необхідно попередньо довести унімодальність цільової функції в задачі (4.15), тому краще скористатися класичними методами математичного аналізу для дослідження нелінійних одновірних функцій.

Визначимо стаціонарні точки цільової функції в (4.15), для чого знайдемо похідну функції і прирівняємо її нулю:

$$\frac{dP_{2+li}^f}{dx} = (1 - \delta)^4 \left\{ 2(1 - x) \left[ \frac{1}{(1 - \delta)^2} - x^2 \right] - 2 \left[ \frac{1}{(1 - \delta)^2} - (1 - x)^2 \right] \right\} = 0 . \quad (4.16)$$

Розв'язання рівняння (4.16) дає три корені: один дійсний  $\tilde{\delta}_1 = \frac{1}{2}$  і два мнимих  $\tilde{\delta}_{2,3} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{(1 - \delta)^2}}$ . Отже функція

Функціональна надійність

$P_{2+i}^f$  має тільки одну стаціонарну точку, що потрапляє в діапазон припустимих рішень (від 0 до 1).

Обчислимо в стаціонарній точці  $\tilde{\delta}_1 = \frac{1}{2}$  другу похідну цільової функції:

$$\left. \frac{d^2 P_{2+i}^f}{dx^2} \right|_{\tilde{\delta}=\frac{1}{2}} = 1 - \frac{2}{(1-\tilde{\delta})^2} - 6(1-\tilde{\delta})\tilde{\delta} = -\left( \frac{2}{(1-\tilde{\delta})^2} + \frac{1}{2} \right). \quad (4.17)$$

Оскільки цільова функція в точці  $\tilde{\delta}_1 = \frac{1}{2}$  негативна, то функція в даній точці має явний максимум. Отже оптимальним вирішенням задачі (4.15) є  $\tilde{\delta}^* = \frac{1}{2}$ .

Розв'язання екстремальної задачі (4.15) означає, що перемичка, яка розділяє кожний з двох паралельних трубопроводів на дві строго рівних між собою ділянки, забезпечує найбільший приріст функціональної надійності всієї магістральної системи.

У випадку, коли між двома паралельними трубопроводами встановлюється  $n$  перемичок з безвідмовними засувками, то для найбільшого приросту функціональної надійності системи кожний трубопровід повинен бути розділений перемичками на  $(n+1)$  рівних частин. Це твердження впливає з розв'язання задачі математичного програмування при лінійних обмеженнях:

$$P_{2+i}^f = p_{\tilde{\delta}}^{n+2} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - p_{\tilde{\delta}} \left[ 1 - (1-\tilde{\delta})x_1 \right] \right)^2 \right] \cdot \prod_{i=2}^{n+1} \left[ 1 - \left( 1 - p_{\tilde{\delta}}^2 \left[ 1 - (1-\tilde{\delta})x_i \right] \right)^2 \right] \rightarrow \max_{x_i \in \Omega \subset \mathbf{E}^{n+1}}, \quad (4.18)$$

$$\Omega: f(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}) = \sum_{i=1}^{n+1} x_i - 1 = 0; \quad (4.19)$$

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad i = \overline{1, n+1}. \quad (4.20)$$

Тут  $x_i = \frac{l_i}{L}$ , де  $l_i$  – довжина  $i$ -ї частини кожного трубопроводу,

$L = \sum_{i=1}^{n+1} l_i$  – довжина кожного з двох паралельних трубопроводів;

$p_{\dot{a}}$  – технічна надійність кожної засувки.

Задача математичного програмування у загальному випадку вирішуються тільки прямими методами оптимізації. Щоб уникнути використання прямих методів, на початковому етапі розв'язання проігноруємо обмеження (4.20). У цьому разі задача (4.18) – (4.20) перетвориться в задачу оптимізації (4.18) – (4.19) при обмеженні у вигляді рівності, яку тепер можна розв'язати за класичним методом, наприклад, за методом невизначених множників Лагранжа.

Побудуємо функцію Лагранжа в умовах задачі (4.18) – (4.19):

$$\begin{aligned} L(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}, \lambda) &= P_{2+m}^f - \lambda [f(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})] = \\ &= p_{\dot{a}}^{n+2} \cdot \left[ 1 - (1 - p_{\dot{a}} [1 - (1 - \delta)x_1])^2 \right] \times \\ &\times \prod_{i=2}^{n+1} \left[ 1 - (1 - p_{\dot{a}}^2 [1 - (1 - \delta)x_i])^2 \right] - \lambda \left( \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 \right), \quad (4.21) \end{aligned}$$

де  $\lambda$  – невизначений множник Лагранжа.

Функціональна надійність

Для пошуку стаціонарних точок функції Лагранжа треба вирішити систему з  $(n + 2)$  рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial x_1} = -2p_{\dot{a}}^{n+3}(1-\delta)\left(1-p_{\dot{a}}\left[1-(1-\delta)x_1\right]\right) \times \\ \quad \times \left\{ \prod_{i=2}^{n+1} \left[ 1 - \left( 1 - p_{\dot{a}}^2 \left[ 1 - (1-\delta)x_i \right] \right)^2 \right] \right\} - \lambda = 0; \\ \\ \frac{\partial L}{\partial x_k} \Big|_{k=2, n+1} = -2p_{\dot{a}}^{n+4}(1-\delta)\left(1-p_{\dot{a}}^2\left[1-(1-\delta)x_k\right]\right) \times \\ \quad \times \left[ 1 - \left( 1 - p_{\dot{a}} \left[ 1 - (1-\delta)x_1 \right] \right)^2 \right] \times \\ \quad \times \left\{ \prod_{\substack{i=2 \\ i \neq k}}^{n+1} \left[ 1 - \left( 1 - p_{\dot{a}}^2 \left[ 1 - (1-\delta)x_k \right] \right)^2 \right] \right\} - \lambda = 0; \\ \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0. \end{array} \right.$$

Усі рівняння системи, крім останнього, містять оператори множення  $\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n+1} (\cdot)$ , які відрізняються один від одного тільки параметрами

індексу. Щоб вирівняти параметри всіх операторів  $\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n+1} (\cdot)$ , кож-

не  $k$ -е рівняння помножимо і розділимо на величину

$\left[1 - \left(1 - p_{\dot{a}}^2 [1 - (1 - \delta)x_k]\right)^2\right]$ ,  $k = \overline{2, (n+1)}$ . Крім того, перше рівняння помножимо і розділимо на величину  $p_a \left[1 - \left(1 - p_{\dot{a}} [1 - (1 - \delta)x_1]\right)^2\right]$ . Після нескладних додаткових алгебраїчних перетворень одержимо нову систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2p_{\dot{a}}^{n+4} (1 - \delta) (1 - p_{\dot{a}} [1 - (1 - \delta)x_1]) \cdot \left[1 - \left(1 - p_{\dot{a}} [1 - (1 - \delta)x_1]\right)^2\right]}{p_a \left[1 - \left(1 - p_{\dot{a}} [1 - (1 - \delta)x_1]\right)^2\right]} \times \\ \quad \times \prod_{i=2}^{n+1} \left[1 - \left(1 - p_{\dot{a}}^2 [1 - (1 - \delta)x_i]\right)^2\right] = -\lambda; \\ \frac{2p_{\dot{a}}^{n+4} (1 - \delta) (1 - p_{\dot{a}}^2 [1 - (1 - \delta)x_k]) \cdot \left[1 - \left(1 - p_{\dot{a}} [1 - (1 - \delta)x_1]\right)^2\right]}{1 - \left(1 - p_{\dot{a}}^2 [1 - (1 - \delta)x_k]\right)^2} \\ \quad \times \prod_{i=2}^{n+1} \left[1 - \left(1 - p_{\dot{a}}^2 [1 - (1 - \delta)x_i]\right)^2\right] = -\lambda, \quad k = \overline{1, n+1}; \\ \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0, \end{array} \right.$$

де  $1 - \left(1 - p_{\dot{a}} [1 - (1 - \delta)x_k]\right)^2 \neq 0$ ,  $1 - \left(1 - p_{\dot{a}}^2 [1 - (1 - \delta)x_k]\right)^2 \neq 0$ ,  
або  $x_k \neq \frac{1}{1 - \delta}$ ,  $k = \overline{1, n+1}$ .

Зведемо в праві частини перших  $(n+1)$  рівнянь однакові вирази-множники:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial_a \left( 1 - p_a [1 - (1 - \delta)x_1] \right)}{1 - \left( 1 - p_a [1 - (1 - \delta)x_1] \right)^2} = \\ & = \frac{-\lambda}{2p_a^{n+4} (1 - \delta) \left[ 1 - \left( 1 - p_a [1 - (1 - \delta)x_1] \right)^2 \right] \prod_{i=2}^{n+1} \left[ 1 - \left( 1 - p_a^2 [1 - (1 - \delta)x_i] \right)^2 \right]}; \\ & \left. \frac{2p_a^{n+4} (1 - \delta) \left( 1 - p_a^2 [1 - (1 - \delta)x_k] \right)}{1 - \left( 1 - p_a^2 [1 - (1 - \delta)x_k] \right)^2} \right|_{k=\overline{2, n+1}} = \\ & = \frac{-\lambda}{2p_a^{n+4} (1 - \delta) \left[ 1 - \left( 1 - p_a [1 - (1 - \delta)x_1] \right)^2 \right] \prod_{i=2}^{n+1} \left[ 1 - \left( 1 - p_a^2 [1 - (1 - \delta)x_i] \right)^2 \right]}; \\ & \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0. \end{aligned} \right.$$

Оскільки в перших  $(n + 1)$  рівняннях усі праві частини рівні, то рівні і їх ліві частини:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{1 - p_a [1 - (1 - \delta)x_1]}{\partial_a \left[ 1 - \left( 1 - p_a [1 - (1 - \delta)x_k] \right)^2 \right]} = \frac{1 - p_a^2 [1 - (1 - \delta)x_2]}{1 - \left( 1 - p_a^2 [1 - (1 - \delta)x_2] \right)^2}; \\ & \frac{1 - p_a^2 [1 - (1 - \delta)x_k]}{1 - \left( 1 - p_a^2 [1 - (1 - \delta)x_k] \right)^2} = \frac{1 - p_a^2 [1 - (1 - \delta)x_{k+1}]}{1 - \left( 1 - p_a^2 [1 - (1 - \delta)x_{k+1}] \right)^2}, \quad k = \overline{1, n}; \\ & \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0, \end{aligned} \right.$$



або

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\sigma}_1 \begin{cases} = \tilde{\sigma}_k & \text{їдè } \tilde{\sigma}_a = 1, \\ < \tilde{\sigma}_k & \text{їдè } \tilde{\sigma}_a < 1, \end{cases} & k = \overline{2, n+1}; \\ \tilde{\sigma}_k = \tilde{\sigma}_{k+1}, & k = \overline{2, n}; \\ \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0. \end{array} \right.$$

З отриманої системи випливає, що при  $\tilde{\sigma}_a = 1$  (засувки безвідмовні)

$$\tilde{\sigma}_1 = \tilde{\sigma}_2 = \dots = \tilde{\sigma}_{n+1} = \frac{1}{n+1}. \quad (4.22)$$

Оскільки всі координати стаціонарної точки задовольняють обмеженню (4.20), то вона одночасно є стаціонарною точкою як для задачі (4.18) – (4.19), так і (4.18) – (4.20).

Для визначення характеру стаціонарної точки обчислимо матрицю Гесса цільової функції в задачі (4.18) в цій ж точці. Для цього спочатку визначимо всі другі й змішані частинні похідні цільової функції за умови  $\tilde{\sigma}_a = 1$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 P_{2+m}}{\partial x_k^2} = -2(1-p)^4 \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k, j}}^{n+1} [1 - (1 - [1 - (1 - \delta)x_i])^2], & k = \overline{1, n+1}; \\ \frac{\partial^2 P_{2+m}}{\partial x_k \partial x_j} = 4(1-p)^2 (1 - [1 - (1 - \delta)x_k]) (1 - [1 - (1 - \delta)x_j]) \times \\ \quad \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k, j}}^{n+1} [1 - (1 - [1 - (1 - \delta)x_i])^2], & k, j = \overline{1, n+1}. \end{array} \right.$$

Функціональна надійність

Обчислимо всі другі частинні й змішані похідні цільової функції у стаціонарній точці з координатами  $\tilde{\delta}_1 = \tilde{\delta}_2 = \dots = \tilde{\delta}_{n+1} = \frac{1}{n+1}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 P_{2+n\tilde{i}}}{\partial x_k^2} = -2(1-p)^2 \left( 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1-\tilde{\delta}}{n+1} \right) \right]^2 \right)^n, k = \overline{1, n+1}; \\ \frac{\partial^2 P_{2+n\tilde{i}}}{\partial x_k \partial x_j} = 4(1-p)^2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1-\tilde{\delta}}{n+1} \right) \right]^2 \times \\ \quad \times \left( 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1-\tilde{\delta}}{n+1} \right) \right]^2 \right)^{n-1}, k, j = \overline{1, n+1}. \end{array} \right.$$

Порівняємо за модулем значення других частинних і змішаних похідних:

$$\frac{\left| \frac{\partial^2 P_{2+n\tilde{i}}}{\partial x_k^2} \right|}{\frac{\partial^2 P_{2+n\tilde{i}}}{\partial x_k \partial x_j}} = \frac{1 - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1-\tilde{\delta}}{n+1} \right) \right]^2}{2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1-\tilde{\delta}}{n+1} \right) \right]^2} = \frac{\tilde{i}^2 + \tilde{i} + 2\tilde{\delta} - \tilde{\delta}^2}{2(1-\tilde{\delta})^2}. \quad (4.23)$$

Чисельник у (4.23)  $(\tilde{i}^2 + \tilde{i} + 2\tilde{\delta} - \tilde{\delta}^2) > 3$ , а знаменник  $2(1-\tilde{\delta})^2 < 2$ . Отже всі другі частинні похідні функції (4.18) за умови  $\tilde{\delta}_a = 1$ , взяті за модулем, перевищують змішані похідні. У такому випадку характер матриці Гесса для функції (4.18) збігається з характером матриці

$$\hat{\mathbf{I}}_{\hat{\text{dof}}} = \begin{bmatrix} -1 & \tilde{n} & \cdots & \tilde{n} \\ \tilde{n} & -1 & \cdots & \tilde{n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{n} & \tilde{n} & \cdots & -1 \end{bmatrix},$$

де  $\tilde{n}$  – позитивна константа, що не перевершує одиниці.

Аналіз матриці  $\hat{\mathbf{I}}_{\hat{\text{dof}}}$  показує, що всі її непарні головні визначники менше нуля, а всі парні – більше. Отже досліджувана стаціонарна точка є точкою умовного максимуму. Вирішення задачі

$$(4.18) - (4.20) \quad \tilde{\sigma}_1^* = \tilde{\sigma}_2^* = \cdots \tilde{\sigma}_{n+1}^* = \frac{1}{n+1}$$

з урахуванням умови

(4.23) свідчить про справедливість твердження, що найбільший приріст функціональної надійності системи досягається при симетричній установці перемичок, тобто у випадку, коли  $n$  перемичок розділяють кожний з двох паралельних трубопроводів на  $(n+1)$  рівну частину. Однак при надмірному збільшенні числа перемичок  $n$  при незмінних значеннях  $\check{\sigma}_a$  і  $\check{\sigma}$  додавання нових перемичок може призвести до зворотного ефекту. Кожна додаткова перемичка вимагає установки п'ятьох засувок, що хоча і незначно, але негативно впливає на функціональну надійність системи. При цьому позитивний вплив кожної нової перемички на функціональну надійність поступово знижується. Тому при збільшенні числа перемичок  $n$  обов'язково наступить такий момент, коли функціональна надійність буде не збільшуватися, а зменшуватися!

### 4.3. Метод розрахунку функціональної надійності в порівняльному аналізі конструкцій магістральних трубопроводів

Розглянутий у розділі 3 метод розрахунку функціональної надійності трубопровідних транспортних систем дозволяє проводити

аналіз на надійність трубопровідних мережних структур і конструкцій перемичок у магістральних трубопроводах.

Як приклад проведемо порівняльний аналіз протяжної магістральної мережі з використанням перемичок трьох типів:

- с чотирма засувками (рис. 4.11, а);
- с п'ятьма засувками (рис. 4.11, б);
- с шістьма засувками (рис. 4.11, в).

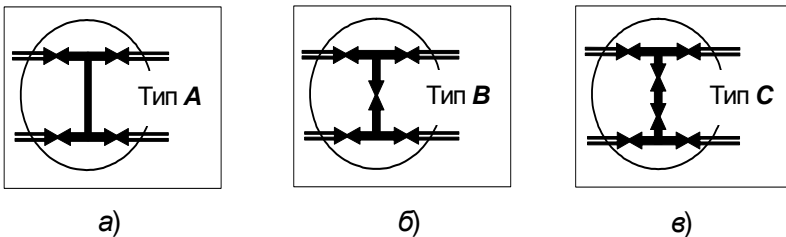


Рис. 4.11 – Типи перемичок

#### 4.3.1. Розрахунок функціональної надійності магістральної мережі з перемичками А-типу

Нехай конструкція магістральної трубопровідної системи припускає використання перемичок А-типу. Тоді структурі магістральної системи з довільним числом перемичок буде відповідати схема, що зображена на рис. 4.12.

Конструкція має наступні особливості:

– два ідентичних паралельних трубопроводи характеризуються однаковими технічними й експлуатаційними показниками, а саме: довжиною кожного трубопроводу  $L$ , матеріалом виготовлення, товщиною стінок, термінами та умовами експлуатації;

– паралельні трубопроводи з'єднані  $i$  перемичками А-типу, що поділяють магістральну мережу на рівні по довжині ділянки в кількості  $i + 1$ ;

– усі засувки характеризуються також однаковими технічними та експлуатаційними параметрами;

– кожна ділянка трубопроводу  $t_i$ ,  $i \in \{1, \overline{(2n+2)}\}$ , має технічну надійність  $p_6$ ;

– кожна засувка мережі  $\dot{a}_j$ ,  $j \in \{1, \overline{(4n+4)}\}$ , має технічну надійність  $\delta_{\dot{a}}$ .

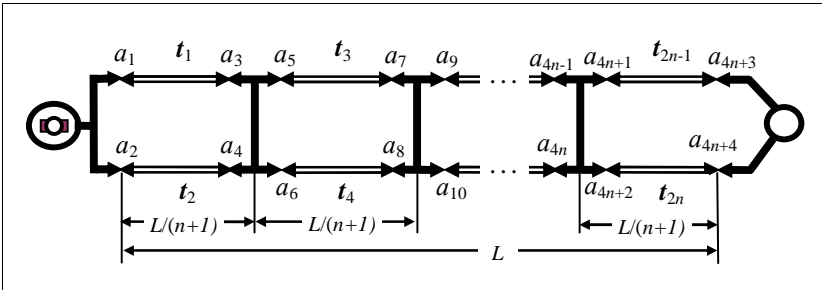


Рис. 4.12 – Схема магістральної трубопровідної системи з довільним числом перемичок А-типу

Розрахуємо за відомими показниками технічної надійності окремих елементів мережі функціональну надійність усієї мережі методом, викладеним у розділі 3.

Граф аварійно-ремонтних зон для розглянутої магістральної трубопровідної системи з довільним числом перемичок А-типу зображений на рис. 4.13. Вершина графа  $0_d$  відповідає джерелу ЦП; вершина  $0_c$  – споживачу ЦП; вершини  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$  – протяжним трубопроводам  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ ; вершини  $z_1, z_2, \dots, z_n$  – трубопровідним ділянкам, що належать перемичкам; вершини  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  – трубопровідним ділянкам, що з'єднують джерело

або споживача з трубопровідною мережею; ребра графа – запірній арматурі з однойменним позначенням.

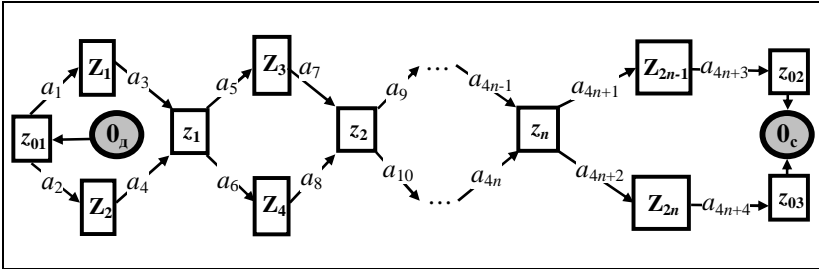


Рис.4.13 – Граф аварійно-ремонтних зон магістральної трубопровідної системи з довільним числом перемичок типу А

Довжина трубопровідних ділянок у зонах  $z_1, z_2, \dots, z_n$  і  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  набагато менша довжини кожної з ділянок  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ , що знаходяться в зонах  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$ . Тому можна вважати, що ймовірності безвідмовної роботи кожною з зон  $z_1, z_2, \dots, z_n$  і  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  дорівнює одиниці. У цьому випадку дані зони ніяким чином не впливають на функціональну надійність трубопровідної мережі. З цієї причини на рис. 4.14 у розрахунковій моделі ймовірності постачання ЦП споживачеві технічні надійності, що відповідають ділянкам  $z_1, z_2, \dots, z_n$  і  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$ , відсутні.

Розрахункова модель функціональної надійності трубопровідної мережі (рис. 4.14) є змішаної (послідовно-паралельною моделлю надійності). Кожний конструктивний елемент мережі в моделі поданий блоком із указівкою технічної надійності (усередині блока) і позначенням цього елемента (над блоком).

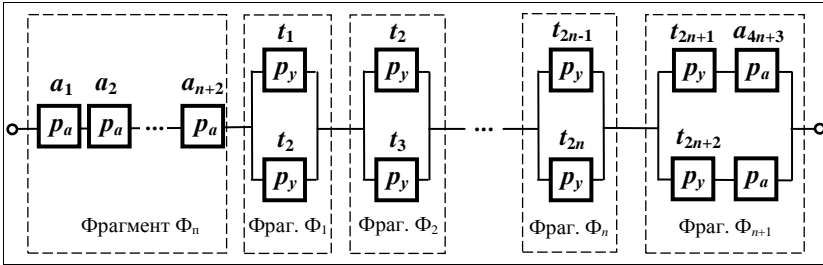


Рис. 4.14 – Розрахункова модель функціональної надійності трубопроводної системи з довільним числом перемичок

Формування розрахункової моделі ґрунтується на структурі графа аварійно-ремонтних зон (рис. 4.13) і аналізі впливи виходу з ладу різних конструктивних елементів мережі на постачання цільового продукту споживачеві. Так, вихід із ладу будь-якої із засувок  $\dot{a}_1, \dot{a}_2, \dots, \dot{a}_{4n+2}$  призводить до припинення подачі ЦП споживачеві на час усунення несправності в запірній арматурі. Тільки за умови одночасної безвідмовної роботи цих засувок споживач має можливість одержувати ЦП. Тому засувкам  $\dot{a}_1, \dot{a}_2, \dots, \dot{a}_{4n+2}$  у розрахунковій моделі відповідає послідовна модель надійності (фрагмент моделі  $\Phi_n$ ), а еквівалентна ймовірність транспорту ЦП через ці засувки складає

$$D_{\dot{a}_i}^{f\dot{A}} = \delta_{\dot{a}}^{4n+2} . \quad (4.24)$$

Тут верхній індекс  $f\dot{A}$  позначає функціональну надійність фрагмента мережі з перемичками А-типу.

Уся розрахункова схема мережі є послідовною моделлю надійності, що складається з фрагмента  $\Phi_n$  і фрагментів  $\Phi_k$ ,  $k \in \{1, \overline{(n+1)}\}$ . Кожному фрагменту відповідає частина мережі, до якої входять дві паралельні ділянки  $t_{2k-1}$  і  $t_{2k}$ ,  $k \in \{1, \overline{(n+1)}\}$ . Вихід із ладу частини мережі, що відповідає фрагменту  $\Phi_k$  або

Функціональна надійність

фрагменту  $\Phi_n$ , призводить до припинення подачі ЦП споживачеві. Тому усі фрагменти утворюють послідовну модель надійності, тобто шукана функціональна надійність мережі визначається виразом

$$D^{f\hat{A}} = D_{\hat{O}_i}^{f\hat{A}} \prod_{k=1}^{n+1} D_{\hat{O}_k}^{f\hat{A}}, \quad (4.25)$$

де  $D_{\hat{O}_k}^{f\hat{A}}$  – функціональна надійність  $k$ -ї частини мережі, що складається з паралельних ділянок  $t_{2k-1}$  і  $t_{2k}$ .

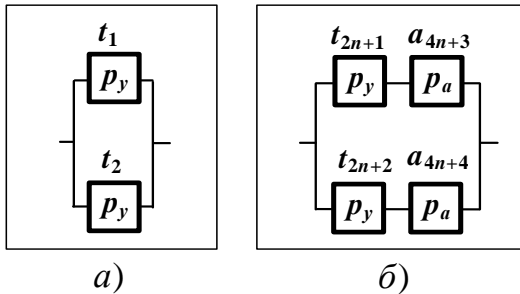


Рис. 4.15. Фрагменти моделі надійності магістральної трубопровідної мережі з перемичками А-типу

Фрагменту  $\Phi_{n+1}$  розрахункової схеми відповідає паралельна модель двох послідовних ланцюжків (рис. 4.15,б). Один ланцюжок визначає надійність ділянки мережі з трубопроводом  $t_{2n+1}$  і засувкою  $\hat{a}_{4n+3}$ , а інший – надійність мережі з трубопроводом  $t_{2n+2}$  і засувкою  $\hat{a}_{4n+4}$ . ЦП буде надходити споживачеві, якщо хоча б один з ланцюжків знаходиться в справному стані. Тому ланцюжки утворюють паралельну модель надійності, згідно з якої надійність фрагмента  $\Phi_{n+1}$  визначається виразом



$$D_{O_0}^{f\dot{\lambda}} = 1 - (1 - \delta_{\acute{o}} \delta_{\acute{\alpha}})^2 . \quad (4.26)$$

Для інших фрагментів  $\Phi_k$  (рис. 4.15,а),  $k \in \{\overline{1, n}\}$ , надійність визначається аналогічним способом за винятком того, що тепер у кожному паралельному ланцюжку є присутнім тільки один елемент, який визначає технічну надійність трубопровідної ділянки

$$D_{O_k}^{f\dot{\lambda}} = 1 - (1 - \delta_{\acute{o}})^2 . \quad (4.27)$$

Підставляючи (4.24), (4.26) – (4.27) у (4.25), одержимо математичну модель функціональної надійності всієї магістральної мережі в залежності від технічної надійності окремих її конструктивних елементів при довільній кількості ( $n$ ) перемичок А-типу

$$D^{f\dot{\lambda}} = \delta_{\acute{\alpha}}^{4n+2} \left[ 1 - (1 - \delta_{\acute{o}})^2 \right]^n \left[ 1 - (1 - \delta_{\acute{o}} \delta_{\acute{\alpha}})^2 \right] . \quad (4.28)$$

### 4.3.2. Розрахунок функціональної надійності магістральної мережі з перемичками В-типу

Нехай тепер конструкція магістральної трубопровідної системи використовує перемички В-типу. Тоді структурі магістральній системі з довільним числом перемичок буде відповідати схема, що зображена на рис. 4.16.

Нехай також мережі властиві ті ж самі особливості, що і мережі в попередньому підрозділі. Додамо тільки, що центральні засувки всіх перемичок  $\dot{\alpha}_{i k}$ ,  $k \in \{\overline{1, n}\}$ , мають ту ж саму технічну надійність  $\delta_{\acute{\alpha}}$ , що і усі інші засувки  $\dot{\alpha}_j$ ,  $j \in \{\overline{1, 4n+4}\}$ . Тоді граф аварійно-ремонтних зон для розглянутої магістральної трубопровідної системи з довільним числом перемичок В-типу буде мати вигляд, показаний на рис. 4.17. Як і в попередньому графі (рис. 4.13), вершина  $O_d$  відповідає джерелу ЦП; вершина  $O_c$  – спожива-

чеві ЦП; вершини  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$  – протяжним трубопроводам  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ ; вершини  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  – трубопровідним ділянкам, що з'єднують джерело або споживача з трубопровідною мережею; ребра графа – запірній арматурі з однойменним позначенням.

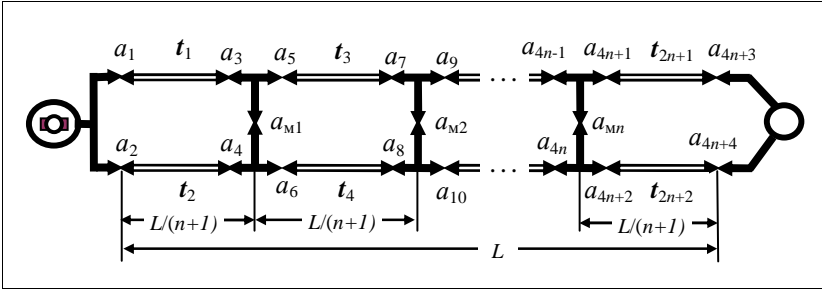


Рис. 4.16 – Схема магістральної трубопровідної системи з довільним числом перемичок B-типу

Нехай також мережі властиві ті ж самі особливості, що і мережі в попередньому підрозділі. Додамо тільки, що центральні засувки всіх перемичок  $\dot{a}_{i,k}$ ,  $k \in \{\overline{1, n}\}$ , мають ту ж саму технічну надійність  $\check{d}_{\dot{a}}$ , що і усі інші засувки  $\dot{a}_j$ ,  $j \in \{\overline{1, 4n+4}\}$ . Тоді граф аварійно-ремонтних зон для розглянутої магістральної трубопровідної системи з довільним числом перемичок B-типу буде мати вигляд, показаний на рис. 4.17. Як і в попередньому графі (рис. 4.13), вершина  $0_d$  відповідає джерелу ЦП; вершина  $0_c$  – споживачеві ЦП; вершини  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$  – протяжним трубопроводам  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ ; вершини  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  – трубопровідним ділянкам, що з'єднують джерело або споживача з трубопровідною мережею; ребра графа – запірній арматурі з однойменним позначенням.

Нові зони  $z_1, z_3, \dots, z_{2n-1}$  відповідають трубопровідним ділянкам, що одночасно належать перемичкам і першому з двох паралельних тру-

бопроводів;  $z_2, z_4, \dots, z_{2n}$  – трубопровідним ділянкам, що одночасно належать перемичкам і другому з двох паралельних трубопроводів.

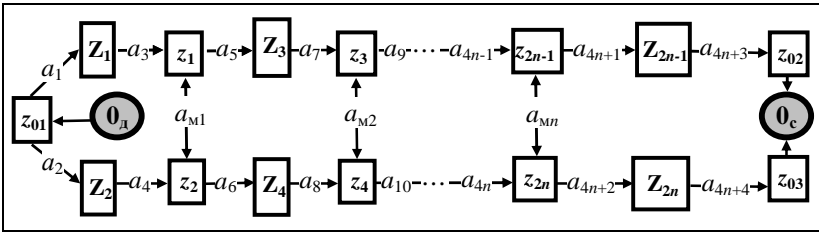


Рис. 4.17 – Граф аварійно-ремонтних зон магістральної трубопровідної системи з довільним числом перемичок типу  $B$

Довжина трубопровідних ділянок у зонах  $z_1, z_2, \dots, z_{2n}$ , як і в зонах  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$ , набагато менше довжини кожної з ділянок  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ , що знаходяться в зонах  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$ . Тому припускаємо ймовірність безвідмовної роботи кожною з зон  $z_1, z_2, \dots, z_{2n}$  і  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  рівною одиниці і виключаємо її з розрахункової моделі (рис. 4.18)

Розрахункова модель для мережі з довільним числом перемичок  $B$ -типу значно відрізняється від аналогічної моделі з перемичками  $A$ -типу. Основна причина – вихід із ладу засувки  $\dot{a}_j$ ,  $j \in \{\overline{3, 4n+4}\}$ , не тягне за собою припинення постачання ЦП споживачеві. У свою чергу, вихід із ладу додатково введених засувки  $\dot{a}_{i k}$ ,  $k \in \{\overline{1, n}\}$ , виводить із ладу всю систему на час ремонту. Тільки засувки  $\dot{a}_1, \dot{a}_2, \dot{a}_{4n+3}$  і  $\dot{a}_{4n+4}$  не змінюють свого характеру щодо впливу на функціональну надійність системи.

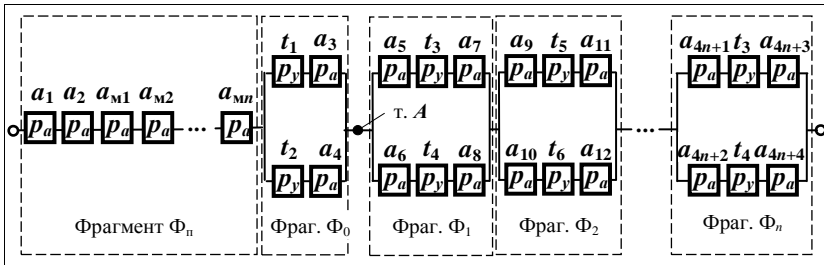


Рис. 4.18 – Розрахункова модель функціональної надійності трубопровідної системи з довільним числом перемичок *B*-типу

Засувкам  $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_{i-1}, \hat{a}_{i-2}, \dots, \hat{a}_{i-n}$  у розрахунковій моделі відповідає послідовна модель надійності (фрагмент моделі  $\Phi_n$ ), що визначає еквівалентну ймовірність транспорту ЦП через ці засувки

$$D_{\hat{a}_i}^{f\hat{A}} = \delta_{\hat{a}}^{n+2}. \quad (4.29)$$

Оскільки вираз (4.29) враховує вплив технічної надійності центральних засувок  $\hat{a}_{i-1}, \hat{a}_{i-2}, \dots, \hat{a}_{i-n}$  усіх перемичок і трубопровідні частини перемичок мають абсолютну надійність, то перемички на розрахунковій моделі трансформуються в точку. Наприклад, першу перемичку можна інтерпретувати як точку *A* (рис. 4.18). Усі точки-перемички розбивають змішану модель надійності на фрагменти  $\Phi_k, k \in \{0, n\}$ . Вихід із ладу будь-якої частини мережі, що відповідає фрагменту  $\Phi_k$  або фрагменту  $\Phi_n$ , призводить до припинення подачі ЦП споживачеві. Тому усі фрагменти утворюють також послідовну модель надійності, тобто шукана функціональна надійність мережі визначається виразом

$$D_{\hat{O}_i}^{f\hat{A}} = D_{\hat{O}_i}^{f\hat{A}} \prod_{k=0}^n D_{\hat{O}_k}^{f\hat{A}}, \quad (4.30)$$

де  $D_{\hat{O}_k}^{f\hat{A}}$  – функціональна надійність  $k$ -ї частини мережі, що складається з паралельних ділянок  $t_{2k+1}$  і  $t_{2k+2}$ .

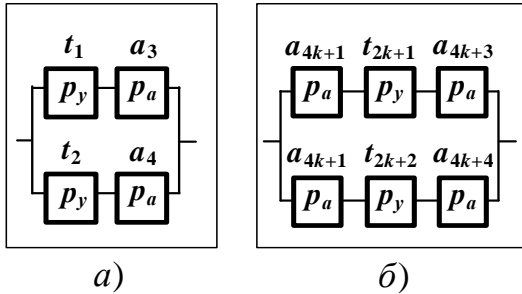


Рис. 4.19 – Фрагменти моделі надійності магістральної трубопровідної мережі з перемичками В-типу

Фрагмент  $\Phi_0$  розрахункової схеми являє собою паралельну модель двох послідовних ланцюжків (рис. 4.19,а). Один ланцюжок визначає надійність ділянки мережі з трубопроводом  $t_1$  і засувкою  $a_3$ , а інша – надійність мережі з трубопроводом  $t_2$  і засувкою  $a_4$ . ЦП буде надходити споживачеві, якщо хоча б один із ланцюжків знаходиться в справному стані. Тому ланцюжки утворять паралельну модель надійності, згідно з якою надійність фрагменту  $\Phi_{n+1}$  визначається виразом

$$D_{\hat{O}_0}^{f\hat{A}} = 1 - (1 - \delta_o \delta_a)^2. \quad (4.31)$$

Для інших фрагментів  $\Phi_k$  (рис. 4.19,б):,  $k \in \{1, n\}$ , надійність визначається аналогічним способом за винятком того, що в кож-

Функціональна надійність

ному паралельному ланцюжку тепер відсутня технічна надійність засувки  $\delta_a$ :

$$D_{O_k}^{f\hat{A}} = 1 - \left(1 - \delta_o \delta_a^2\right)^2 . \quad (4.32)$$

Підставляючи (4.29), (4.31) – (4.32) у (4.30), одержимо математичну модель функціональної надійності всієї магістральної мережі в залежності від технічної надійності окремих її конструктивних елементів при довільній кількості ( $n$ ) перемичок B-типу

$$D^{f\hat{A}} = \delta_a^{n+2} \left[1 - \left(1 - \delta_o \delta_a\right)^2\right] \left[1 - \left(1 - \delta_o \delta_a^2\right)^2\right]^n . \quad (4.33)$$

### 4.3.3. Розрахунок функціональної надійності магістральної мережі з перемичками C-типу

Магістральній трубопровідній системі з довільним числом перемичок C-типу відповідає схема, зображена на рис. 4.20.

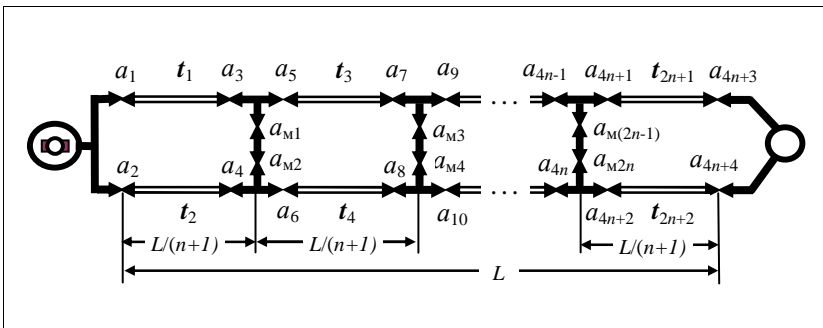


Рис. 4.20 – Схема магістральної трубопровідної системи з довільним числом перемичок C-типу

Нехай магістральна мережа з перемичками С-типу має ті ж самі особливості, що і мережі на рис. 4.12 і 4.16.

Відмінність мережі на рис. 4.20 від мережі на рис. 4.16 полягає тільки в наявності спарених центральних засувок у кожній перемичці. Таким чином, перемички С-типу збільшують загальне число засувок мережі на величину  $2n$  у порівнянні з перемичками А-типу і на величину  $n$  у порівнянні з перемичками В-типу.

Граф аварійно-ремонтних зон для магістральної трубопровідної системи з довільним числом перемичок С-типу буде мати вигляд, показаний на рис. 4.21.

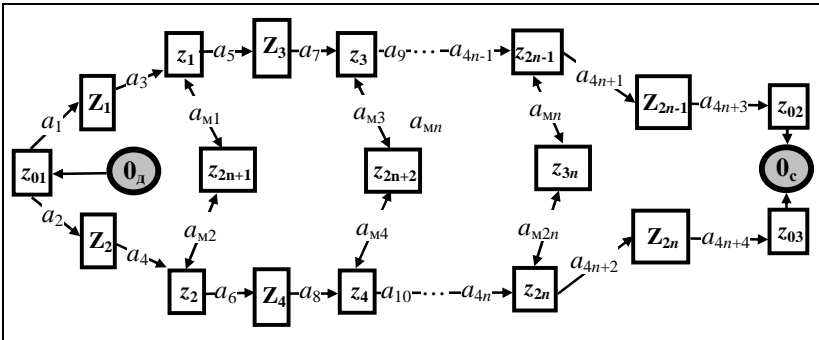


Рис.4.21 – Граф аварійно-ремонтних зон магістральної трубопровідної системи з довільним числом перемичок С-типу

Довжина трубопровідних ділянок у зонах  $z_1, z_2, \dots, z_{3n}$ , як і у зонах  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$ , набагато менша довжини кожної з ділянок  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ , що знаходяться в зонах  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$ . Тому приймаємо ймовірність безвідмовної роботи кожної з зон  $z_1, z_2, \dots, z_{3n}$  і  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  рівною одиниці і виключаємо її з розрахункової моделі (рис.4.22)

Розрахункова модель для мережі з довільним числом переминок С-типу відрізняється від аналогічної моделі з перемичками В-типу тільки фрагментом Фп.

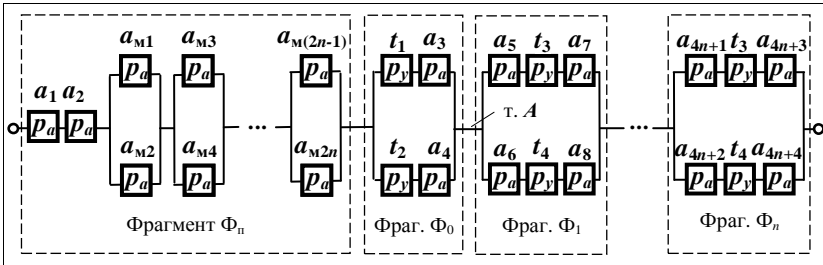


Рис. 4.22 – Розрахункова модель функціональної надійності магістральної мережі з довільним числом переминок С-типу

Одновременний вихід із ладу засувки  $\hat{a}_{i(2k-1)}$  і  $\hat{a}_{i(2k-1)}$ , що належать до однієї  $k$ -ї перемички ( $k \in \{1, n\}$ ), призводить до припинення подачі ЦП споживачеві. Тому всі пари засувки утворюють послідовну модель надійності з іншою частиною мережі. Вихід із ладу тільки однієї з пари засувки  $\hat{a}_{i(2k-1)}$  і  $\hat{a}_{i(2k-1)}$  не призводить до припинення постачання ЦП споживачеві. Тому засувки кожної пари утворюють між собою паралельну модель надійності. Зазначені особливості впливу центральних засувки на функціональну надійність системи визначають нову математичну модель для фрагменту Ф<sub>n</sub>:

$$D_{O_i}^{fN} = \delta_a^2 \left[ 1 - (1 - \delta_a)^2 \right]^n . \quad (4.34)$$

З урахуванням (4.34) функціональна надійність всієї магістральної мережі з довільним числом переминок С-типу трансформується з (4.33) у вираз



$$D^{fC} = \delta_{\dot{a}}^2 \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{a}})^2 \right]^n \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}})^2 \right] \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}}^2)^2 \right]^n \quad (4.35)$$

#### 4.3.4. Порівняльний аналіз показників надійності магістральних мереж із різними конструкціями перемички

Математичні моделі функціональної надійності (4.28), (3.33) і (3.35) дозволяють відповісти на два важливих питання: який тип перемичок має найбільшу практичну доцільність і який вплив кожний тип перемичок у чисельному виразі робить на функціональну надійність усієї магістральної системи.

Для порівняння перемичок В-типу й А-типу знайдемо відношення  $D^{f\dot{A}}$  до  $D^{f\dot{B}}$  для довільного числа перемичок  $n$ , тобто відношення виразу (4.33) до (4.29):

$$\begin{aligned} \frac{D^{f\dot{A}}}{D^{f\dot{B}}} &= \frac{\delta_{\dot{a}}^{n+2} \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}})^2 \right] \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}}^2)^2 \right]^n}{\delta_{\dot{a}}^{4n+2} \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}})^2 \right]^n \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}})^2 \right]} = \\ &= \frac{\left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}}^2)^2 \right]^n}{\delta_{\dot{a}}^{3n} \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}})^2 \right]^n} = \frac{1}{\delta_{\dot{a}}^{3n}} \left[ \frac{1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}}^2)^2}{1 - (1 - \delta_{\dot{o}})^2} \right]^n = \\ &= \frac{1}{\delta_{\dot{a}}^{3n}} \left[ \frac{\delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}}^n (2 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}}^2)}{\delta_{\dot{o}} (2 - \delta_{\dot{o}})} \right]^n = \frac{1}{\delta_{\dot{a}}^n} \left( \frac{2 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}}^2}{2 - \delta_{\dot{o}}} \right)^n. \quad (4.36) \end{aligned}$$

З (4.36) випливає, що

$$D^{f\hat{A}} = \frac{1}{\delta_{\hat{a}}^n} \left( \frac{2 - \delta_{\delta} \delta_{\hat{a}}^2}{2 - \delta_{\delta}} \right)^n D^{f\hat{A}}. \quad (4.37)$$

Обидва коефіцієнти в правій частині (4.37)  $\frac{1}{\delta_{\hat{a}}^n}$  і  $\left( \frac{2 - \delta_{\delta} \delta_{\hat{a}}^2}{2 - \delta_{\delta}} \right)^n$  більше одиниці, оскільки чисельники дрібних коефіцієнтів перевищують знаменники. Тому виходить, що функціональна надійність магістральної трубопровідної мережі з використанням перемичок *B*-типу значно вище, ніж із використанням перемичок *A*-типу:

$$D^{f\hat{A}} \gg D^{fA}. \quad (4.38)$$

Не менш важливим показником надійності є ремонтпридатність. І цей показник для систем із перемичками *B*-типу вище. Якщо в системі з перемичками *A*-типу надходження ЦП споживачеві припиняється при проведенні ремонтно-профілактичних робіт на засувках  $\hat{a}_j$  ( $j \in \{1, (4n+2)\}$ ), то в системі з перемичками *C*-типу надходження ЦП припиняється тільки при проведенні ремонтно-профілактичних робіт на засувках  $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_{11}, \hat{a}_{12}, \dots, \hat{a}_{1n}$ , що на  $3n$  засувок менше.

Для аналогічного порівняння перемичок *C*-типу і *B*-типу знайдемо відношення  $D^{f\hat{C}}$  до  $D^{f\hat{B}}$  для довільного числа перемичок  $n$ , тобто відношення виразу (4.35) до (4.33):

$$\begin{aligned} \frac{D^{f\tilde{N}}}{D^{f\hat{A}}} &= \frac{\delta_{\dot{a}}^2 \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{a}})^2 \right] \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}})^2 \right] \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}}^2)^2 \right]^n}{\delta_{\dot{a}}^{n+2} \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}})^2 \right] \left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{o}} \delta_{\dot{a}}^2)^2 \right]^n} = \\ &= \frac{\left[ 1 - (1 - \delta_{\dot{a}})^2 \right]}{\delta_{\dot{a}}^n} = \frac{\delta_{\dot{a}}^n (2 - \delta_{\dot{a}})^n}{\delta_{\dot{a}}^n} = (2 - \delta_{\dot{a}})^n. \end{aligned} \quad (4.39)$$

З (4.39) випливає, що

$$D^{f\tilde{N}} = (2 - \delta_{\dot{a}})^n D^{f\hat{A}}. \quad (4.40)$$

У правій частині (4.40) коефіцієнт  $(2 - \delta_{\dot{a}})^n$  більше одиниці. Тому функціональна надійність магістральної трубопроводної мережі з використанням перемичок С-типу вище, ніж із використанням перемичок В-типу:

$$D^{f\tilde{N}} > D^{f\hat{A}}. \quad (4.41)$$

Крім того, показник ремонтпридатності також вище. Якщо в системі з перемичками В-типу надходження ЦП споживачеві припиняється при проведенні ремонтно-профілактичних робіт на засувках  $\dot{a}_1, \dot{a}_2, \dot{a}_{11}, \dot{a}_{12}, \dots, \dot{a}_{1n}$ , то в системі з перемичками С-типу надходження ЦП припиняється тільки при проведенні ремонтно-профілактичних робіт на засувках  $\dot{a}_1$  і  $\dot{a}_2$ , що на  $n$  засувок менше.

Таким чином, порівняльний аналіз показує, що:

– функціональна надійність магістральної мережі з двох протяжних паралельних трубопроводів, симетрично розділених перемичками С-типу, вище ніж функціональна надійність мережі з використанням засувок В-типу й А-типу:

$$D^{f\tilde{N}} > D^{f\hat{A}} \gg D^{f\hat{A}}; \quad (4.42)$$

– перемички С-типу забезпечують можливість проведення профілактичних або ремонтних робіт на будь-якому конструктивному елементі мережі за винятком тільки засувок  $\dot{a}_1$  і  $\dot{a}_2$ .

#### 4.4. Магістральна трубопровідна мережа з абсолютною ремонтпридатністю

Використання в магістральних трубопровідних мережах перемичок С-типу дозволяє домогтися високої ремонтпридатності – тільки дві засувки  $\dot{a}_1$  і  $\dot{a}_2$  не дають можливості цьому показнику досягти абсолютного значення.

На жаль, домогтися того, щоб усі конструктивні елементи трубопровідної мережі мали можливість перебувати у стані ремонтно-профілактичних робіт без припинення постачання ЦП споживачеві, у рамках самій мережі, не є можливим. Однак на рівні магістральної системи це легко досягається шляхом резервування насосного агрегату (рис. 4.23).

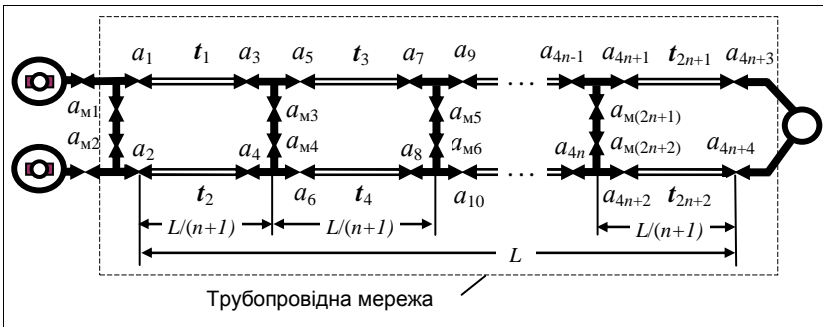


Рис. 4.23 – Схема магістральної трубопровідної системи з абсолютною ремонтпридатністю

У системі, зображеної на рис. 4.23, вихід із ладу будь-якого елемента не тягне за собою припинення подачі ЦП споживачеві. Модель надійності трубопровідної мережі в цьому випадку відповідає схемі на рис. 4.24.

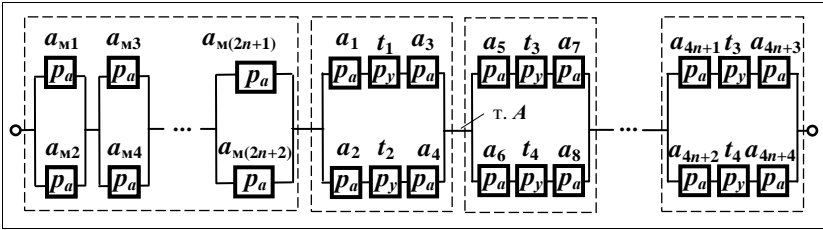


Рис. 4.24 – Розрахункова модель функціональної надійності магістральної мережі з абсолютною ремонтпридатністю

Математична модель функціональної надійності приймає вигляд

$$D^f = \left[ 1 - (1 - \delta_a)^2 \right]^{n+1} \left[ 1 - (1 - \delta_o \delta_a^2)^2 \right]^{n+1}. \quad (4.43)$$

Порівняльний аналіз функціональних показників надійності систем, приведених на рис. 4.20 і 4.23, говорить також на користь останньої. При абсолютній ремонтпридатності система на рис. 4.29 має і більшу функціональну надійність:

$$D^f = (2 - \delta_a) \frac{(2 - \delta_o \delta_a^2)}{(2 - \delta_o \delta_a)} D^{fN}. \quad (4.44)$$

**Загальний висновок.** Метод розрахунку функціональної надійності трубопровідних транспортних систем [4] дозволив однозначно визначити у чисельному вигляді функціональну надійність магістральної симетричної мережі з різними типами перемичок. Порівняльний аналіз трубопровідних мереж з різними конструкціями перемичок за показником функціональною надійності визначив тип перемичок із шістьма засувками (С-тип) як найбільш доцільний для практичного використання.

## ***Післямова***

Основним науковим результатом монографії є розробка методу розрахунку функціональної надійності трубопровідних транспортних систем. Метод сформувався в результаті дисертаційного дослідження Гавриленко І.О. «Надійність постачання цільового продукту в складних трубопровідних транспортних системах», виконаного на кафедрі прикладної математики й інформаційних технологій Харківської національної академії міського господарства під керівництвом проф. Самойленка М.І.

Наукові дослідження, пов'язані з функціональною надійністю мережних структур, проводили на кафедрі і раніше. Перша дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Методи, критерії і алгоритми прийняття рішень з експлуатації і розвитку інженерних мереж з урахуванням їх надійності» була захищена Рудем І.О. під керівництвом проф. Самойленка М.І. в 2001 р. Робота Рудя І.О. була орієнтована на розробку програмного інструментарію для автоматизованого керування інженерними мережами, у тому числі й трубопровідними транспортними системами. Основним завданням дисертаційних досліджень Рудя І.О. було розробка розрахункового методу, що дозволяє у процесі експлуатації складних інженерних мереж проводити порівняльний аналіз за критерієм надійності двох і більше можливих варіантів структурних змін мережі. Для вирішення поставленого завдання було достатньо одержати оцінку функціональної надійності мережі, що й було успішно реалізовано дисертантом.

Робота Гавриленко І.О. є органічним продовженням досліджень Рудя І.О. У розробленому Гавриленко І.О. семиетапному методі розрахунку функціональної надійності трубопровідних транспортних систем в основу перших двох етапів покладені дослідження Рудя І.О. Ці дослідження стосуються розрахунку технічної

надійності трубопроводів у рамках однієї аварійно-ремонтної зони трубопровідної мережі.

Перед Гавриленко І.О. стояло нове завдання – розробити метод *точного* розрахунку функціональної надійності трубопровідних розподільних і магістральних систем. У результаті досліджень був отриманий результат, що принципово змінює методику розрахунку. Дослідження Гавриленко І.О. показали неспроможність використання в розрахунку функціональної надійності мостових з'єднань (перемичок) у *магістральних* трубопроводах формули «повної ймовірності» [6], оскільки вихід з ладу перемички приводить не до мостової моделі розрахунку надійності, а до послідовної.

Робота Гавриленко І.О. і ця монографія покладені в основу загальної теорії функціональної надійності трубопровідних транспортних систем, що розробляється і удосконалюється на кафедрі прикладної математики й інформаційних технологій Харківської національної академії міського господарства. Важливими науковими завданнями, які треба буде розв'язати для завершення розробки теорії, є:

1. Узагальнення методу розрахунку функціональної надійності на випадок двох і більш джерел цільового продукту.
2. Розробка алгоритму розрахунку функціональної надійності мережі щодо аварійно-ремонтних зон з урахуванням можливих мостових з'єднань у графі АРЗ.
3. Визначення критичних співвідношень параметрів мостових з'єднань і оптимальної кількості перемичок у магістральних трубопровідних системах.

Вирішення перших двох завдань дозволить зробити семиетапний метод розрахунку функціональної надійності, з одного боку, універсальним, що дозволить розраховувати функціональну надійність незалежно від:

- кількості й місць розташування джерел цільового продукту в системі;
- технічної надійності аварійно-ремонтної зон, що виступають в якості мостів в мережній структурі трубопровідної системи, коли

Післямова

для розрахунку функціональної надійності треба використовувати формулу «повної ймовірності».

З іншого боку, подальші дослідження, зокрема вирішення третього завдання можуть привести до розбивки теорії функціональної надійності трубопровідних систем на дві самостійні частини: одну – для розподільних систем, іншу – для магістральних.

Теорія функціональної надійності має багато цікавих і винятково важливих для життєзабезпечення людей завдань. Вирішити їх і збагатити теорію новими науковими результатами – почесна і плідна праця для будь-якого вченого. Теорія функціональної надійності чекає своїх дослідників і в тому числі – молодих!

*Проф., д-р техн. наук Самойленко М.І.*



## Словник термінів

**безвідмовність** – властивість системи безупинно зберігати *працездатність* [4, т.3, с.854];

**велика система** – керована система, що розглядається як сукупність взаємозалежних керованих підсистем, об'єднаних спільною метою функціонування [4, т.3, с.531];

**відмова** – поступова або раптова втрата пристроєм працездатності [29, т.3, с.854];

**довговічність** – властивість технічної системи безупинно зберігати *працездатність* з необхідними перервами для ремонтів і технічного обслуговування за умови економічної доцільності подальшої експлуатації [29, т.3, с.854];

**імовірність** – можливість здійснення чого-небудь [29, с.65];

**імовірність *mat.*** – чисельна характеристика ступеня можливості появи певної події в тих або інших певних умовах, здатних повторюватися необмежене число раз [29, т.3, с.854];

**імовірність безвідмовної роботи  $R(t)$**  – найважливіший кількісний показник *надійності*, рівний *імовірності* того, що за час  $t$  система не досягне стану відмови [29, т.3, с.854];

**Кірхгофа перше правило** – алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю, якщо вважати підхідні струми позитивними, а відхідні – негативними [23, с.201];

**Кірхгофа друге правило** – алгебраїчна сума добутків струмів на опори (включаючи внутрішні) дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють у замкнутому контурі. При цьому і струми, і електрорушійні сили, що співпадають з довільно обраним напрямком обходу контуру, вважаються позитивними, а спрямовані назустріч обходу – негативними [23, с.201];

**магістральний трубопровідний транспорт** – вид *трубопровідного транспорту*, що здійснює транспорт продукту від місця видобутку до місць переробки і споживання [4, т.26, с.261];

**мережа** – система шляхів, ліній, трубопроводів, розташованих у просторі [33, с.621];

**надійність** – поняття, що включає в себе *безвідмовність, довговічність, пристосованість до ремонту* [29, т.3, с.854];

**надійність виробу** – властивість виробу зберігати значення встановлених параметрів функціонування у певних межах, що відповідають заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, збереження і транспортування. Надійність – комплексна властивість, що залежно від призначення виробу й умов його експлуатації може включати *безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і схоронність* окремо або у певному сполучення цих властивостей як виробу в цілому, так і його частин [4, т.17, с.205];

**надійність кібернетичної системи** – здатність систем зберігати свої найбільш суттєві властивості (*безвідмовність, ремонтпридатність та ін.*) на заданому рівні протягом фіксованого проміжку часу за певних умов експлуатації [47, т.2, с.60];

**одоризація** – додання газу характерного запаху [4, т.26, с.316];

**оптимальне резервування** – одна з екстремальних задач у теорії надійності [29, т.3, с.856];

**працездатність** – стан виробу, при якому він відповідає усім вимогам, що висуваються до його основних параметрів [4, т.17, с.205];

**працездатність** – здатність багато і плідно працювати [33, с.553];

**промисловий трубопровідний транспорт** – вид *трубопровідного транспорту*, що здійснює транспортування вантажів, які передаються по трубах, у межах виробничого підприємства для продовження технологічного процесу. До промислового трубопровідного транспорту відносяться нафтобазові, нафто-, газо- і продуктопроводи, міські газорозподільні, водопровідні й каналізаційні мережі [4, т.26, с.261];

**резервування** – метод підвищення *надійності* шляхом уведення надмірності того чи іншого роду [29, т.3, с.855];

**ремонтпридатність** – властивість системи, що визначає зручність її технічного обслуговування і проведення ремонтних робіт [29, т.3, с.854];

**санация** (лат. sanatio – лікування, оздоровлення) – система заходів щодо відновлення фізично зношених технічних об'єктів, у тому числі трубопроводів [33, с.621];

**складна технічна система** – технічна система, що складається з конструктивно незалежних вузлів, має здатність перебудовувати свою структуру для збереження працездатності при відмові окремих частин і можливості знаходження у двох або більше працездатних станах [4, т.17, с.206];

**схоронність** – властивість виробу, пристрою, споруди безупинно зберігати (у заданих межах) значення встановлених для них показників якості під час і після збереження і транспортування [4, т.24, с.216];

**структура** – взаємне розташування частин, що складають одне ціле [33, с.673];

**сумарна ймовірність працездатності системи** – один з можливих показників надійності *складної технічної системи*, рівний сумі ймовірностей усіх працездатних станів системи [4, т.17, с.206];

**топографія** – поверхня деякої місцевості; взаємне розташування її пунктів, частин [45, с.500];

**транспорт** – область матеріального виробництва, пов'язана з переміщенням людей і вантажів [4, т.26, с.154];

**трубопровід** – споруда для транспортування газоподібних і рідких речовин, твердого палива, будівельних матеріалів, зерна та ін. під впливом різниці тисків (напорів) у різних перерізах [4, т.26, с.260];

**трубопровідний транспорт** – вид транспорту, який здійснює передачу на відстань рідких, газоподібних і твердих продуктів по *трубопроводах* [4, т.27, с.260–261];

**функціональна надійність системи** – ймовірність виконання функціонального завдання системи протягом певного періоду часу  $T$ ;

**функціональна надійність трубопровідної транспортної системи** – ймовірність безперебійного постачання цільового продукту споживачу протягом певного періоду часу  $T$ ;

**функція інтенсивності відмови  $\lambda(t)$**  – умовна щільність розподілу *відмови* за умови, що технічна система проробила безвідмовно час  $t$ .

Якщо існує щільність розподілу  $f(t) = F'(t)$ , то  $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$  [29, т.3,

с.854–855];

**функція розподілу настання відмови  $F(t)$  до моменту  $t$**  – різниця між одиницею і *ймовірністю безвідмовної роботи*, тобто  $1 - R(t)$  [29, т.3, с.854];

**цільовий продукт** – продукт, що транспортується споживачеві по *трубопроводу*. Як цільовий продукт можуть виступати природний газ, вода, нафта, стиснуте повітря, тепло і т.п.

## Список літератури

1. *Абрамов Н.Н.* Теория расчета систем подачи и распределения воды. – М.: Стройиздат, 1972. – 288 с.
2. *Абрамов Н.Н., Поспелов М.М.* Расчёт водопроводных сетей. – М.: Госстройиздат, 1962. – 227 с.
3. *Беляев Ю.К.* Статистические методы в теории надежности. – М.: Знание, 1978. – 66 с.
4. Большая советская энциклопедия. Т.3, 17, 24, 26. – М.: Сов. энциклопедия, 1970–1978.
5. *Вендров А.М.* CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. – СПб: БХВ, 2000. – 240 с.
6. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
7. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Анализ методов оценки надёжности трубопроводных транспортных систем в автоматизированных системах управления // Коммунальное хозяйство городов. Вып. 63. – С.222–228. – К.: Техника, 2005.
8. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Расчёт надёжности поставки целевого продукта конкретному потребителю в системах трубопроводного транспорта // Коммунальное хозяйство городов. Вып. 67. – С.222–228. – К.: Техника, 2006.
9. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Эксплуатация и проектирование систем тепло-, газо- и водоснабжения с учетом надежности // II Всеукраинская научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы энерго-, ресурсосбережения жилищно-коммунального хозяйства». – Алушта, ХО НТТ КГ и ПО, ХНАГХ, 2006. – С. 77-79.
10. *Гавриленко І.О.* Надійність постачання цільового продукту в складних трубопроводних транспортних системах. – Автореферат дис...канд..техн. наук: 05.22.01. – Харків: ХНАМГ, 2006. – 22 с.
11. *Гальперин Е.М.* Расчёт кольцевых водопроводных сетей с учётом надёжности функционирования. – Саратов: Саратовский ГУ, 1989. – 104 с.
12. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987. – 336 с.

13. ГОСТ 27.002-83 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Госстандарт, 1984.

14. *Душкин С.С., Краев И.О.* Эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения. – К., 1993. – 164 с.

15. *Евдокимов А.Г.* Минимизация функций и её приложения к задачам автоматизированного управления инженерными сетями. – Харьков: Вища шк., 1980. – 208 с.

16. *Евдокимов А.Г., Панасенко А.А.* Оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. – Харьков: Основа, 1996. – 136 с.

17. *Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д.* Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. – Харьков: Вища школа, 1980. – 144 с.

18. *Ильин Ю.А.* Надёжность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.

19. *Ильин Ю.А.* Расчет надежности подачи воды. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.

20. Интегрированная диалоговая система рациональной эксплуатации и развития систем подачи и распределения воды / Под общ. ред. *Евдокимова А.Г. и Самойленко Н.И.* – Донецк: РИП «Лебедь», 1994. – 192 с.

21. *Ионин А.А.* Надёжность систем тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1989. – 268 с.

22. *Ионин А.А.* Газоснабжение. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.

23. *Карякин Н.И., Быстров К.Н., Киреев П.С.* Краткий справочник по физике. – М.: Высш. шк., 1963. – 560 с.

24. *Клемин А.И.* Надежность ядерных энергетических установок. Основы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 344 с.

25. *Коваленко И.Н.* Исследования по анализу надежности сложных систем. – К.: Наук. думка, 1976. – 211 с.

26. *Коваленко И.Н., Кузнецов И.Ю.* Методы расчета высоконадежных систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.

27. *Королюк В.С., Турбин А.Ф.* Полумарковские процессы и их приложения. – К.: Наук. думка, 1976. – 138 с.

28. *Лосев Э.А.* Топологические методы нахождения вероятностных характеристик системы электроснабжения промышленных предприятий (Тр. ВНИИПЭМ). – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 111-115.

## Література

29. Математическая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1977–1985. – Т.3. – 1184 стб.
30. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т. / Под общ. ред. *Ю.Н. Руденко*. Т.2. Надежность электроэнергетических систем / Под ред. *М.Н. Розанова*. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.
31. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т. / Под общ. ред. *Ю.Н. Руденко*. Т.4. Надежность систем теплоснабжения – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 351 с.
32. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. *И.А. Ушакова*. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
33. *Ожегов С.И.* Словарь русского языка. – М.: Рус. яз., 1986. – 797 с.
34. *Петросов В.А.* Управление региональными системами водоснабжения. – Харьков: Основа, 1999. – 320 с.
35. Рациональная эксплуатация и развитие систем водоснабжения и водоотведения. Т.1. Компьютеризация в системах водоснабжения / Под ред. *Евдокимова А.Г и Самойленко Н.И.* – Харьков: ХТУРЭ, 1997. – 276 с.
36. *Рудь И.А.* Методы, критерии, и алгоритмы принятия решений по эксплуатации и развитию инженерных сетей с учётом их надёжности. – Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Харьков, 2001. – 153 с.
37. *Рудь И.А.* Модели надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Радиоэлектроника и информатика. – 2000. – №3. – С.86-87.
38. *Рудь И.А.* Расчёт надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Коммунальное хозяйство городов. Вып. 20. Ч.1. – К.: Техніка, 1999. – С.37–42. –
39. *Рудь И.А., Самойленко Н.И.* Эксплуатация и развитие инженерных сетей с учётом надёжности // Современные проблемы гуманизации и гармонизации управления. Материалы II Международной междисциплинарной НПК. – Харьков, 2001. – С.142–143.
40. *Рябинин И.А.* Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1971. – 347 с.
41. *Рябинин И.А., Киреев Ю.Н.* Надежность судовых электроэнергетических систем и судового оборудования. – Л.: Судостроение, 1975. – 234 с.
42. *Самойленко Н.И.* Информационно-графические компьютерные технологии управления инженерными сетями предприятий, городов и

регионов / Под ред. Самойленко Н.И. - Златоуст: Челябинский Дом печати, 1996. – 232 с.

43. *Самойленко Н.И.* Компьютерные интегрированные информационно-графические технологии рациональной эксплуатации и развития инженерных сетей. – Дис. ... докт. техн. наук: 05.13.02; 05.13.04. – Харьков, 1996. – 370 с.

44. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А.* Метод расчёта функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем // Устойчивое развитие городов. Материалы VI Международной НПК. – Харьков: ХНАГХ, 2008.

45. Словарь иностранных слов. – М.: Рус. яз., 1986. – 608 с.

46. *Черкесов Г.Н.* Надёжность технических систем с временной избыточностью. – М.: Сов. радио, 1974. – 296 с.

47. Энциклопедия кибернетики. – К.: Гл.редакция УСЭ, 1974.– Т2. – 624 с.

48. *Эндрени Дж.* Моделирование при расчетах надёжности в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

49. *Samoilenko M.I.* On emergency localisation in water supply networks. Pros. of the Third International Congress on Industrial and Applied Mathematics. Hamburg, 1995.

Наукове видання

**САМОЙЛЕНКО Микола Іванович,  
ГАВРИЛЕНКО Ірина Олександрівна**

**Функціональна надійність трубопровідних  
транспортних систем**

*За редакцією М.І.Самойленка*

Монографія

Редактор *М.З.Аляб'єв*

План 2009, поз. 16-МН

---

Підп. до друку 11.02.09  
Друк на ризографі  
Тираж 300 прим

Формат 60×84 /16  
Умовно.-друк. арк. 10,1

Папір офісний  
Обл.-друк. арк. 12,1

---

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12

---

Сектор оперативної поліграфії ЦНІТ ХНАМГ  
61002, Харків, вул. Революції, 12