

Тернопільський Національний економічний університет

Прим. № \_\_\_\_  
На правах рукопису

**Періг Володимир Михайлович**

УДК 621.391

**НАУКОВО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРТИЗИ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ СПЕЦІАЛЬНОГО  
ПРИЗНАЧЕННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Спеціальність: 05.13.12 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник –  
доктор технічних наук, професор  
Катеринчук Іван Степанович

Тернопіль–2012

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВІДОМИХ ПІДХОДІВ ЩОДО ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРТИЗИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ .....	15
1.1. Аналіз особливостей проектування перспективних телекомунікаційних систем та процесу проведення експертизи .....	15
1.2. Формалізація процесу функціонування телекомунікаційної системи а аналіз характеру невизначеності, яка існує на етапі проведення експертизи .....	25
1.3. Постановка завдань дослідження. Вибір концепції дослідження.....	32
Висновки з розділу .....	38
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ.....	41
2.1. Показники якості функціонування телекомунікаційної системи для фізичного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем.....	41
2.2. Показники якості функціонування телекомунікаційної системи для каналного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем.....	47
2.3. Показники якості функціонування телекомунікаційної системи для мережевого рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем.....	55
Висновки з розділу .....	68
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА НАУКОВО-МЕТОДИЧНОГО АПАРАТУ <b>ТА ПРИСТРОЮ</b> ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРТИЗИ ТЕЛЕКОМУНІКА- ЦІЙНОЇ СИСТЕМИ <b>В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ</b> .....	70
3.1. Розроблення методики врахування невизначеності вихідних даних при знаходженні експертних показників якості функціонування ТКС СП.....	70

3.2. Удосконалення математичних моделей визначення показників якості для урахування невизначеності параметрів функціонування ТКС .....	79
3.2.1. Удосконалення математичних залежностей показників якості функціонування телекомунікаційної системи для фізичного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем.....	79
3.2.2. Удосконалення математичних залежностей показників якості функціонування телекомунікаційної системи для канального рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем.....	85
3.2.3. Удосконалення математичних залежностей показників якості функціонування телекомунікаційної системи для мережевого рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем .....	92
3.3. Концепція експертизи ТКС .....	100
3.4. Розробка пристрою для розрахунку експертних показників якості функціонування ТКС в умовах невизначеності .....	103
Висновки з розділу.....	106
<b>РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ</b>	
<b>ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ</b>	
<b>МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ.....</b>	
4.1. Методика застосування теорії штучних нейронних мереж в завданнях експертних оцінок якості ТКС в умовах неповноти вихідної інформації .....	110
4.2. Загальна характеристика кластерного аналізу.....	121
4.2.2. Формальна постановка задачі кластеризації .....	121
4.2.3. Існуючі підходи до кластеризації інформації.....	122
4.3. Кластеризація з використанням нейронних мереж Кохонена.....	125

4.4. Використання багатосарових нейронних мереж для класифікації телекомунікаційних систем спеціального призначення.....	131
4.5. Кластеризація з використанням нейронних мереж Хопфілда.....	136
4.6. Застосування науково-методичного апарату експертизи телекомунікаційної системи спеціального призначення .....	140
Висновки з розділу.....	143
ВИСНОВКИ.....	145
ДОДАТКИ.....	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	159

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ**

- ГІС – геоінформаційна автоматизована система («Гарт-ГІС»);  
ДПСУ – Державна прикордонна служба України;  
ІТС – інформаційно-телекомунікаційна система (ІТС «Гарт»);  
ЕО – експертна оцінка;  
ЕНМ – електронна нейромережа;  
ЕС – експертна система;  
ЕСПЯ – експертна система показників якості;  
КАІС – корпоративна автоматизована інформаційна система;  
ПТК – програмно-технічний комплекс;  
СІЗ – система інформаційного забезпечення;  
СМО – система масового обслуговування;  
СПЯ – система показників якості;  
ТКС – телекомунікаційна система;  
ТКС СП – телекомунікаційна система спеціального призначення;  
ШН – штучний нейрон;  
ШНМ – штучні нейронні мережі.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Кінець 20-го початок 21-го століття характеризується бурхливим кількісним та якісним зростанням складних, територіально розподілених технічних систем. Такі системи представляють собою функціонально пов'язану сукупність програмно-апаратних засобів обробки і обміну інформацією і складаються з інформаційних вузлів і фізичних каналів передачі інформації [1, 2].

Останнім часом в різних галузях людської діяльності для автоматизації вирішення різноманітних інформаційних завдань використовуються інформаційно-телекомунікаційні системи. Від їх працездатності в багатьох випадках залежить можливість вирішення задач. Тому при виході інформаційно-телекомунікаційної системи (ІТС) з ладу необхідно оперативно діагностувати причини непрацездатності. Для визначення цієї причини необхідно провести аналіз (класифікацію стану) ІТС по сукупності параметрів які описують її стан.

Експертиза телекомунікаційних проектів є важливим етапом в процесі розробки ТКС, який у значній мірі впливає на якість телекомунікаційних систем, що розробляються. Експертиза проводиться практично на кожному етапі розробки ТКС і представляє собою складну процедуру, яка здійснюється в умовах об'єктивно існуючої невизначеності. Врахування умов невизначеності повинно забезпечити підвищення адекватності та достовірності експертизи ТКС.

Процедурам проведення експертизи телекомунікаційних проектів присвячено широке коло робіт вітчизняних та зарубіжних авторів, серед яких Белов Д.Л., Вишне夫斯基 В.М., Гаврилова Т.А., Терентьев В.М., Терентьев В.М., Частиков А.П., Яковлев С.А., аналіз яких надав можливість дійти висновку про необхідність урахування нечіткого характеру даних та оцінок, які використовуються при проведенні експертизи.

Більшість сучасних телекомунікаційних систем є гетерогенними і забезпечують багато сервісів, розробка таких систем вимагає постійного осмислення нових технологій, які з'являються [3, 4]. Процес проектування телекомунікаційної системи представляє собою складний багатоетапний процес формування взаємопов'язаних технічних рішень, які мають на меті створення ТКС, здатної забезпечити надання сервісів користувачам з урахуванням специфіки вимог функціонування. Специфіка вимог до перспективних ТКС обумовлюється предметною областю їх застосування. Характерним для сучасного стану створення ТКС є відставання методик, методів і способів експертизи від темпів розвитку ТКС.

Таким чином, в умовах створення перспективних ТКС різко зростає значення експертного оцінювання проекту телекомунікаційної системи. Особливо важливою є експертиза проектів телекомунікаційних систем, які створюються в інтересах державного управління, так званих телекомунікаційних систем спеціального призначення.

Процедурам проведення експертизи телекомунікаційних проектів присвячено широке коло робіт [5-9]. Аналіз цих робіт надав можливість дійти висновку про необхідність урахування нечіткого характеру даних та оцінок, які використовуються при проведенні експертизи.

З метою оцінки ефективності проектування телекомунікаційних систем необхідно приділити увагу проведенню процедури експертизи телекомунікаційних проектів. Для цього необхідно проаналізувати сутність експертизи та підходи до її проведення. Разом з тим, в процесі проведення експертизи доволі часто виникає проблема оперування інформацією, яка є нечіткою, розмитою або такою, що не може бути виражена кількісно.

Проведення експертизи доцільно в складних, проблемних ситуаціях, коли знань осіб, які відповідають за прийняття рішень буває недостатньо, або коли параметри функціонування ТКС не відповідають вимогам.

До обставин, при яких доцільно призначати експертизу, можна віднести наступні обставини:

необхідність отримання об'єктивної думки спеціаліста, який не зацікавлений у результатах;

виникнення конфліктної ситуації в сфері управління, наявність спірних пропозицій з одних і тих же пропозицій;

необхідність вирішувати проблеми, які знаходяться на стику різних галузей науки і техніки;

у ситуації, коли межі проблеми ширші меж сумарного знання;

у ситуації, коли проведення експертизи визначається нормативними документами.

Використання експертизи для вирішення спеціальних завдань повинно базуватись на таких принципах:

експертні оцінки повинні бути отримані від визнаних у відповідній галузі знань спеціалістів в максимально систематизованій формі, яка забезпечить подальше узагальнення знань;

для отримання тверджень експертів в максимально систематизованому вигляді слід ставити експертам чітко сформульовану задачу;

вибирати експертів, ставити їм задачу, узагальнювати їх твердження необхідно на основі певної методики.

Експертиза проектів телекомунікаційних систем - це комплексна, цілеспрямована інформаційно-аналітична діяльність експерта (групи експертів) телекомунікаційних проектів по оцінці якості проектних технічних рішень і формуванню пропозицій по оптимізації технічних рішень, які застосовуються в ході розробки телекомунікаційної системи.

Аналіз основних етапів розробки телекомунікаційних систем [3-7] дає підстави зауважити, що проведення експертизи проектів перспективних ТКС є складною, багатоетапною задачею, яка залежить від багатьох факторів. Для підвищення якості вирішення даної задачі слід застосовувати засоби автоматизації експертної діяльності. Експертиза, як невід'ємна частина процесу проектування телекомунікаційної системи, може здійснюватись в умовах детермінованості, стохастичності і невизначеності функціональних і



структурних параметрів ТКС та процесів інформаційного обміну. Враховуючи сказане, важливою задачею в межах проведення експертизи телекомунікаційних проектів є зниження рівня невизначеності експертних оцінок технічних рішень, які визначають побудову ТКС.

В процесі проведення експертизи формується базова система показників якості, яка дозволяє оцінити телекомунікаційний проект. Разом з тим, для підвищення адекватності експертизи базові показники якості ТКС повинні враховувати характер та рівень невизначеності вихідної інформації щодо ТКС на різних етапах проектування.

Як свідчить аналіз літератури [10-11], у процесі експертизи під час визначення показників якості функціонування ТКС експертам необхідно враховувати наступні джерела появи невизначеності:

нечітке уявлення цілі операції, що може призвести до неоднозначного трактування відповідності реального результату до запланованого;

недостатнє вивчення деяких явищ та процедур, які супроводжують процеси, що реалізовані в рамках функціонування ТКС;

висока імовірність невідомого цілеспрямованого стороннього деструктивного впливу на функціонування ТКС, яку важко оцінити та передбачити;

невизначеність, яка обумовлена неточністю математичних моделей функціонування складних ієрархічних ТКС. Така неточність може виникнути завдяки зайвій ідеалізації процесів функціонування та управління, або невірній декомпозиції ТКС. Крім того, багаторівневість ТКС може призвести до посилення невизначеності.

Враховуючи вищезазначене, постає актуальне *наукове завдання* – розроблення науково-методичного забезпечення експертизи ТКС в умовах невизначеності, яке вирішується у даній роботі. Застосування розробленого науково-методичного забезпечення надасть можливість підвищення якості експертизи ТКС – достовірності, оперативності та повноти урахування факторів, що впливають на точність експертизи.

**Зв'язок роботи з науковими роботами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження виконувалось згідно тематичного плану науково-дослідних робіт Тернопільського Національного економічного університету та Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького. Результати дисертаційного дослідження увійшли до науково-дослідних робіт, а саме: «Методика визначення раціонального складу необхідних компонентів інформаційно-телекомунікаційних систем» (звіт про НДР / НАДПСУ, № 212-0003 I); «Методика оцінки ефективності телекомунікаційної системи» (звіт про НДР / НАДПСУ, № 210-0020 I); «Методика оцінювання параметрів ІТС Державної прикордонної служби України» (звіт про НДР / НАДПСУ, № 209-1007 I); «Методика проведення експертизи телекомунікаційної мережі» (звіт про НДР / НАДПСУ, № 210-0018 I).

У рамках цих робіт здобувачем досліджено вплив невизначеностей на значення показників ефективності функціонування ТКС та розроблено науково-методичне забезпечення експертизи телекомунікаційної системи спеціального призначення, а саме методики врахування невизначеності вихідних даних при знаходженні експертних показників якості функціонування ТКС СП та методики визначення стану телекомунікаційних систем з використанням методів штучного інтелекту кластерного аналізу.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є підвищення достовірності експертизи ТКС з урахуванням невизначеності нечітких параметрів і показників функціонування.

Досягнення зазначеної мети обумовило необхідність постановки та розв'язання комплексу дослідницьких завдань:

1) проаналізувати відомі підходи щодо проведення експертизи телекомунікаційної системи та особливостей проектування перспективних телекомунікаційних систем та процесу проведення експертизи;

2) формалізувати процес функціонування телекомунікаційної системи спеціального призначення та проаналізувати характер невизначеностей, що існують на етапі проведення експертизи ТКС;

3) обґрунтувати показники якості функціонування телекомунікаційної системи спеціального призначення;

4) розробити науково-методичне забезпечення експертизи телекомунікаційної системи спеціального призначення – методики врахування невизначеності вихідних даних при знаходженні експертних показників якості функціонування ТКС СП та методики визначення стану телекомунікаційних систем з використанням методів штучного інтелекту кластерного аналізу.

5) розробити пристрій для розрахунку експертних показників якості функціонування ТКС в умовах невизначеності та провести апробацію розробленого науково-методичного забезпечення експертизи на засобах телекомунікаційної системи Державної прикордонної служби України.

*Об'єкт дослідження* – функціонування телекомунікаційних систем.

*Предмет дослідження* – науково-методичне забезпечення експертизи телекомунікаційних систем.

**Методи дослідження.** Загальною методологічною основою дослідження є діалектичний метод, що передбачає застосування методу системного підходу. Для досягнення поставленої мети в роботі використано низку загальнонаукових та спеціальних методів: абстрактно-логічний – при дослідженні сутності понять, визначень і категорій теорії побудови ТКС; комплексний підхід – при аналізі діючих та формуванні нових методологічних основ оцінки ТКС; порівняльний – при порівняльному аналізі різноманітних процесів, залежностей, тенденцій тощо; аналізу і синтезу – при дослідженні окремо кожної складової ТКС, а також в їх єдності, взаємозалежності та взаємозв'язку; методи експертних оцінок – при обґрунтуванні переліку показників якості ТКС та їх оцінювання; математичного моделювання – при формалізації процесів функціонування ТКС та розробленні математичних залежностей для показників якості ТКС.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У ході дисертаційного дослідження автором особисто отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше розроблено математичні моделі визначення показників якості ТКС, що враховують невизначеність і неповноту інформації про параметри функціонування ТКС за рахунок комплексного застосування апарату експертних оцінок, нечітких множин і моделей штучних нейронних мереж.

2. Дістала подальшого розвитку методика експертизи телекомунікаційних систем в умовах невизначеності за рахунок комплексного застосування методів та моделей теорії ймовірності, нечітких множин та штучних нейромереж, застосування якої надає можливості підвищення ефективності вузлів і пристроїв у системах радіотехніки та телекомунікацій на підставі аналізу, синтезу й оптимізації їх структурних схем і режимів роботи.

3. Удосконалено методику кластеризації телекомунікаційних систем за станом в умовах невизначеності шляхом розробки відповідних математичних моделей та методів зі стохастичною зміною окремих структурних та функціональних параметрів для підвищення продуктивності системи в цілому та удосконалення методу кластерного аналізу інформаційно-телекомунікаційних систем, в якому застосовано багатошарові нейромережі зворотного поширення.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у наступному:

запропонована методика експертизи телекомунікаційних проектів в умовах невизначеності дозволяє на етапі проектування телекомунікаційної системи оцінити її функціональні можливості та зробити висновок щодо відповідності телекомунікаційного проекту технічному завданню на його розробку;

математичні моделі для визначення показників якості функціонування телекомунікаційної системи, які запропоновані, дають можливість у межах експертизи використовувати та поєднувати як кількісні так і якісні вихідні дані, що спрощує проведення експертизи та підвищує її достовірність;

метод кластерного аналізу телекомунікаційної системи, який запропонований, дає можливість вирішувати широке коло задач вибору в умовах існування невизначеності;

з метою апаратної реалізації процедури знаходження експертних показників якості функціонування ТКС з використанням нечітких вихідних даних розроблений пристрій на основі мікроконтролера AMTELA Tmega16. Отримана нижня і верхня оцінки в програмі нормуються з приведенням до однобайтного формату і виводяться з використанням третього (PORTC – нижня оцінка) і четвертого портів (PORTD – верхня оцінка).

Запропонований науково-методичний апарат та пристрій експертизи телекомунікаційних систем дозволяє проводити експертизу телекомунікаційних систем широкого призначення та підвищити її достовірність на 18.3%. Оперативність проведення експертизи зросла на 13,6%, за повнотою врахування вихідних даних розроблені методики в 1,3-1,47 разів випереджають відомі методики.

**Особистий внесок здобувача.** Усі нові наукові результати одержано особисто автором. У статті [83] здобувачеві належить розробка концепції та методики експертизи телекомунікаційних систем; у [84] – методика урахування невизначеності вихідних даних при знаходженні експертних показників якості функціонування телекомунікаційних систем; [85] – математичні моделі показників якості телекомунікаційних систем в умовах невизначеності.

**Апробація результатів дисертації** здійснювалася шляхом оприлюднення матеріалів дослідження на науково-практичних конференціях та інших заходах, зокрема: «Побудова дерева нечіткого висновку для експертизи телекомунікаційних систем» на III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Освітньо-наукове забезпечення діяльності правоохоронних органів і військових формувань України»; «Експертиза телекомунікаційних систем в умовах невизначеності з використанням методів штучного інтелекту»; на VII Міжнародній науково-практичній конференції «Військова освіта та наука: сьогодення та майбутнє»; VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Процедури проведення експертизи телекомунікаційних систем в умовах невизначеності» (Praha, 27 ledna - 05 unora 2012 r.); VIII Міжнарод-

ній науково-практичній конференції «Підходи урахування невизначеності при розрахунку експертних показників якості функціонування телекомунікаційних систем» (Przemys, 2011 r.); «Показники якості телекомунікаційної системи для фізичного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем» на I Всеукраїнській Інтернет-конференції “Українська наука: реалії та перспективи”; «Класифікація об’єктів з використанням методів штучного інтелекту кластерного аналізу» на I Всеукраїнському школі-семінарі молодих вчених і студентів «Сучасні комп’ютерні інформаційні технології».

**Публікації.** Основні результати дослідження опубліковані у семи статтях у фахових виданнях, матеріалах шести науково-практичних конференцій, чотирьох звітах про науково-дослідні роботи.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, двох додатків. Повний обсяг дисертації – 166 сторінок, з них 145 сторінки основного тексту, 9 таблиць на 12 сторінках, 27 рисунків на 27 сторінках, двох додатків, список використаних джерел включає 112 найменувань.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ВІДОМИХ ПІДХОДІВ ЩОДО ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРТИЗИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Основу телекомунікаційних систем складають багатоканальні системи передачі по електричним, волоконно-оптичних кабелів і радіолінії, призначені для формування типових каналів і трактів. В задачі проектування ТКС важливим є етап проведення експертизи телекомунікаційного проекту, який може вплинути в кінцевому результаті на ефективність функціонування телекомунікаційної системи, що проектується.

У межах першого розділу слід проаналізувати процедуру проектування ТКС СП та процедуру проведення експертизи телекомунікаційних проектів. У межах такого аналізу слід встановити співвідношення основних етапів проектування ТКС та процедури експертизи. З метою відпрацювання науково-методичного забезпечення експертизи ТКС слід передбачити формалізацію процесу функціонування ТКС, яка проектується.

Як правило, процедура експертизи ТКС відбувається за наявності об'єктивно існуючої невизначеності яка впливає на достовірність експертизи телекомунікаційних проектів. Враховуючи сказане вище, слід проаналізувати характер невизначеності, яка існує на етапі експертизи ТКС та її вплив на результати експертизи.

#### **1.1. Аналіз особливостей проектування перспективних телекомунікаційних систем та процесу проведення експертизи**

Більшість сучасних телекомунікаційних систем є гетерогенними і забезпечують багато сервісів, розробка таких систем вимагає постійного осмислення нових технологій, які з'являються.

Основу сучасної телекомунікаційної системи складає цифрова мережа з інтеграцією служб. Така мережа представляє собою сукупність архітекту-

рно-технологічних методів і апаратно-програмних засобів доставки інформації територіально-віддаленим споживачам [12-14]. Цифрова мережа з інтеграцією служб дозволяє на єдиній цифровій основі забезпечувати різні види послуг, а саме передачу голосу, даних, факсів, електронної пошти, відео і т.д. при цьому забезпечується виконання вимог о своєчасності, достовірності і безпеки передачі.

Для ТКС спеціального призначення характерні наступні риси:

більша територіальна протяжність;

багаторівневість та забезпечення великої кількості продуктів;

коливання внутрішніх та зовнішніх параметрів;

стохастичність більшості процесів обробки інформації та необхідність їх оптимізації.

Всі наведені вище риси дозволяють віднести ТКС СП до класу складних систем.

Прикладом телекомунікаційної системи спеціального призначення може слугувати телекомунікаційна система Державної прикордонної служби (рис. 1.1).

Вона побудована за ієрархічним принципом з деревоподібною структурою зв'язків різних типів (проводових, безпроводових) між об'єктами автоматизації [8, 16, 22].



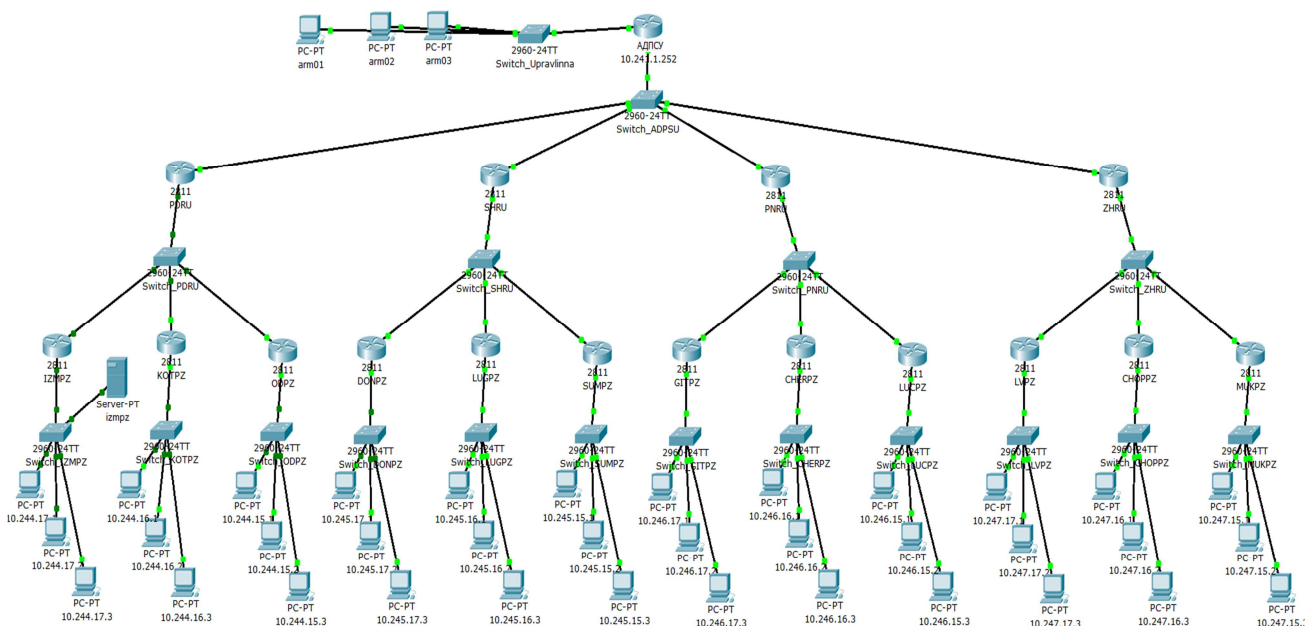


Рис. 1.1. Структурна схема телекомунікаційної мережі ДПСУ

Телекомунікаційна мережа побудована за принципом опорної мережі «зірка» (рис. 1.2), до якої підключаються органи охорони та підрозділи різних рівнів.

На сьогоднішній день впроваджені центри комутації трьох типів:

Центр комутації потоків Адміністрації ДПСУ (ЦКП);

Регіональні центри комутації потоків першого типу (ЦКП 1) – регіональних управлінь на базі підприємств „Укртелеком”;

Регіональні центри комутації потоків другого типу (ЦКП 2) – прикордонних загонів, на базі підприємств „Укртелеком”.

Центри комутації потоків утворюють магістралі телекомунікаційної мережі від ЦКП Адміністрації до обласних центрів: Львів, Одеса, Сімферополь, Харків, Житомир. До центрів комутації потоків, каналами прив'язки підключаються цифрові потоки від пунктів комутації органів та підрозділів охорони кордону (рис. 1.2).

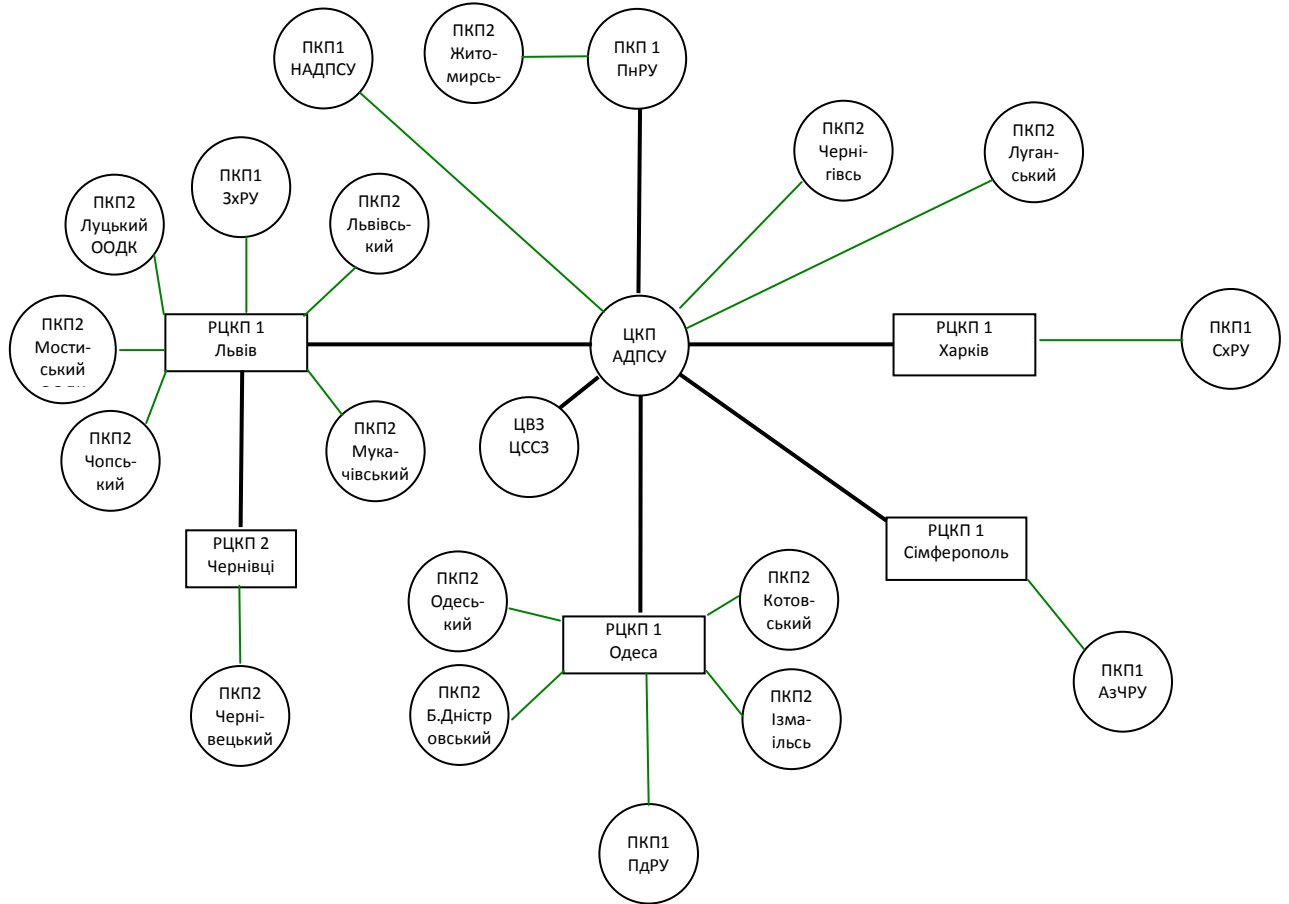


Рис. 1.2. Організація цифрової телекомунікаційної мережі ДПСУ

Безпосередньо в кожному регіональному управлінні, органі охорони кордону, підрозділах охорони кордону створюються пункти комутації цифрових потоків трьох типів: пункти комутації потоків першого типу (ПКП1) – регіональні управління, органи охорони кордону; пункти комутації потоків другого типу (ПКП2) – загони морської охорони, відділи прикордонної служби, прикордонні пости; пункти комутації потоків третього типу (ПКП3) – прикордонні пости інспекторські пости, контрольні пости.

Центри і пункти комутації потоків всіх типів створюються на базі уніфікованого обладнання, яке дає змогу будувати цифрову мережу зв'язку з гнучкою конфігурацією та можливістю подальшого розвитку, тобто без додаткових затрат нарощувати кількість цифрових потоків та телефонних розмов, а також здійснювати заміну будь-яких модулів між обладнанням центрів та пунктів комутації.

Структура ТКС включає транспортну мережу та мережу доступу, що складаються з ліній різних родів зв'язку, вузлів комутації і обчислювальних комплексів, а також термінальну (абонентську) мережу, що включає термінальні пристрої, абонентські пункти та концентратори навантаження. Невід'ємною частиною телекомунікаційної мережі є система управління.

З урахуванням прийнятої вище ієрархії підсистем ТКС загальна її структура включає дві підсистеми: підсистему інформаційного обміну і підсистему управління.

Як свідчить аналіз робіт [5,8, 12, 13, 14], ТКС СП може бути віднесена до відкритих систем і має семирівневу структуру, яка відповідає еталонній моделі взаємодії відкритих систем (табл. 1.1).

Процес проектування телекомунікаційної системи представляє собою складний багатоетапний процес формування взаємопов'язаних технічних рішень, які мають на меті створення ТКС, здатної забезпечити надання сервісів користувачам з урахуванням специфіки вимог функціонування. Специфіка вимог до перспективних ТКС обумовлюється предметною областю їх застосування.

Організація процесу проектування ТКС СП можна представити як сукупність таких етапів [3-6]:

- формування оперативно-технічних вимог, що пред'являються ТКС (розробка технічного завдання на проектування);

- розробка технічного завдання на виконання науково-дослідних робіт; вироблення основних системно-технічних рішень, які визначають вигляд ТКС у ході виконання науково-дослідних робіт;

- розробка технічної пропозиції на створення ТКС у разі виявлення нових вимог або виникнення необхідності уточнення сформованих раніше вимог до проектованої ТКС;

- розробка технічного завдання на виконання ескізного проекту ТКС;

- формування системно-технічних рішень, які прийняті в ході ескізного проектування;

розробка технічного завдання на виконання технічного проекту ТКС;  
 формування системно-технічних рішень прийнятих на етапі технічного проектування;

формування вимог на розробку конструкторської документації на ТКС, яка проектується;

розробка конструкторської документації, виготовлення дослідних зразків, проведення автономних і системних випробувань ТКС;

усунення недоліків, виявлених в ході проведення випробувань і повторне проведення випробувань ТКС.

*Таблиця 1.1*

Функціональний склад еталонної моделі взаємодії відкритих систем

Рівень	Функції
Прикладний	Встановлення, підтримання, розрив з'єднання між логічними об'єктами адміністративного управління контроль стану, збір статистики, захист від помилок
Представницький	Запит на встановлення (завершення) сеансу, передача даних, перетворення даних. На цьому рівні може здійснюватися стиснення/розпакування або кодування/декодування даних, а також перенаправлення запитів іншому мережевому ресурсу, якщо вони не можуть бути оброблені локально
Сеансовий	Встановлення і розрив транспортного з'єднання, передача даних з реалізацією функцій захисту від помилок, синхронізація завдань, визначення права на передачу даних і підтримку сеансу в періоди не активності взаємодії
Транспортний	Встановлення і розрив транспортного з'єднання. Призначений для доставки даних без помилок, втрат і дублювання в тій послідовності, як вони були передані. Забезпечення пропускну здатності і достовірності каналів
Мережевий	Встановлення і розрив мережевого з'єднання. Відповідає за трансляцію логічних адрес й імен у фізичні, визначення найкоротших маршрутів, комутацію й маршрутизацію пакетів, відстеження неполадок і заторів у мережі, підтримання заданої якості послуг
Канальний	Встановлення і розрив каналного з'єднання, синхронізація, виявлення і виправлення помилок, передача даних, управління потоком даних і перемиканням каналів, адміністративне управління
Фізичний	Встановлення і розрив фізичного з'єднання, здійснення передачі електричних або оптичних сигналів у кабель і відповідно їхній прийом і перетворення в біти даних відповідно до методів кодування цифрових сигналів.

Характерним для сучасного стану створення ТКС є відставання методик, методів і способів експертизи від темпів розвитку ТКС.

Таким чином, в умовах створення перспективних ТКС різко зростає значення експертного оцінювання проекту телекомунікаційної системи. Особливо важливою є експертиза проектів телекомунікаційних систем, які створюються в інтересах державного управління, так званих телекомунікаційних систем спеціального призначення.

Розробка телекомунікаційної системи спеціального призначення, враховуючи задачі, які вона вирішує, повинна проводитись вітчизняними інтеграторами. В свою чергу, діяльність замовника зводиться до участі у розробці та погодження технічних завдань, експертизи проекту ТКССП (системно-технічних рішень), організації та про ведення випробувань та дослідної експлуатації. З іншого боку, зростає ступінь невизначеності щодо здійсненості оперативно-технічних вимог на баз і пропонованого виробниками телекомунікаційного обладнання, технічні характеристики якого далеко не завжди відповідають рекламованим.

У цих умовах різко зростає значення експертної діяльності проекту ТКССП. Узагальнена схема взаємозв'язку процесів розробки та експертизи проектів ТКССП представлена нарис.1.3.

З метою оцінки ефективності проектування телекомунікаційних систем необхідно приділити увагу проведенню процедури експертизи телекомунікаційних проектів. Для цього необхідно проаналізувати сутність експертизи та підходи до її проведення.

В першу чергу слід визначитись з основними термінами. Експертиза – дослідження спеціалістом (експертом) питань, вирішення яких потребує спеціальних знань в області науки, техніки, мистецтва тощо [15].

Проведення експертизи доцільно в складних, проблемних ситуаціях, коли знань осіб, які відповідають за прийняття рішень буває недостатньо, або коли параметри функціонування ТКС не відповідають вимогам.

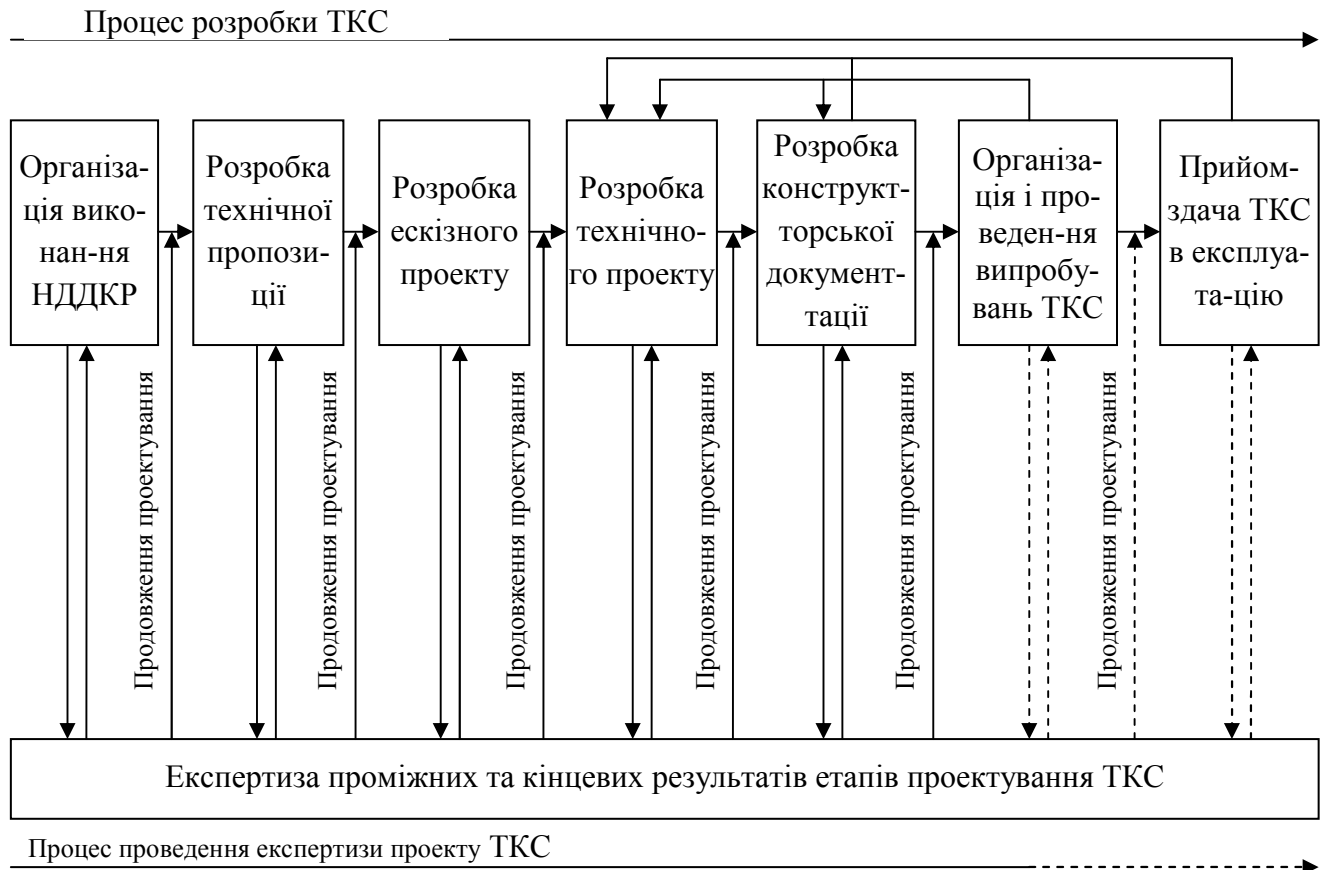


Рис. 1.3. Загальна схема взаємозв'язку процесів розробки ТКС та експертизи проектних рішень

До обставин, при яких доцільно призначати експертизу, можна віднести наступні обставини:

- необхідність отримання об'єктивної думки спеціаліста, який не зацікавлений у результатах;

- виникнення конфліктної ситуації в сфері управління, наявність спірних пропозицій з одних і тих же пропозицій;

- необхідність вирішувати проблеми, які знаходяться на стику різних галузей науки і техніки;

- у ситуації, коли межі проблеми ширші меж сумарного знання;

- у ситуації, коли проведення експертизи визначається нормативними документами.

Використання експертизи для вирішення спеціальних завдань повинно базуватись на таких принципах:

експертні оцінки повинні бути отримані від визнаних у відповідній галузі знань спеціалістів в максимально систематизованій формі, яка забезпечить подальше узагальнення знань;

для отримання тверджень експертів в максимально систематизованому вигляді слід ставити експертам чітко сформульовану задачу;

вибирати експертів, ставити їм задачу, узагальнювати їх твердження необхідно на основі певної методики.

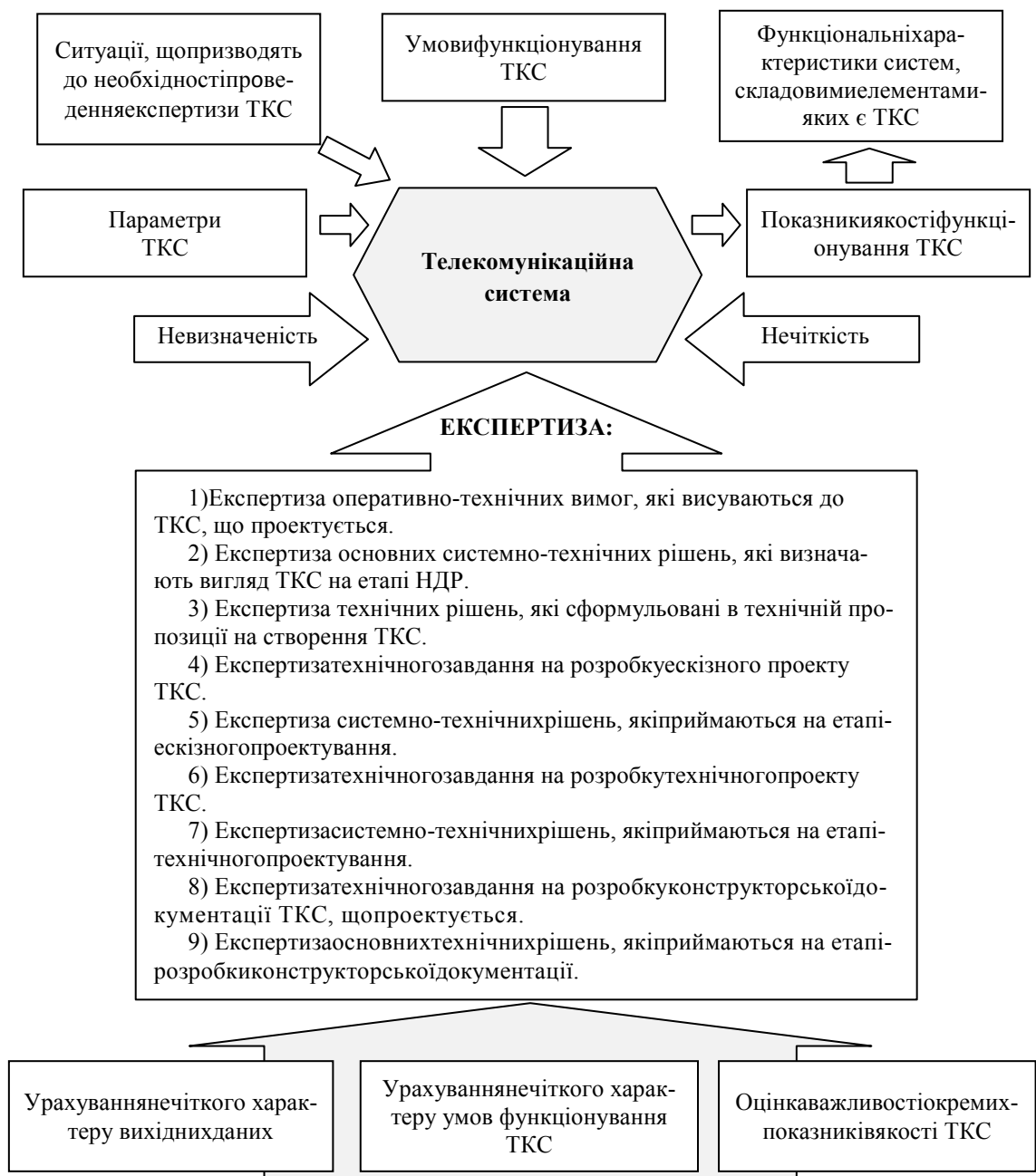


Рис. 1.4. Основні етапи експертизи телекомунікаційних проектів

Експертиза проектів телекомунікаційних систем – це комплексна, цілеспрямована інформаційно-аналітична діяльність експерта (групи експертів) телекомунікаційних проектів по оцінці якості проектних технічних рішень і формуванню пропозицій по оптимізації технічних рішень, які застосовуються в ході розробки телекомунікаційної системи.

Аналіз основних етапів розробки телекомунікаційних систем [3-6] дає підстави зауважити, що проведення експертизи проектів перспективних ТКС є складною, багатоетапною задачею, яка залежить від багатьох факторів. Для підвищення якості вирішення даної задачі слід застосовувати засоби автоматизації експертної діяльності.

Експертиза є невід’ємною частиною проектування ТКС і може представляти багатоетапний процес (рис. 1.4). Експертиза, як невід’ємна частина процесу проектування телекомунікаційної системи, може здійснюватись в умовах детермінованості, стохастичності і невизначеності функціональних і структурних параметрів ТКС та процесів інформаційного обміну.

Враховуючи сказане, важливою задачею в межах проведення експертизи телекомунікаційних проектів є зниження рівня невизначеності експертних оцінок технічних рішень, які визначають побудову ТКС. В процесі проведення експертизи формується базова система показників якості, яка дозволяє оцінити телекомунікаційний проект. Разом з тим, для підвищення адекватності експертизи базові показники якості ТКС повинні враховувати характер та рівень невизначеності вихідної інформації щодо ТКС на різних етапах проектування.

Експертиза телекомунікаційних проектів є важливим етапом в процесі розробки ТКС, який у значній мірі впливає на якість телекомунікаційних систем, що розробляються. Експертиза проводиться практично на кожному етапі розробки ТКС і представляє собою складну процедуру, яка здійснюється в умовах об’єктивно існуючої невизначеності. Врахування умов неви-



значеності повинно забезпечити підвищення адекватності та достовірності експертизи ТКС.

## **1.2. Формалізація процесу функціонування телекомунікаційної системи а аналіз характеру невизначеності, яка існує на етапі проведення експертизи**

Проектування ТКС СП являє собою складний багатоетапний процес формування взаємопов'язаних технічних рішень, спрямованих на створення телекомунікаційної системи, здатної забезпечити надання послуг користувачам і враховує специфіку вимог до систем спеціального призначення.

Для вирішення завдання оцінки експертних показників якості необхідно створити модель процесу функціонування ТКС СП. При цьому, дана модель повинна враховувати особливості реалізації в системі того чи іншого технічного рішення, прийнятого в ході проектування ТКС СП.

Організація експертної діяльності передбачає, що за етапом розробки моделі процесу функціонування проектованої ТКС СП підетап формування експертних оцінок. Цей етап є визначальним для формування того чи іншого проектного рішення і тим не менш характеризується високою суб'єктивністю та наявністю невизначеностей.

ТКС СП відноситься до класу цілеспрямованих складних систем [5, 17, 18], в яких поряд з системою інформаційного обміну (СІО), що включає станції, вузли та лінії передачі інформації, функціонує взаємопов'язана з нею система управління (СУ), яка створюється з метою управління елементами системи інформаційного обміну і складається з центру, станцій контролю та управління, каналів управління між елементами системи управління. Процес функціонування ТКС можна представити узагальненою схемою, представленою на рис.1.5.

Процедура формалізованого опису сучасних телекомунікаційних систем разом з широким використанням ключових положень системного підхо-

ду повинна враховувати ряд сучасних проблемних питань, які характерні для сучасних ТКС.

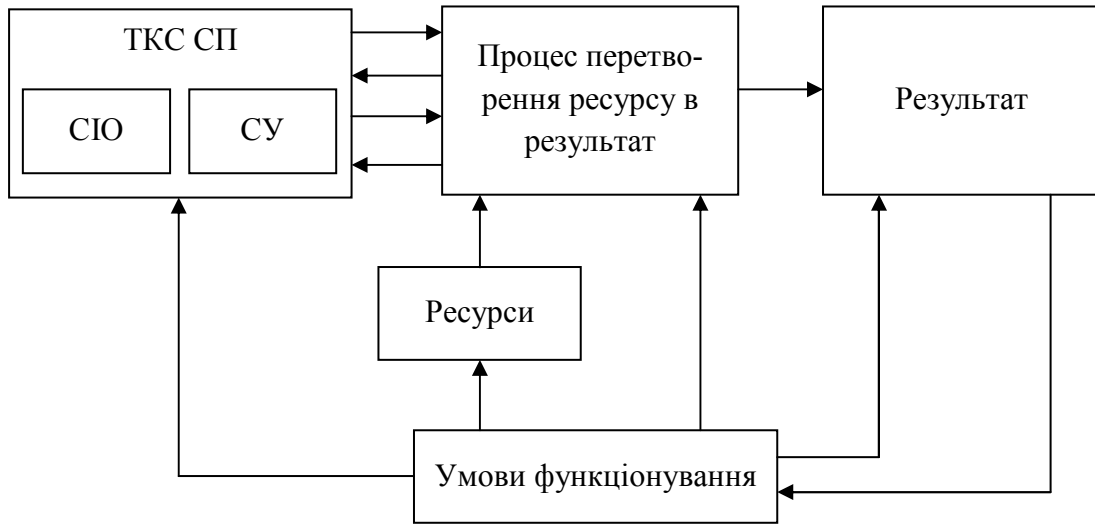


Рис. 1.5. Узагальнена структурна схема процесу функціонування ТКС СП

Серед цих проблемних питань слід виділити такі:

визначення рівнів розгляду властивостей системи у відповідності до еталонної моделі взаємодії відкритих систем;

врахування ролі і місця ТКС у загальній ієрархії подібних систем;

врахування мультисервісності і міжмережевої взаємодії мереж і способів відображення ієрархії як самої системи так і сервісів, які вона забезпечує;

врахування взаємодії окремих підсистем та взаємопов'язування їх властивостей.

Проаналізуємо ті причини, які призводять до появи невизначеності в процесі експертизи телекомунікаційних проектів.

Формалізуємо ступені невизначеності, які мають місце в процесі експертизи ТКС у вигляді, представленому на рис. 1.6.

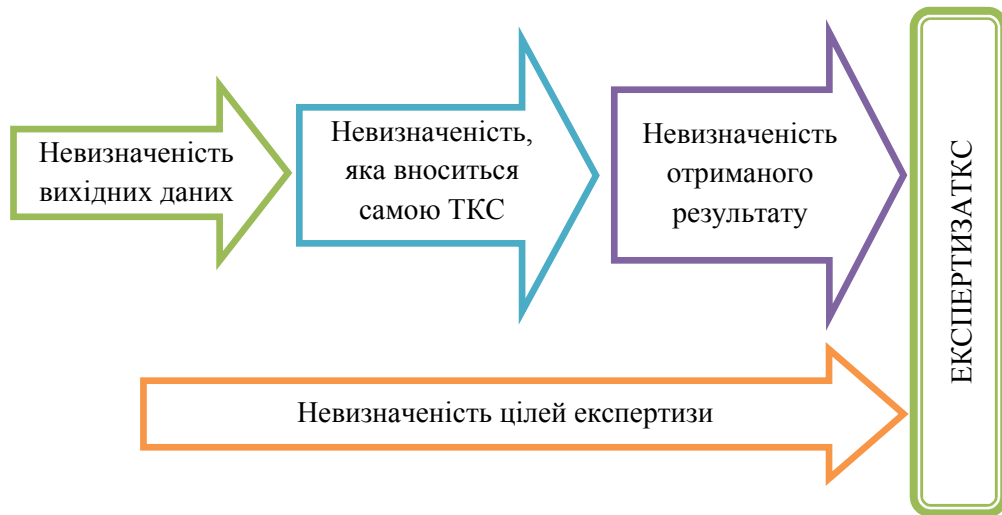


Рис. 1.6. Формалізація ступенів невизначеності в процедурі експертизи ТКС

З рис.1.6 видно, що на отримання результату експертизи впливають причини як зовнішнього характеру (вихідні дані), так і проблеми внутрішнього середовища проведення експертизи.

Проаналізуємо причини виникнення невизначеності на кожному рівні. В якості вихідних даних, які використовуються в процесі експертизи, можуть використовуватись як кількісні так і якісні дані.

До причин формування невизначеності кількісних даних віднесемо наступні причини:

- неможливість визначення або вимірювання значень величин із заданою точністю,

- наявністю похибок вимірювань або визначення вихідних даних;

- наявністю похибок в процесі можливого округлення даних.

Спроба зниження впливу наведених вище причин появи невизначеності може призвести до переходу від кількісних даних до якісних.

Як свідчить аналіз [19, 21, 23, 24], будь-яку кількісну величину можна представити у якісному вигляді. Перехід від кількісної величини до якісної дає можливість визначити чітке символічне значення вхідної величини, але за чітким символічним значенням може міститись семантична невизначеність.

Окрім наведеної вище, причиною переходу від кількісних даних до якісних може бути недоцільність визначення даних з точністю, яка перевищує визначений поріг точності для задачі, яка вирішується.

Задана точність вихідних даних визначає тип шкали, яку слід використовувати для вимірювання. В наукових дослідженнях отримали розповсюдження наступні типи шкал: абсолютна шкала, шкала відношень, шкала інтервалів, шкала порядку і шкала найменувань [25, 26].

Перші три шкали містять кількісні дані і є найбільш інформативними. Абсолютна шкала може бути використана для запису кількості елементів в деякій кінцевій множині. Шкали відношень і шкали інтервалів використовуються для вимірювання ваг, довжин, температур.

Шкали порядку і найменувань в меншій степені інформативні і застосовуються для представлення якісних даних. Шкала порядку зберігає лише порядок слідування значень величин, тобто інформацію типу «більше», «менше», «дорівнює».

Шкала найменувань ще менш інформативна, ніж шкала порядку. Дана шкала утримує інформацію щодо відношень «дорівнює» та «не дорівнює». По такій шкалі можна отримати інформацію лише про наявність або відсутність певної властивості у об'єкті.

Важливим завданням є завдання вибору необхідної шкали, яке може призвести до виникнення двох ситуацій:

вибрана більш інформативна шкала, ніж вимагається;

вибрана менш інформативна шкала, ніж вимагається.

В першому випадку використання більш інформативної шкали призведе до того, що вихідні дані набувають більшої ніж необхідно детальності, що в свою чергу, призведе до збільшення витрат часу на обробку даних і процедура збору вихідних даних стає більш складною. Іншим наслідком такого вибору шкал є те, що вихідні дані стають більш уразливими до випадкових коливань, що підвищує ризик прийняття некоректних рішень.

Підсумовуючи сказане вище, можна зробити наступний висновок: якщо точність вихідних даних, яка вимагається, для конкретної задачі є невисокою, то слід переходити від кількісних шкал до якісних.

В другому випадку вибрана шкала менш інформативна ніж вимагається. Це призводить до неможливості отримання результату з заданою точністю.

Невизначеність, яка вноситься самою системою на рівні структури та функціонування теж впливаю на формування загальної невизначеності процедури експертизи.

Телекомунікаційна система як складна система може бути представлена у вигляді «трійки»  $\langle N, F, R \rangle$ , де  $N$  – елементи системи,  $F$  – властивості елементів системи,  $R$  – відношення між елементами системи.

Для кожної складової «трійки» можлива нечіткість структури системи, нечіткість параметрів елементів системи, нечіткість відношень між елементами в середині системи.

Нечіткість структури системи виникає, коли відсутня повна інформація про систему або система складна настільки, що неможливо скласти її точний детермінований опис.

Нечіткість параметрів елементів системи може виникати у наступних випадках:

нечіткість кількості і видів ознак, за якими описуються елементи системи;

нечіткість значень параметрів, за якими описуються елементи системи.

Нечіткість відношень між елементами системи також може мати два види:

невизначеність в наявності зв'язків між елементами системи;

нечіткість виникає в степені пов'язаності елементів між собою.

Нечіткість результатів формується на основі нечіткості вихідних даних та нечіткості, яка вноситься системою.

Представлення результатів та їх нечіткість визначаються умовами функціонування системи і вибір точності результатів зводиться до вибору шкали для представлення результатів.

Виходячи зі сказаного вище, в процесі отримання результату експертизи в умовах невизначеності можуть бути застосовані два підходи:

визначення максимально досяжної чіткості результату при відомій нечіткості вихідних даних і нечіткості функціонування ТКС (пряма задача);

цілеспрямоване формування внутрішнього та вхідного простору таким чином, щоб досягти максимально допустимої нечіткості вихідного результату (зворотна задача).

Враховуючи високий ступінь відповідальності щодо результатів експертизи, їх надійності та достовірності слід зауважити що вирішення зворотної задачі є більш важливим.

Разом з тим, нечіткість вихідного простору суттєво залежить від нечіткості, яка може бути внесена підчас формування мети експертизи ТКС.

Процедурі проведення експертизи ТКС передуює етап формування та визначення цілей та задач, яким повинна відповідати експертиза. Як правило, цілі та задачі експертизи формує замовник, або на проміжних етапах створення ТКС такі цілі та задачі формуються розробником. До формулювання цілей та задач експертизи ТКС можуть залучатись експерти.

Це означає, що в процесі формування цілей та задач може мати місце суб'єктивність, яка вноситься експертом. Тобто невизначеність, яка має місце в процедурі експертизи, може формуватись вже на етапі визначення цілей та задач експертизи. Визначимо таку невизначеність як невизначеність цілей експертизи.

Всі наведені вище види невизначеності впливають на отримання в процедурі експертизи достовірних результатів і повинні враховуватись на етапі її проведення.

Традиційно невизначеність прийнято ототожнювати з випадковістю, при цьому передбачається, що невизначені параметри системи розподілені у

відповідності з деякими частотними розподілами. Для побудови останніх найчастіше використовують метод статистичних випробовувань. На практиці в процесі проведення експертизи лише деякі невизначені параметри можуть бути задані у вигляді частотних розподілів, більшість параметрів не можуть бути представлені в такій формі завдяки ненадійності або відсутності необхідної для цього інформації. У той же час в більшості випадків на основі нормативних документів, досвіду та інтуїції вдається оцінити крайні (нижні й верхні) можливі значення невизначених параметрів, а також області їх найбільш імовірних (очікуваних, припустимих) значень.

Таким чином, аналізуючи можливість використання теорії імовірності для врахування невизначеності можна виділити наступні основні недоліки такого підходу:

теорія імовірності не дає відповіді на питання, як комбінувати імовірність з кількісними даними;

призначення ймовірностей певним подіям вимагає додаткової інформації, якої в особи, що проводить моделювання, може не бути;

теорія ймовірностей не має засобів для кількісної оцінки таких понять, як «в більшості випадків», «високий рівень» та ін.;

методи теорії ймовірностей вимагають давати точні оцінки тим величинам, які не завжди можуть бути точно оцінені;

для отримання достатньо плавних частотних розподілів необхідно провести велику кількість досліджень, що вимагає збільшення часових та обчислювальних ресурсів, що, у свою чергу, негативно впливає на оперативність проведення моделювання. Збільшення кількості вихідних даних спричиняє ще більший негативний вплив на оперативність.

Враховуючи перелічені вище недоліки, зробимо висновок про неадекватність методів теорії імовірності для використання в задачах, в яких представляються невизначеності у знаннях та даних.

Для вирішення подібних задач все частіше використовують методи теорії нечітких множин [19, 21, 23, 24, 27, 28]. Ці методи можуть охоплюва-

ти всі можливі варіанти рішень, здатні формалізувати способи представлення та формулювання людських знань, значно простіше та швидше визначати інтервали знаходження величини, що розраховується.

Обробка нечіткої інформації забезпечується застосуванням лінгвістичного підходу. В рамках лінгвістичного підходу в якості значень змінних допускаються не лише числа, але і слова, і речення природною мовою, а апаратом для їх формалізації слугує теорія нечітких множин.

Формалізація нечітких понять і відношень професійної мови експерта при використанні лінгвістичного підходу забезпечується введенням таких понять як нечітка та лінгвістична змінна, нечітка множина та нечітке відношення.

Перші два поняття забезпечують перехід від символічних значень величини до її числових значень, два останніх є засобом числової формалізації нечітких понять та відношень [27, 28, 29].

Використання теорії нечітких множин для врахування умов невизначеності в процедурі проведення експертизи забезпечує наступні переваги:

адекватність представлення нечітких даних;

простота методів у порівнянні з методами теорії ймовірності, в якій необхідно мати великий статистичний матеріал і складні обчислення для отримання значень ймовірностей різних подій;

адаптивне наближення при збереженні необхідної точності.

У подальшому дослідженні слід розробити підходи до врахування основних проявів невизначеності та врахування їх в процесі проведення експертизи телекомунікаційних систем спеціального призначення.

### **1.3. Постановка завдань дослідження. Вибір концепції дослідження**

Аналіз розвитку сучасних телекомунікаційних систем, процес їх проектування і створення свідчить, що проведення експертизи телекомунікацій-



них проектів є важливою умовою досягнення якості функціонування ТКС, що проектується.

Враховуючи викладене вище, сформулюємо основні задачі дослідження.

До основних задач дослідження віднесемо наступні задачі:

аналіз математичних методів для адекватного врахування різних видів невизначеності, які виникають в процесі проведення експертизи ТКС, що проектується;

розробка математичних моделей для визначення експертних показників якості функціонування ТКС та її підсистем з урахуванням умов невизначеності;

розробка науково-методичного апарату класифікації телекомунікаційних проектів в межах експертизи ТКС СП на основі методів кластерного аналізу та з урахуванням нечіткого характеру вихідних даних;

проведення апробації розробленого науково-методичного забезпечення експертизи ТКС на прикладах ІТС правоохоронних органів.

Загальна концепція наукового дослідження представлена на рис.1.7.

Однією з важливих задач дослідження є формування системи показників якості функціонування телекомунікаційної системи спеціального призначення.

До особливостей глобальної системи показників якості можна віднести такі особливості:

системи показників якості для діючих і ТКС, які проектуються, можуть співпадати. Різниця між системами показників проявляється на рівні локальних систем показників якості;

різниця в глобальній системі показників якості проявляється між задачами проектування ТКС та задачами експертизи проектів ТКС.



Рис. 1.7. Загальна концепція наукового дослідження

Серед локальних систем показників якості провідну роль займає система показників якості процесу інформаційного обміну, яка включає в себе час доставки повідомлення  $t_d(t)$ , коефіцієнт достовірності повідомлення  $K_{\text{дос}}(t)$  та вектор витрат ресурсів на доставку повідомлення  $\vec{F}_{\text{рес.іо}}(t)$ :

$$\vec{F}_{\text{іо}}(t) = [t_d(t); K_{\text{дос}}(t); \vec{F}_{\text{рес.іо}}(t)]^T. \quad (1.1)$$

Локальна система показників якості управління має більш низький рівень ієрархії по відношенню до системи показників якості інформаційного обміну. Ця локальна система включає в себе тривалість циклу управління параметрами ТКС при порушенні нормального функціонування  $T_{\text{пу}}(t)$ , коефіцієнт ефективності управління  $K_{\text{еу}}(t)$  та вектор витрат ресурсів управління  $\vec{F}_{\text{рес.у}}(t)$ :

$$\vec{F}_{\text{у}}(t) = [T_{\text{пу}}(t); K_{\text{еу}}(t); \vec{F}_{\text{рес.у}}(t)]^T. \quad (1.2)$$

Два основних елементи ТКС система інформаційного обміну і система управління є технічною базою процесів інформаційного обміну і управління.

Ієрархія локальної системи показників якості системи інформаційного обміну і системи управління визначається ієрархією процесів, які забезпечуються цими системами. Локальні системи показників якості системи інформаційного обміну і системи управління містять аналогічні складові:

$$\begin{aligned}\vec{F}_{\text{cio}}(t) &= [M_{\text{пр.сio}}(t); M_{\text{ст.сio}}(t); M_{\vec{F}_{\text{рес.сio}}}(t)]^T, \\ \vec{F}_{\text{cy}}(t) &= [M_{\text{ш.сy}}(t); M_{\text{ст.сy}}(t); M_{\vec{F}_{\text{рес.сy}}}(t)]^T,\end{aligned}\quad (1.3)$$

де  $M_{\text{пр.сio}}(t), M_{\text{ш.сy}}(t)$  – матриці пропускних здатностей напрямків передачі інформації системи інформаційного обміну і швидкодії елементів системи управління відповідно;

$M_{\text{ст.сio}}(t), M_{\text{ст.сy}}(t)$  – матриці параметрів стійкості елементів системи інформаційного обміну і системи управління відповідно;

$M_{\vec{F}_{\text{рес.сio}}}(t), M_{\vec{F}_{\text{рес.сy}}}(t)$  – матриці витрат ресурсів на функціонування системи інформаційного обміну і системи управління.

Загальний алгоритм формування оцінок значень експертних показників якості ТКС СП, яка проектується, можна представити у наступному вигляді:

1) розробка математичних моделей показників якості, які враховують специфіку технічних рішень, що реалізуються на фізичному, каналному та мережевому рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем;

2) розробка оптимальних експертних систем показників якості;

3) доопрацювання статичних моделей показників якості, які увійшли у експертні системи показників якості, до можливості врахування динаміки процесів функціонування ТКС, що проектується;

4) оцінка значень експертних показників якості при реалізації технічних рішень у межах ТКС, що проектується.

До вихідних даних, необхідних для формування експертних оцінок якості ТКС СП, що проектується, будемо відносити:

вимоги до узагальненого експертного показника якості і окремих систем показників якості;

схему інформаційного обміну ТКС, яка пропонується розробниками;  
 можливі варіанти впливів на ТКС з боку середовища розповсюдження і систем протидії з набором технічних характеристик для кожного варіанта;  
 структуру системи управління ТКС, яка пропонується розробниками;  
 відомості щодо методів модуляції, комутації, мультиплексування і маршрутизації, які прийняті до реалізації на фізичному, каналному і мережевому рівні еталонної моделі;

діапазон зміни параметрів навантаження ТКС від користувачів;  
 допустимий діапазон зміни параметрів, що управляються;  
 алгоритми управління і їх характеристики.

Формування узагальнених вихідних даних дає змогу експертам ввести і визначити:

перелік експертних показників якості;  
 перелік вимог до показників якості;  
 сукупність одномірних законів щільностей розподілу ймовірностей, формули для розрахунку значень експертних показників якості і узагальненого експертного показника якості ТКС.

Загальний алгоритм знаходження узагальненого експертного показника якості ТКС складається з таких етапів:

1. Визначення ймовірності виконання вимог до показників якості системи управління ТКС  $P_{\text{вик.су}} = P(\vec{F}_{\text{су}} \leq \vec{F}_{\text{су.необ}})$ .

2. Визначення ймовірності виконання вимог до якості управління інформаційним обміном  $P_{\text{вик.у}} = P[(\vec{F}_{\text{су}} \leq \vec{F}_{\text{су.необ}}) | A_1]$ , умовної за подією  $A_1: \vec{F}_{\text{су}} \leq \vec{F}_{\text{су.необ}}$ .

3. Визначення ймовірності виконання вимог до показників якості системи інформаційного обміну ТКС  $P_{\text{вик.сіо}} = P[(\vec{F}_{\text{сіо}} \leq \vec{F}_{\text{сіо.необ}}) | A_1, A_2]$ , умовної за подіями  $A_1, A_2: \vec{F}_{\text{у}} \leq \vec{F}_{\text{у.необ}}$ .

4. Визначення ймовірності виконання вимог до показників якості інформаційного обміну  $P_{\text{вик.іо}} = P[(\vec{F}_{\text{іо}} \leq \vec{F}_{\text{іо.необ}}) | A_1, A_2, A_3]$ , умовної за подіями  $A_1, A_2, A_3: \vec{F}_{\text{сіо}} \leq \vec{F}_{\text{сіо.необ}}$ .

5. Визначення ймовірності виконання всіх поставлених перед ТКС СП задач  $P_{\text{вик.ф}} = P_{\text{вик.іо}} P_{\text{вик.сіо}} P_{\text{вик.у}} P_{\text{вик.су}}$  і оцінка функціонування перспективної ТКС по критерію  $P_{\text{вик.ф}} > P_{\text{вик.ф.необ}}$ .

6. Повторення етапів 1-5 з метою реалізації альтернативних технічних рішень, визначення максимального значення узагальненого експертного показника якості з варіантів, які задовольняють умовам критерію.

Таким чином, вирішення задачі реалізується не у вигляді звичайного перемноження ймовірностей, а шляхом послідовного вирахування ймовірностей, починаючи з останнього безумовного елемента.

Задача щодо адекватного врахування різних видів невизначеності, які виникають в процесі проведення експертизи ТКС, що проектується складається з декількох часткових, а саме:

врахування умов невизначеності в процесі знаходження математичних моделей експертних показників якості функціонування ТКС СП;

врахування умов невизначеності в процесі визначення важливості експертних показників якості функціонування ТКС СП;

врахування початкових умов проектування ТКС, які характеризуються неповною та (або) суперечливою вихідною інформацією.

Враховуючи нечіткість та слабку структурованість задачі визначення важливості експертного показника якості функціонування ТКС в системі показників якості, її можна представити кортежем:

$$\langle S, X, Y_X, P, A, A_X, D \rangle, \quad (1.4)$$

де  $S$  – множина критеріїв оцінки показника якості;

$X$  – множина характеристик оцінюваних показників якості;

$Y_X$  – множина припустимих значень характеристик показників якості;

$P$  – система переваг, що задає відносини між множинами  $S, X, Y_X$ ;

$A, A_X$  – множина показників й оцінок їх характеристик;

$D$  – вирішальне правило:  $D: A \rightarrow [0, 1]$ .

Потрібно знайти вирішальне правило  $D$ , що забезпечує одержання оцінок важливості експертних показників якості з одиничного інтервалу.

### **Висновки з розділу**

Створення та розвиток телекомунікаційної системи має важливе значення для здійснення інформатизації суспільства. Сучасна ТКС представляє собою складну систему, яка забезпечує цілу низку сервісів і надає певний перелік послуг користувачам, які працюють з інформацією.

Телекомунікаційні системи спеціального призначення в порівнянні із звичайними системами мають свої характерні риси, а саме: більшу територіальну протяжність; багаторівневість та забезпечують велику кількість сервісів; для цих систем характерно коливання внутрішніх та зовнішніх параметрів; для ТКС СП характерна стохастичність більшості процесів обробки інформації та необхідність їх оптимізації.

Організація процесу проектування ТКС СП представляється сукупністю певних етапів: організація виконання НДДКР, розробка технічної пропозиції; розробка ескізного проекту; розробка технічного проекту; розробка конструкторської документації; організація і проведення випробувань ТКС; прийом-здача ТКС в експлуатацію. Для забезпечення реалізації проектних рішень, які б відповідали вимогам до функціонування ТКС, практично на кожному етапі проектування ТКС слід організовувати та проводити експертизу телекомунікаційних проектів.

Характерним для сучасного етапу створення ТКС СП є відставання методик, методів і способів експертизи від темпів розвитку ТКС.

Таким чином, в умовах створення перспективних ТКС різко зростає значення експертного оцінювання проекту телекомунікаційної системи.

Особливо важливою є експертиза проектів телекомунікаційних систем, які створюються в інтересах державного управління.

Аналіз основних етапів розробки телекомунікаційних систем свідчить, що проведення експертизи проектів перспективних ТКС є складною, багатоетапною задачею, яка залежить від багатьох факторів і може здійснюватись в умовах детермінованості, стохастичності і невизначеності функціональних і структурних параметрів ТКС та процесів інформаційного обміну. Для підвищення якості вирішення даної задачі слід застосовувати засоби автоматизації експертної діяльності.

Завдання оцінки експертних показників якості функціонування ТКС вимагає створити модель процесу функціонування ТКС. При цьому, дана модель повинна враховувати особливості реалізації в системі того чи іншого технічного рішення, прийнятого в ході проектування ТКС СП.

Аналіз процесу функціонування ТКС СП дозволив виділити у складі телекомунікаційної системи дві основні підсистеми, а саме: систему інформаційного обміну, що включає станції, вузли та лінії передачі інформації та взаємопов'язану з нею систему управління, яка створюється з метою управління елементами системи інформаційного обміну і складається з центру, станцій контролю та управління, каналів управління між елементами системи управління.

Аналіз процесу проектування ТКС СП показав, що практично на кожному етапі проектування в процесі організації експертизи проектних рішень у більшості випадків складно чітко (кількісно) визначити вихідні дані, що в свою чергу, впливає на достовірність отриманих в ході експертизи результатів.

До причин формування невизначеності кількісних даних віднесемо наступні причини: неможливість визначення або вимірювання значень величин із заданою точністю; наявністю похибок вимірювань або визначення вихідних даних; наявність похибок в процесі можливого округлення даних.

Виходячи зі сказаного вище, в процесі отримання результату експертизи в умовах невизначеності можуть бути застосовані два підходи: визначення максимально досяжної чіткості результату при відомій нечіткості вихідних даних і нечіткості функціонування ТКС (пряма задача); цілеспрямоване формування внутрішнього та вхідного простору таким чином, щоб досягти максимально допустимої нечіткості вихідного результату (зворотна задача).

Враховуючи високий ступінь відповідальності щодо результатів експертизи, їх надійності та достовірності слід зауважити що вирішення зворотної задачі є більш важливим.

Таким чином, важливим завданням є розробка концепції експертизи телекомунікаційних проектів в умовах існування невизначеності (нечіткості) вихідних даних для її проведення та забезпечення необхідного рівня функціонування телекомунікаційної системи спеціального призначення.



## РОЗДІЛ 2

### ОБҐРУНТУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Для організації та проведення експертизи телекомунікаційної системи необхідно сформувавши систему показників якості, які будуть підлягати оцінюванню в ході експертизи та розробити математичні моделі їх розрахунку.

#### 2.1. Показники якості функціонування телекомунікаційної системи для фізичного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем

Телекомунікаційна система представляє собою складну систему [13, 30-32], яка характеризується сукупністю властивостей. Кожна з цих властивостей може бути описана за допомогою деякої змінної, значення якої характеризує міру якості цих властивостей. Змінну, яка представляє собою числову характеристику або функції будемо називати частковим показником якості ТКС.

Отже, частковим показником якості телекомунікаційної системи будемо вважати кількісну або якісну характеристику одного або декількох властивостей ТКС, які складають якість системи і розглядаються відповідно до певних умов створення та використання ТКС. Якістю системи будемо вважати властивість або сукупність властивостей ТКС, які обумовлюють її придатність до використання за призначенням.

Враховуючи те, що якість ТКС можна оцінити лише за сукупністю властивостей, стан ТКС в будь-який момент часу можна описати з використанням векторного показника якості:

$$\vec{F}(t) = [f_1(t), \dots, f_m(t)], (2.1)$$

де  $f_1(t), \dots, f_m(t)$  – компоненти векторного показника якості, які характеризують найбільш важливі властивості ТКС і процесу їх функціонування.

В роботі [14] запропоновано метод формування системи показників якості, який пропонує, ґрунтуючись на математичних методах теорії декомпозиції (факторизації, функціональної та параметричної декомпозиції), формувати сукупність ієрархічно пов'язаних локальних систем показників якості, які забезпечують вирішення задачі оцінки ефективності та враховують поточні імовірнісні характеристики часткових показників ефективності функціонування. При реалізації запропонованого підходу передбачається, що локальні показники якості нижчого рівня ієрархії деталізують внутрішні властивості системи, а глобальна система показників якості описує зовнішні властивості ТКС СП. Ієрархія локальних показників якості визначається домінуючим значенням процесу інформаційного обміну над іншим процесом - управлінням цим обміном.

Однак представлений в роботі [14] метод не дозволяє врахувати особливості фізичного, каналного і мережевого рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем і потребує подальшого вдосконалення.

Таким чином, визначимось з показниками якості функціонування ТКС для фізичного, каналного та мережевого рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

Система експертних показників для проведення експертизи телекомунікаційної системи представлена на рис. 2.1.

Фізичний рівень забезпечує передачу бітів даних по фізичним каналам зв'язку. Цей рівень є базовим для ТКС і його основними функціями є встановлення (роз'єднання) з'єднання та визначає інтерфейси (стики) системи з каналом зв'язку. Фізичний рівень також описує процедури передачі сигналів у канал і отримання їх із каналу.

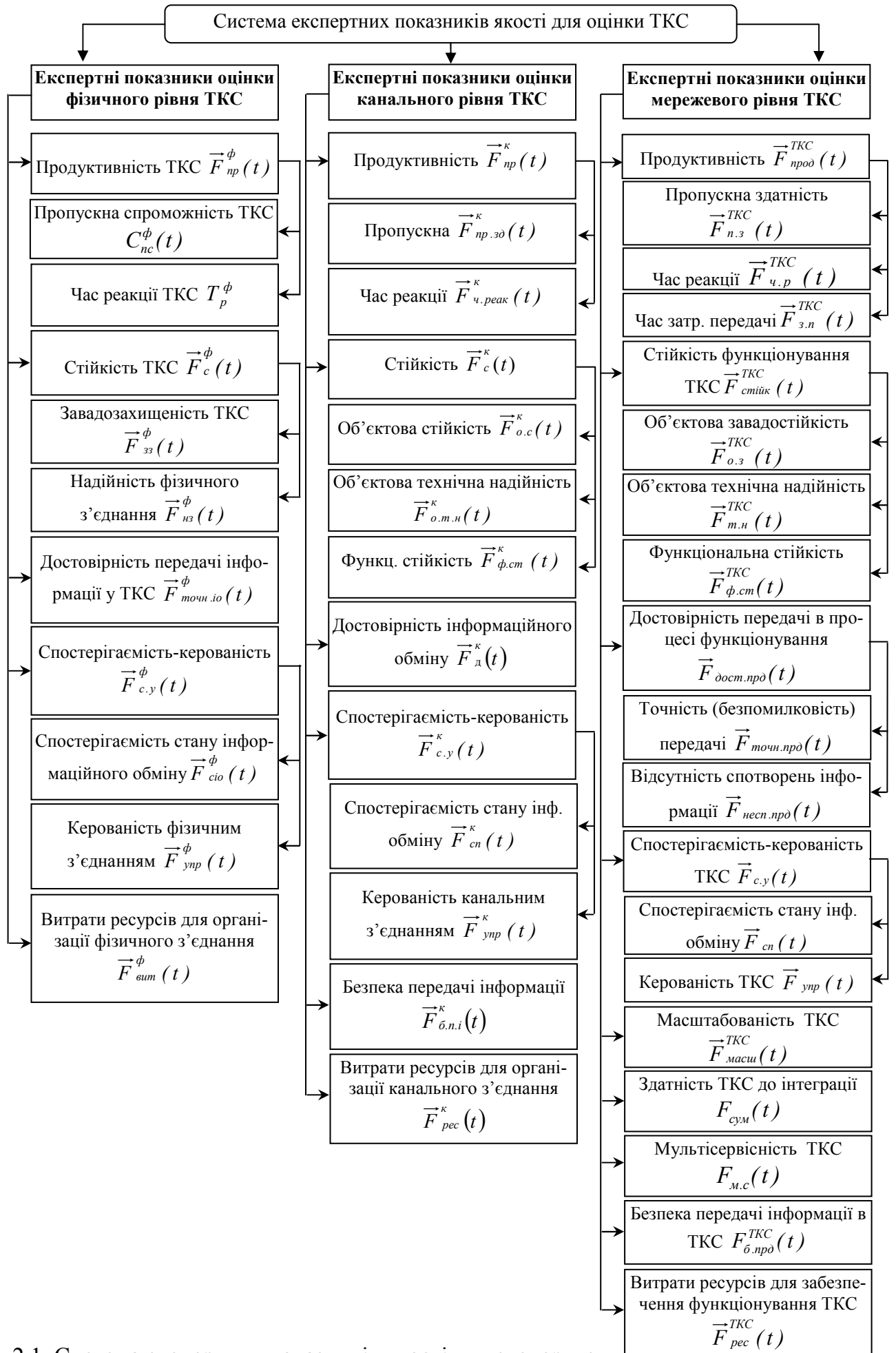


Рис. 2.1. Система експертних показників якості для експертизи

Врахування ефективності проектних рішень щодо реалізації фізичного рівня ТКС є важливою умовою для ефективної реалізації рівнів системи, які базуються на фізичному рівні, а саме рівнів які відповідають каналному та мережевому рівням еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

Враховуючи сказане вище виділимо найбільш важливі властивості фізичного рівня перспективних телекомунікаційних систем спеціального призначення, які слід оцінювати в процесі проведення експертизи ТКС.

До таких характеристик слід віднести: продуктивність; стійкість; достовірність передачі повідомлень; можливість спостерігати та управляти об'єктами фізичного рівня з боку об'єктів каналного та мережевого рівнів; витрати ресурсів на організацію фізичного з'єднання.

Як показує аналіз [13, 33-35], продуктивність фізичного рівня ТКС може бути оцінена з використанням декількох часткових характеристик, а саме: пропускна спроможність; час реакції; затримка передачі.

Показник оцінки продуктивності фізичного рівня ТКС матиме вигляд:

$$\overrightarrow{F}_{np}^{\phi} = (C_{nc}^{\phi}(t); T_p^{\phi}; T_3^{\phi}), \quad (2.2)$$

де  $C_{nc}^{\phi}(t)$  – пропускна спроможність фізичного рівня ТКС;

$T_p^{\phi}$  – час реакції фізичного рівня ТКС;

$T_3^{\phi}$  – час затримки передачі фізичного рівня ТКС.

У загальному випадку критерієм може слугувати відношення:

$$\overrightarrow{F}_{np}^{\phi}(t) \geq \overrightarrow{F}_{np.3}^{\phi}(t), \quad (2.3)$$

де  $\overrightarrow{F}_{np.3}^{\phi}(t)$  – необхідне значення показника продуктивності фізичного рівня ТКС;

$t$  – дискретний час, або етап розвитку ТКС що проектується, на якому відбувається розширення елементів і/або функцій системи.

Як свідчить аналіз [13, 14, 31, 36], оцінка стійкості ТКС на фізичному рівні може бути здійснена з використанням двох показників: заводо захищеність та надійність фізичного з'єднання:

$$\vec{F}_c^\phi(t) = (\vec{F}_{33}^\phi(t); \vec{F}_n^\phi(t)). \quad (2.4)$$

де  $\vec{F}_{33}^\phi(t)$  – показник завадозахищеності фізичного рівня ТКС;

$\vec{F}_n^\phi(t)$  – показник надійності фізичного з'єднання фізичного рівня ТКС.

Під завадо захищеністю фізичного рівня ТКС розуміється [37, 38] здатність фізичного з'єднання до підтримання активного стану в умовах шумів фізичного з'єднання (атмосферних, теплових і т.д.) і навмисних заваді представляє собою середній час завадостійкого функціонування фізичного з'єднання.

Під надійністю фізичного з'єднання будемо розуміти [39-41] здатність фізичного з'єднання підтримувати свій активний стан в умовах технічних відмов. Надійність фізичного з'єднання можна характеризувати середнім часом знаходження з'єднання в активному стані.

Наступним показником якості ТКС є достовірність передачі інформації по фізичному з'єднанню. Достовірність інформаційного обміну досягається завдяки реалізації оптимальних систем сигналів і методів їх обробки і характеризує точність (безпомилковість)  $\vec{F}_{точн.іо}^\phi(t)$  передачі інформації між точками фізичного з'єднання.

Критерій оцінки точності (безпомилковості) передачі інформації по фізичному з'єднанню може бути заданий як імовірність появи помилок:

$$P_n^\phi(t) = P\left(\vec{F}_{точн.іо}^\phi(t) \geq \vec{F}_{точн.іо.н}^\phi(t)\right), \quad (2.5)$$

де  $\vec{F}_{точн.іо.н}^\phi(t)$  – необхідне значення показника точності (безпомилковості) інформаційного обміну, яке характеризує допустимий рівень помилок.

Наступним показником є показник якості, який чисельно характеризує здатність підсистеми управління каналного рівня достовірно оцінювати (спостерігати) стан з'єднання і змінювати його в необхідних межах у разі необхідності.

Оцінка спроможності спостерігати за станом з'єднання дозволить визначити достовірність оцінки значення параметрів фізичного з'єднання і параметрів зовнішніх впливів на каналному рівні.

Оцінка спроможності управляти фізичним з'єднанням дозволить визначити можливість формування якісних управляючих впливів з боку каналного з'єднання.

Показником для оцінки спроможності спостерігати за станом процесу інформаційного обміну  $\vec{F}_{cio}^{\phi}(t)$  приймемо імовірність достовірної оцінки (спостерігаємості) параметрів фізичного з'єднання:

$$P_{cn}^{\phi}(t) = 1 - (1 - P_{cn.вс}(t))(1 - P_{cn.ср}(t))(1 - P_{cn.зв}(t)), \quad (2.6)$$

де  $P_{cn.вс}(t)$  – імовірність спостерігаємості значень внутрішнього стану фізичного з'єднання (продуктивності, стійкості, безпеки і т.д.);

$P_{cn.ср}(t)$  – імовірність спостерігаємості параметрів середовища розповсюдження (коефіцієнт передачі середовища розповсюдження);

$P_{cn.зв}(t)$  – імовірність спостерігаємості параметрів зовнішніх впливів.

Як свідчить аналіз [11, 42-44], для оцінки якості управління фізичним  $\vec{F}_{упр}^{\phi}(t)$  з'єднанням доцільно використати два показника.

Першим є імовірність  $P_{від.у}^{\phi}(t)$  того, що значення елементів вектора відхилень процесу інформаційного обміну, які обумовлені похибками в контурі підсистеми управління фізичним з'єднанням, не будуть перевищувати допустимих:

$$P_{від.у}^{\phi}(t) = P(\Delta \vec{F}_{в.у}^{\phi}(t) \leq \Delta \vec{F}_{в.у.дон}^{\phi}(t)), \quad (2.7)$$

де  $\Delta \vec{F}_{в.у}^{\phi}$  – вектор відхилень процесу інформаційного обміну;

$\Delta \vec{F}_{в.у.дон}^{\phi}$  – допустиме значення елементів вектору відхилень процесу інформаційного обміну.

Другим показником є імовірність  $P_{неуз.у}^{\phi}(t)$  неузгодженості алгоритмів управління фізичним з'єднанням і задач, які вирішуються в реальних (або

таких що прогнозуються) умовах функціонування фізичного з'єднання і представляє собою:

$$P_{\text{неуз.у}}^{\phi}(t) = P(\Delta F_{\text{неуз.у}}^{\phi}(t) \leq \Delta F_{\text{неуз.у.доп}}^{\phi}(t)), \quad (2.8)$$

де  $\Delta F_{\text{неуз.у}}^{\phi}$  – неузгодженість управляючих впливів підсистеми управління фізичним рівнем;

$\Delta F_{\text{неуз.у.доп}}^{\phi}$  – допустиме значення неузгодженості управляючих впливів підсистеми управління фізичним рівнем.

Останнім частковим показником фізичного рівня є показник якості, який чисельно оцінює витрати, достатні для організації фізичних з'єднань [6, 45. 46]. Даний показник представляє собою вектор витрат ресурсів у вигляді:

$$\vec{F}_{\text{вит}}^{\phi} = (E^{\phi}(t); \Delta f^{\phi}(t); t_{\text{а.з}}^{\phi}), \quad (2.9)$$

де  $E^{\phi}(t)$  – енерговитрати на організацію фізичного з'єднання;

$\Delta f^{\phi}(t)$  – полоса частот, яка використовується в процесі організації фізичного з'єднання;

$t_{\text{а.з}}^{\phi}$  – час активного фізичного з'єднання.

Критерієм для оцінки витрат на організацію фізичного з'єднання приймемо імовірність того, що значення вектора витрат на ТКС, що проектується, не перевищує заданого:

$$P_{\text{вит}}^{\phi}(t) = P\left(\vec{F}_{\text{вит}}^{\phi}(t) \leq \vec{F}_{\text{вит.зад}}^{\phi}(t)\right), \quad (2.10)$$

де  $\vec{F}_{\text{вит.зад}}^{\phi}$  – задане значення вектора витрат на фізичний рівень ТКС, що проектується.

## 2.2. Показники якості функціонування телекомунікаційної системи для каналного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем

Як свідчить аналіз [4, 13, 32, 37], до функцій каналного рівня у відповідності до еталонної моделі взаємодії відкритих систем можна віднести наступні функції: встановлення, підтримання та роз'єднання інформаційних каналів; виявлення і виправлення помилок в цифровому інформаційному каналі; управління об'єктами фізичного рівня.

З метою оцінки ефективності функціонування каналного рівня ТКС в процесі експертизи необхідно оцінити наступні показники:

- продуктивність каналного з'єднання;
- стійкість каналного з'єднання;
- достовірність передачі повідомлень через каналне з'єднання;
- можливість спостереження та управління об'єктами каналного рівня з боку мережевого рівня;
- безпеку передачі даних через каналне з'єднання;
- витрати ресурсів на організації каналного з'єднання.

Продуктивність каналного з'єднання представляє собою показник якості, який характеризує пропускну здатність каналного з'єднання та час реакції каналного з'єднання [3, 5, 6]. Таким чином, продуктивність каналного з'єднання характеризується двома показниками. При цьому характер даних, які передаються та вимоги користувача до якості передачі на враховуються.

Пропускною здатністю каналного з'єднання є показник якості, який визначає обсяг даних, переданих через каналне з'єднання за одиницю часу.

Критерієм оцінки пропускну здатності каналного з'єднання будемо вважати імовірність того, що значення векторного показника пропускну здатності каналного з'єднання  $\vec{F}_{np.z\delta}^{\kappa}(t)$  більше або дорівнює заданому значенню  $\vec{F}_{np.z\delta.zad}^{\kappa}(t)$ :

$$P_{np.z\delta}^{\kappa}(t) = P\left(\vec{F}_{np.z\delta}^{\kappa}(t) \geq \vec{F}_{np.z\delta.zad}^{\kappa}(t)\right) = P\left(V_{real}^{\kappa}(t) \geq V_{zad}^{\kappa}(t)\right), \quad (2.11)$$



де  $V_{real}^k(t)$  – реальний обсяг даних, який передається через каналне з'єднання;

$V_{зад}^k(t)$  – задане значення обсягу даних, який передається через каналне з'єднання.

Другою складовою продуктивності, як зазначено вище, є час реакції каналного з'єднання. Часом реакції каналного з'єднання будемо вважати інтервал часу між надходженням запиту на встановлення каналного з'єднання і початком передачі даних.

Час реакції каналного з'єднання залежить від цілого ряду факторів, таких наприклад як пріоритет запиту на встановлення з'єднання, режим передачі, кількість точок з'єднання, довжина маршруту проходження трафіку, завантаженість задіяних в процесі обміну комунікаційних пристроїв і т.д. Усі ці причини спонукають до використання середньозваженої оцінки часу реакції каналного з'єднання  $\bar{T}_{ч.реак}^k(t)$  з урахуванням часу на виконання запиту.

Вектор часу реакції каналного з'єднання буде мати вигляд:

$$\vec{F}_{ч.реак}^k(t) = (t_{ч.реак.n}^k; \bar{T}_{ч.реак}^k(t)), \quad (2.12)$$

де  $t_{ч.реак.n}^k$  – інтервал часу між формуванням  $n$ -го типу запиту на встановлення з'єднання і встановленням каналного з'єднання.

Критерій оцінки оптимальності часу реакції каналного з'єднання запишемо у вигляді:

$$P_{ч.реак}^k(t) = P\left(\vec{F}_{ч.реак}^k(t) \leq \vec{F}_{ч.реак.доп}^k(t)\right) = P\left(\bar{T}_{ч.реак}^k(t) \leq \bar{T}_{ч.реак.доп}^k(t)\right), \quad (2.13)$$

де  $\vec{F}_{ч.реак.доп}^k(t)$  – допустиме значення вектора часу реакції каналного з'єднання;

$\bar{T}_{ч.реак.доп}^k(t)$  – допустиме значення середньозваженої оцінки часу реакції каналного з'єднання.

Враховуючи сказане вище, узагальнений імовірнісний критерій оцінки продуктивності каналного з'єднання представляє собою спільну умовну імовірність виконання умов щодо пропускнуої здатності та часу реакції каналного з'єднання:

$$P_{\text{пр}}^{\kappa}(t) = P\left(\left(\overline{F}_{\text{пр.зод}}^{\kappa}(t) \geq \overline{F}_{\text{пр.зод.зад}}^{\kappa}(t)\right) \left| \left(\overline{F}_{\text{ч.реак}}^{\kappa}(t) \leq \overline{F}_{\text{ч.реак.дон}}^{\kappa}(t)\right)\right.\right). \quad (2.14)$$

Стійкість каналного з'єднання представляє собою векторний показник якості, який характеризує здатність забезпечувати функціонування в умовах можливих впливів, які визначаються специфікою застосування з'єднань і технічних відмов його елементів[47-49]. Крім того, на каналному рівні розрізняють два рівні оцінки стійкості: стійкість на рівні об'єктів каналного рівня та стійкість на функціональному рівні.

Враховуючи сказане вище, складовими векторного показника  $\overline{F}_c^{\kappa}(t)$  будуть часткові вектори об'єктової стійкості  $\overline{F}_{o.c}^{\kappa}(t)$  і технічної надійності  $\overline{F}_{o.m.n}^{\kappa}(t)$ , а також функціональної стійкості  $\overline{F}_{\phi.ct}^{\kappa}(t)$ :

$$\overline{F}_c^{\kappa}(t) = \left( \overline{F}_{o.c}^{\kappa}(t); \overline{F}_{o.m.n}^{\kappa}(t); \overline{F}_{\phi.ct}^{\kappa}(t) \right). \quad (2.15)$$

Об'єктовою стійкістю каналного з'єднання можна вважати здатність каналного з'єднання в умовах цілеспрямованих впливів підтримувати актуального стану. У такому випадку в якості експертного показника стійкості може бути величина середнього часу стійкого функціонування каналного з'єднання  $\overline{T}_{c.\phi}^{\kappa}(t)$ .

Під об'єктовою технічною надійністю будемо розуміти здатність каналних з'єднань підтримувати свій працездатний стан в умовах технічних відмов, а в якості показника технічної надійності може застосовуватись середній час знаходження елемента каналного з'єднання в справному стані  $\overline{T}_{c.ел}^{\kappa}(t)$ .

Функціональна стійкість каналних з'єднань представляє собою здатність каналного з'єднання нарощувати можливості стійкого функціонування за рахунок раціональної поведінки в умовах протидії і залежить від стра-

тегій впливу на каналне з'єднання і реалізованих у ньому алгоритмів протидії. Показник функціональної стійкості можна визначати через реальну пропускну здатність  $V_{\text{реал}\phi}^{\kappa}(t)$ , яка реалізується за рахунок оптимальних дій в умовах протидії деструктивним впливам.

В загальному вигляді критерій стійкості каналного з'єднання можна записати у вигляді:

$$P_c^{\kappa}(t) = P_{об}^{\kappa}([\vec{F}_{об\ c}^{\kappa}(t) \geq \vec{F}_{об\ c\ зад}^{\kappa}(t)] | [\vec{F}_{\phi\ c}^{\kappa}(t) \geq \vec{F}_{\phi\ c\ зад}^{\kappa}(t)]; [\vec{F}_{тн}^{\kappa}(t) \geq \vec{F}_{тн\ зад}^{\kappa}(t)]) \times (2.16) \\ \times P_{\phi}^{\kappa}([\vec{F}_{\phi\ c}^{\kappa}(t) \geq \vec{F}_{\phi\ c\ зад}^{\kappa}(t)] | [\vec{F}_{тн}^{\kappa}(t) \geq \vec{F}_{тн\ зад}^{\kappa}(t)])$$

Наступною важливою характеристикою каналного рівня є достовірність інформаційного обміну  $\vec{F}_{д}^{\kappa}(t)$  по каналному з'єднанню і характеризує точність передачі інформації між точками з'єднання. Для забезпечення достовірності спеціальним чином організовується інформаційний обмін і використовуються методи завадозахищеного кодування.

Таким чином, експертний показник достовірності інформаційного обміну характеризує безпомилковість інформаційного обміну і має вигляд:

$$\vec{F}_{точн}^{\kappa}(t) = (K_{пом\ 1}^{\kappa}(t), \dots, K_{пом\ n}^{\kappa}(t)), \quad (2.17)$$

де  $K_{пом\ 1}^{\kappa}(t) \dots K_{пом\ n}^{\kappa}(t)$  – коефіцієнти помилок передачі інформації.

В якості критерію достовірності інформаційного обміну, яка виражається через точність (безпомилковість) передачі інформації через каналне з'єднання виберемо наступну умову:

$$\vec{F}_{точн}^{\kappa}(t) \geq \vec{F}_{точн.\ необ}^{\kappa}(t), \quad (2.18)$$

де  $\vec{F}_{точн.\ необ}^{\kappa}(t)$  – необхідне значення показника точності (безпомилковості) інформаційного обміну, який характеризує допустимі помилки при передачі інформації з різним пріоритетом.

У імовірнісному вигляді критерій для оцінки достовірності каналного з'єднання може бути заданий у вигляді:

$$P_{д}^{\kappa}(t) = P(\vec{F}_{точн}^{\kappa}(t) \geq \vec{F}_{точн.\ необ}^{\kappa}(t)) = P(K_{пом\ 1}^{\kappa}(t) \geq K_{пом.\ доп.\ 1}^{\kappa}(t); \dots; K_{пом.\ n}^{\kappa}(t) \geq K_{пом.\ доп.\ n}^{\kappa}(t)), \quad (2.19)$$

де  $K_{\text{пом.доп.1}}^{\kappa}(t) \dots K_{\text{пом.доп.n}}^{\kappa}(t)$  – допустимі значення коефіцієнтів помилок передачі інформації через каналне з'єднання.

Важливим показником якості каналного з'єднання є показник, який чисельно характеризує здатність підсистеми управління каналного рівня достовірно оцінювати (спостерігати) стан з'єднання і змінювати його при потребі в необхідних межах.

Оцінка можливості спостерігати дозволить робити висновок щодо достовірності і повноти спостереження (оцінки) значення параметрів каналного та фізичного з'єднань і зовнішніх впливів на каналному рівні. Оцінка можливості управляти дозволить робити висновок щодо якості управління каналним і фізичним з'єднаннями шляхом вибору доцільних алгоритмів інформаційного обміну в конкретних умовах.

У якості показника якості для оцінка спостерігаємості процесу інформаційного обміну в каналному з'єднанні  $\vec{F}_{\text{сп}}^{\kappa}(t)$  оберемо імовірність можливості достовірної оцінки параметрів каналного з'єднання  $P_{\text{сп}}^{\kappa}(t)$ , яка має вигляд:

$$P_{\text{сп}}^{\kappa}(t) = 1 - (1 - P_{\text{сп.вез}}(t))(1 - P_{\text{сп.сп}}(t))(1 - P_{\text{сп.зв}}(t)), \quad (2.20)$$

де  $P_{\text{сп.вез}}(t)$  – імовірність спостерігає мості внутрішнього стану каналного і фізичного з'єднання;

$P_{\text{сп.сп}}(t)$  – імовірність спостерігаємості параметрів середовища розповсюдження;

$P_{\text{сп.зв}}(t)$  – імовірність спостерігаємості параметрів зовнішніх впливів.

Для оцінки якості управління процесу функціонування інформаційного обміну у каналному з'єднанні прийемо два показники, а саме: імовірність  $P_{\text{відх.у}}^{\kappa}(t)$  того, що значення елементів вектора відхилень  $\Delta \vec{F}_{\text{відх.у}}^{\kappa}(t)$  процесу інформаційного обміну, які обумовлюються похибками в контурі підсистеми управління каналними і фізичними рівнями не перевищать допустимих значень  $\Delta \vec{F}_{\text{відх.доп.у}}^{\kappa}(t)$ , імовірність  $P_{\text{неуз.у}}^{\kappa}(t)$  неузгодженості алгоритмів

управління каналного рівня і задач, які вирішуються в реальних умовах функціонування каналного з'єднання:

$$P_{\text{відх.у}}^{\kappa}(t) = P\left(\Delta \vec{F}_{\text{відх.у}}^{\kappa}(t) \leq \Delta \vec{F}_{\text{відх.доп.у}}^{\kappa}(t)\right). \quad (2.21)$$

$$P_{\text{неуз.у}}^{\kappa}(t) = P\left(\Delta U_{\text{неуз.у}}^{\kappa}(t) \in \Delta U_{\text{неуз.доп.у}}^{\kappa}(t)\right), \quad (2.22)$$

де  $\Delta U_{\text{неуз.у}}^{\kappa}(t)$ ,  $\Delta U_{\text{неуз.доп.у}}^{\kappa}(t)$  – індекс неузгодженості та допустимий рівень неузгодженості управляючих впливів підсистеми каналного рівня.

Таким чином, вектор спостерігаємості-керуваності  $\vec{F}_{\text{с.у}}^{\kappa}$  процесу функціонування каналного рівня телекомунікаційної системи спеціального призначення буде мати вигляд:

$$\vec{F}_{\text{с.у}}^{\kappa}(t) = \left(\vec{F}_{\text{сп}}^{\kappa}, \Delta \vec{F}_{\text{відх.у}}^{\kappa}(t), \Delta U_{\text{неуз.у}}^{\kappa}(t)\right)^T. \quad (2.23)$$

Критерій оцінки спостерігаємості-керуваності каналного рівня може бути заданий у вигляді спільної умовної імовірності того, що значення елементів вектора відхилень умовна імовірність того, що значення елементів вектора відхилень  $\Delta \vec{F}_{\text{у.с}}^{\kappa}(t)$ , які обумовлені похибками і неузгодженостями  $\Delta U_{\text{неуз.у}}^{\kappa}(t)$  в контурі управління і підсистеми управління каналного рівня не будуть перевищувати допустимих значень:

$$P_{\text{у.с}}^{\kappa}(t) = P\left(\vec{F}_{\text{у.с}}^{\kappa}(t) \leq \vec{F}_{\text{у.с.доп}}^{\kappa}(t)\right). \quad (2.24)$$

З метою оцінки здатності каналного рівня забезпечувати конфіденційність інформації, що передається та обробляється, у межах проведення експертизи ТКС введемо показник безпечності передачі інформації каналного рівня.

Властивість забезпечувати безпечність передачі та обробки інформації реалізується з використанням механізмів каналного шифрування [13, 50, 51]. При цьому, криптографічна стійкість зашифрованої інформації залежить від довжини ключа і стійкості алгоритму шифрування, яка вимірюється

ся кількістю елементарних операцій, необхідних для компрометації ключового матеріалу [52-54].

Таким чином, експертний показник безпечності передачі інформації каналного рівня буде мати вигляд:

$$\vec{F}_{\text{б.п.і}}^{\kappa}(t) = (N_{\text{кл}}, N_{\text{ел.оп}})^T, \quad (2.25)$$

де  $N_{\text{кл}}$  – довжина ключа;

$N_{\text{ел.оп}}$  – кількість елементарних операцій для компрометації ключового матеріалу.

Критерій оцінки експертного показника безпечності передачі інформації матиме вигляд:

$$P_{\text{б.п.і}}^{\kappa}(t) = P\left(\vec{F}_{\text{б.п.і}}^{\kappa}(t) \geq \vec{F}_{\text{б.п.і.необ}}^{\kappa}(t)\right) = P[(N_{\text{ел.оп}}(t) \geq N_{\text{ел.оп.необ}}(t)) | (N_{\text{кл}}(t) \geq N_{\text{кл.необ}}(t))] \times \quad (2.26)$$

$$\times P(N_{\text{кл}}(t) \geq N_{\text{кл.необ}}(t)),$$

де  $N_{\text{ел.оп.необ}}(t)$  – необхідна кількість елементарних операцій для компрометації ключового матеріалу;

$N_{\text{кл.необ}}(t)$  – необхідна довжина ключа.

Витрати ресурсів, які необхідні для забезпечення якісного функціонування каналного з'єднання і в першу чергу на організації інформаційного обміну, будемо оцінювати за допомогою експертного показника витрат ресурсів  $\vec{F}_{\text{рес}}^{\kappa}(t)$ . Вектор витрат ресурсів на організацію інформаційного обміну мати вигляд:

$$\vec{F}_{\text{рес}}^{\kappa}(t) = (\Delta f_{\kappa}(t); t_{\text{а.з}}^{\kappa}), \quad (2.27)$$

де  $\Delta f_{\kappa}(t)$  – полоса частот, яка використовується каналним з'єднанням;

$t_{\text{а.з}}^{\kappa}$  – час активності каналного з'єднання.

Імовірнісний критерій оцінки витрат ресурсів для організації інформаційного обміну в межах каналного з'єднання буде мати вигляд:

$$P_{\text{рес}}^{\kappa}(t) = P\left(\vec{F}_{\text{рес}}^{\kappa}(t) \leq \vec{F}_{\text{рес.необ}}^{\kappa}(t)\right) = P_{\text{част}}^{\kappa} [((\Delta f_{\kappa}(t) \leq \Delta f_{\text{к.необ}}(t)) | (t_{\text{а.з}} \leq t_{\text{а.з.необ}}))] \times \quad (2.28)$$

$$\times P_{\text{ч}}^{\kappa}(t_{\text{а.з}} \leq t_{\text{а.з.необ}}).$$

Згідно виразу (2.28) спільна умовна імовірність того, що сукупний ресурс (частотний або часовий), який витрачається на реалізацію інформаційного обміну не перевищує необхідного (доступного).

Таким чином, представлений набір експертних показників може забезпечити оцінку важливих властивостей моделей каналного рівня телекомунікаційної системи в процесі її проектування і розробки.

### **2.3. Показники якості функціонування телекомунікаційної системи для мережевого рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем**

Якість процесу функціонування ТКС спеціального призначення представляє собою здатність системи або її частини виконувати функції, які забезпечують інформаційний обмін між користувачами системи.

Мережевий рівень еталонної моделі взаємодії відкритих систем призначений для визначення шляху передачі даних. Він відповідає за трансляцію логічних адрес та імен у фізичні, визначення найкоротших маршрутів, комутацію і маршрутизацію, відстеження неполадок і заторів у мережі. Протоколи мережного рівня маршрутизують дані від джерела до одержувача.

До властивостей, які характеризують якість процесів функціонування мережевого рівня телекомунікаційної системи віднесемо наступні характеристики:

- продуктивність;
- стійкість;
- достовірність передачі;
- керованість / спостерігаємість;
- здатність мережі до масштабування;
- сумісність мережі;
- мультисервісність;
- безпе́чність передачі інформації;
- витрати ресурсів на реалізацію процесу функціонування ТКС.

Вектор експертного показника якості, який описує властивості телекомунікаційної системи на мережевому рівні має вигляд:

$$\vec{F}^{TKC}(t) = \left( \vec{F}_{prod}^{TKC}(t), \vec{F}_{stiyk}^{TKC}(t), \vec{F}_{dosm}^{TKC}(t), \vec{F}_{y.c}^{TKC}(t), \vec{F}_{masu}^{TKC}(t), \vec{F}_{sum}^{TKC}(t), \vec{F}_{m.c}^{TKC}(t), \vec{F}_{bezp}^{TKC}(t), \vec{F}_{pec}^{TKC}(t) \right)^T. \quad (2.29)$$

Продуктивність телекомунікаційної мережі  $\vec{F}_{prod}^{TKC}$  є основним показником якості в даній системі. Продуктивність характеризує кількість інформації користувачів мультисервісної системи, яка міститься в усіх комутуємих інформаційних одиницях (повідомленнях, пакетах і т.д.) і яка обслуговується даною системою з заданою якістю за одиницю часу [3-6, 13].

Вектор продуктивності системи включає наступні вектори показників якості: вектор пропускну здатності  $\vec{F}_{n.z}^{TKC}$ , вектор часу реакції системи  $\vec{F}_{ч.р}^{TKC}$  та вектор затримки передачі і варіації затримки передачі  $\vec{F}_{z.n}^{TKC}$ .

Розглянемо кожен з складових векторного показника продуктивності ТКС.

Найбільш популярним підходом до аналізу пропускну здатності телекомунікаційної системи спеціального призначення є підхід, який орієнтується на оцінюванні обсягу даних, який передається ТКС або її частиною в одиницю часу. Цей підхід дозволяє оцінити швидкість виконання внутрішніх операцій системи, тобто, передачі інформаційних повідомлень між елементами ТКС через телекомунікаційні пристрої. Такий підхід дозволяє основну функцію ТКС – транспортування інформаційних повідомлень

Пропускна здатність телекомунікаційної системи спеціального призначення  $\vec{F}_{n.z}^{TKC}$  визначається як середня кількість інформації, яка передається між вузлами мережі в одиницю часу і представляє собою наступний вираз:

$$\vec{F}_{n.z}^{TKC}(t) = (V_{mex}(t), V_{peai}(t), V_{nom}(t))^T, \quad (2.30)$$

де  $V_{mex}(t)$  – кількість інформації, яку ТКС може передати в одиницю часу і характеризує технічну пропускну здатність системи;



$V_{реал}(t)$  – кількість інформації, яку ТКС може передати в одиницю часу і характеризує реальну пропускну здатність системи;

$V_{ном}(t)$  – кількість інформації, яку ТКС може передати в одиницю часу з урахуванням додаткового резерву пропускну здатності і характеризує потенційну пропускну здатність.

Критерій оцінки пропускну здатності ТКС СП може бути заданий як імовірність виконання вимог до пропускну (реальної) здатності ТКС СП:

$$P_{n.з}^{TKC}(t) = P\left(\overline{F}_{n.з}^{TKC}(t) \geq \overline{F}_{n.з.необ}^{TKC}(t) = P(V_{реал}(t) \geq V_{реал.необ}(t))\right), \quad (2.31)$$

де  $V_{реал.необ}(t)$  – необхідний рівень реальної пропускну здатності ТКС.

Другою складовою показника продуктивності ТКС є час реакції системи  $\overline{F}_{ч.р}^{TKC}(t)$ . Час реакції ТКС визначається як інтервал часу  $t_{ч.р}^n(t)$  між появою на вході системи запиту користувача до будь-якої мережевої служби (запити  $n$ -ї послуги) і отриманням на виході мережі відповіді на даний запит.

Даний інтервал часу буде залежати від наступних факторів:

типу  $n$ -ї послуги, яка запитується;

типу користувача та типу серверу послуг, до якого здійснюється звернення;

місце знаходження користувача;

поточного стану ТКС, тобто завантаженості сегментів, комутаторів і маршрутизаторів, через які проходить запит; степені завантаженості серверів послуг.

Враховуючи фактори, що впливають на час реакції ТКС, в цьому показникові будемо використовувати середньозважену оцінку часу.

Вектор часу реакції системи містить два елементи (параметри):

$$\overline{F}_{ч.р}^{TKC}(t) = (t_{ч.р}^n(t); \overline{T}_{ч.р.}(t)), \quad (2.32)$$

$\text{det}_{\text{ч.р}}^n(t)$  – інтервал часу між появою на вході системи запиту користувача до певної мережевої служби (запиту  $n$ -ї послуги) і отриманням на її виході відповіді на даний запит;

$\bar{T}_{\text{ч.р}}(t)$  – середньозважена оцінка часу реакції ТКС СП.

Критерієм оптимальності часу реакції ТКС будемо вважати імовірність того, що середньозважена оцінка часу реакції не перевищить допустимого значення:

$$P_{\text{ч.р}}^{\text{TKC}}(t) = P\left(\bar{F}_{\text{ч.р}}^{\text{TKC}}(t) \leq \bar{F}_{\text{ч.р.дон}}^{\text{TKC}}(t)\right) = P\left(\bar{T}_{\text{ч.р}}(t) \leq \bar{T}_{\text{ч.р.дон}}(t)\right). \quad (2.33)$$

Третьою складовою векторного показника продуктивності ТКС є вектор затримки передачі і варіації затримки передачі  $\vec{F}_{\text{з.н}}^{\text{TKC}}$ . Даний показник є показником якості, який характеризує передачу інформації в середині мережі без врахування затримок, необхідних безпосередньо для обробки інформації.

Дана властивість визначається як параметр затримки між моментом надходження пакета (інформаційного повідомлення) на вхід системи і моментом появи його на виході. Зазвичай [6, 37, 44, 55, 56] якість мережі характеризується максимальною затримкою передачі  $t_{\text{макс.з.нр\delta}}(t)$  і варіацією затримки  $\Delta t_{\text{з.нр\delta}}(t)$ .

Отже, вектор затримки передачі  $\vec{F}_{\text{з.н}}^{\text{TKC}}$  містить два часткових показника якості:

$$\vec{F}_{\text{з.н}}^{\text{TKC}}(t) = \left(t_{\text{макс.з.нр\delta}}(t); \Delta t_{\text{з.нр\delta}}(t)\right)^T. \quad (2.34)$$

Критерієм оптимальності часу затримки передачі в ТКС буде умовна імовірність виконання вимог до часу затримки передачі і варіаціям затримки передачі в ТКС:

$$P_{\text{з.н}}^{\text{TKC}}(t) = P\left(\vec{F}_{\text{з.н}}^{\text{TKC}}(t) \leq \vec{F}_{\text{з.н.дон}}^{\text{TKC}}(t)\right) = P_{\text{ч.з.нр\delta}}^{\text{TKC}}\left(t_{\text{макс.з.нр\delta}}(t) \leq t_{\text{макс.з.нр\delta.дон}}(t)\right) \times \\ \times P_{\text{ч.з.нр\delta}}^{\text{TKC}}\left(\left(\Delta t_{\text{з.нр\delta}}(t) \leq \Delta t_{\text{з.нр\delta.дон}}(t)\right) \mid \left(t_{\text{макс.з.нр\delta}}(t) \leq t_{\text{макс.з.нр\delta.дон}}(t)\right)\right). \quad (2.35)$$

Узагальнений імовірнісний критерій оцінки продуктивності має вигляд сумісної умовної імовірності виконання вимог по пропускній здатності, часу реакції і затримці передачі в ТКС:

$$P_{\text{прод}}^{\text{TKC}}(t) = P_{\text{н.з}}^{\text{TKC}} \left( (\overrightarrow{F}_{\text{прод}}^{\text{TKC}}(t) \geq \overrightarrow{F}_{\text{прод.зад}}^{\text{TKC}}(t)) \mid (\overrightarrow{F}_{\text{ч.п}}^{\text{TKC}}(t) \leq \overrightarrow{F}_{\text{ч.п.дон}}^{\text{TKC}}(t)); (\overrightarrow{F}_{\text{з.н}}^{\text{TKC}}(t) \leq \overrightarrow{F}_{\text{з.н.дон}}^{\text{TKC}}(t)) \right) \times \\ \times P_{\text{ч.п}}^{\text{TKC}} \left( (\overrightarrow{F}_{\text{ч.п}}^{\text{TKC}}(t) \leq \overrightarrow{F}_{\text{ч.п.дон}}^{\text{TKC}}(t)) \mid (\overrightarrow{F}_{\text{з.н}}^{\text{TKC}}(t) \leq \overrightarrow{F}_{\text{з.н.дон}}^{\text{TKC}}(t)) \right) P_{\text{з.н}}^{\text{TKC}} \left( \overrightarrow{F}_{\text{з.н}}^{\text{TKC}}(t) \leq \overrightarrow{F}_{\text{з.н.дон}}^{\text{TKC}}(t) \right). \quad (2.36)$$

Наступним показником якості є векторний показник стійкості процесу функціонування ТКС  $\overrightarrow{F}_{\text{стійк}}^{\text{TKC}}$ . Даний показник демонструє властивості системи під час її функціонування в умовах можливої радіоелектронної протидії і виникнення технічних відмов. Складовими даного вектора є вектор заводостійкості і технічної надійності процесу функціонування ТКС.

Як свідчить аналіз [8, 22, 31, 57], стійкість ТКС  $\overrightarrow{F}_c^{\text{TKC}}(t)$  має три рівні оцінки, а саме об'єктовий, структурний і функціональний. Враховуючи сказане, векторний показник стійкості ТКС включає показник об'єктової заводостійкості  $\overrightarrow{F}_{\text{о.з}}^{\text{TKC}}(t)$ , показник технічної надійності  $\overrightarrow{F}_{\text{т.н}}^{\text{TKC}}(t)$  та показник структурної і функціональної стійкості  $\overrightarrow{F}_{\text{ф.см}}^{\text{TKC}}(t)$ :

$$\overrightarrow{F}_c^{\text{TKC}}(t) = \left( \overrightarrow{F}_{\text{о.з}}^{\text{TKC}}(t); \overrightarrow{F}_{\text{т.н}}^{\text{TKC}}(t); \overrightarrow{F}_{\text{ф.см}}^{\text{TKC}}(t) \right)^T. \quad (2.37)$$

Під об'єктовою заводо захищеністю елементів ТКС розуміється здатність елементів нормально функціонувати в умовах навмисних завод. В цьому випадку в якості показника заводозахищеності елементів ТКС може слугувати середній час  $\overline{T}_{\text{зз.ф}}(t)$  заводозахищеного функціонування, а в якості аналітичної моделі приймемо імовірність  $P_{\text{зз}}^{\text{BC}}(t)$  збереження базовою станцією необхідної функціональної стійкості:

$$P_{\text{зз}}^{\text{BC}}(t) = P \left( \overline{T}_{\text{зз.ф}}^{\text{BC}}(t) \geq \overline{T}_{\text{зз.ф.необ}}^{\text{BC}}(t) \right). \quad (2.38)$$

Об'єктовою технічною надійністю елементів ТКС є здатність підтримувати свій працездатний стан в умовах технічних відмов. У якості показника технічної надійності елементів ТКС виберемо середній час  $\overline{T}_{\text{сп}}(t)$  пере-

бування елемента системи в справному стані, а імовірність знаходження підсистеми ТКС в справному стані може бути представлена у вигляді [14]:

$$P_{mi}^{BC}(t) = P(\bar{T}_{cnp}^{BC}(t) \geq \bar{T}_{cnp.необ}^{BC}(t)) \quad (2.39)$$

Структурна стійкість ТКС характеризує здатність системи виконувати покладені на неї задачі в умовах протидії за рахунок ресурсів стійкості, які закладені в структуру ТКС. Структурна стійкість визначається запасами по структурі системи, які створюються в інтересах найбільш уразливих її елементів.

Вираз для імовірності  $P_{cnp}(t)$  збереження функціональності ТКС за рахунок резерву структури (імовірність структурної стійкості) буде мати вигляд:

$$P_{cnp.c}(t) = 1 - (1 - P_{cnp.c}^{PC}(t))(1 - P_{cnp.c}^{TC}(t)), \quad (2.40)$$

де  $P_{cnp.c}^{PC}(t)$ ,  $P_{cnp.c}^{TC}(t)$  – імовірність збереження радіо і транспортної підсистемами мобільної ТКС своєї функціональності (пропускної здатності) в умовах радіоелектронної протидії за рахунок каналного резерву, який має місце.

Функціональна стійкість процесу функціонування ТКС характеризує «поведінку» системи і представляє собою здатність нарощувати можливості стійкого функціонування за рахунок раціональної (оптимальної) поведінки в умовах протидії. Основою функціональної стійкості є конкретні можливості оперативно-технічного управління ТКС, які визначають її маневровість і здатність до відновлення.

З точки зору узагальненого показника стійкості ТКС показник функціональної стійкості системи можна визначити як реальна пропускна здатність  $V_{реал\phi}(t)$ , яка реалізується ТКС за рахунок раціональної (оптимальної) поведінки в умовах протидії.

Імовірність збереження системою своєї функціональності за рахунок оптимальної (раціональної) поведінки в умовах протидії буде мати вигляд:

$$P_{\phi}(t) = P(V_{реал.\phi}(t) \geq V_{необ.\phi}(t)) \quad (2.41)$$

В загальному вигляді імовірнісний критерій оцінки стійки ТКС можна записати як сумісну імовірність збереження системою своєї об'єктові  $P_{об}(t)$ , структурної  $P_{стр}(t)$  і функціональної  $P_{ф}(t)$  стійкості:

$$P_c^{TKC}(t) = P_{об} \left( (\bar{F}_{об.с}(t) \geq \bar{F}_{об.с.необ}(t)) \mid (\bar{F}_{стр.с}(t) \geq \bar{F}_{стр.с.необ}(t)); (\bar{F}_{ф.с}(t) \geq \bar{F}_{ф.с.необ}(t)) \right) \times \\ \times P_{стр} \left( (\bar{F}_{стр.с}(t) \geq \bar{F}_{стр.с.необ}(t)) \mid (\bar{F}_{ф.с}(t) \geq \bar{F}_{ф.с.необ}(t)) \right) P_{ф} \left( \bar{F}_{ф.с}(t) \geq \bar{F}_{ф.с.необ}(t) \right). \quad (2.42)$$

Наступним експертним показником є векторний показник достовірності передачі інформації  $\vec{F}_{дост.прд}(t)$  в процесі функціонування ТКС. Достовірність передачі характеризує точність (безпомилковість)  $\vec{F}_{точн.прд}(t)$  і неспотвореність (відсутність спотворень)  $\vec{F}_{несп.прд}(t)$  інформації в процесі її передачі від абонента до абонента через елементи ТКС.

Точність (безпомилковість) передачі інформації можна оцінити коефіцієнтом помилок передачі інформації. Цей коефіцієнт для мультисервісної ТКС враховує кількість  $N_{н.с}(t)$  втрачених або помилково зрозумілих (незрозумілих, спотворених) слів і словосполук для голосової інформації, кількість  $N_{н.р.об}(t)$  неправильно розпізнаних образів під час передачі відеоінформації і кількість  $N_{ном}(t)$  помилкових (спотворених) даних, які прийняті під час передачі даних.

Таким чином, склад вектора, який характеризує внутрішню властивість точності (безпомилковості) передачі інформації виглядає наступним чином:

$$\vec{F}_{точн.прд}(t) = K_{ном.прд.}(t) = (N_{н.с}(t); N_{н.р.об}(t); N_{ном}(t)) \quad (2.43)$$

Критерій оцінки точності (безпомилковості) передачі інформації задаємо в імовірнісно-часовому вигляді як спільна умовна імовірність появи помилок під час передачі інформації:

$$P_{ном}^{TKC}(t) = P \left( \vec{F}_{точн.прд}(t) \geq \vec{F}_{точн.прд.дон}(t) \right) = P_{н.с} \left( (N_{н.с}(t) \geq N_{н.с.дон}(t)) \right) \times \\ \times P_{н.р.об} \left( (N_{н.р.об}(t) \geq N_{н.р.об.дон}(t)) \mid (N_{н.с}(t) \geq N_{н.с.дон}(t)) \right) \times \\ \times P_{ном} \left( (N_{ном}(t) \geq N_{ном.дон}(t)) \mid \left( (N_{н.с}(t) \geq N_{н.с.дон}(t)); (N_{н.р.об}(t) \geq N_{н.р.об.дон}(t)) \right) \right), \quad (2.44)$$

де  $P_{н.р.об}(t)$ ,  $P_{пом}(t)$  – умовні імовірності помилок або неправильного розпізнавання образів і помилкового прийому даних в процесі передачі відеоінформації і даних, відповідно;

$P_{н.с}(t)$  – безумовна імовірність помилок, або втрати слів і словосполук голосової інформації під час передачі.

Показник неспотвореності (відсутності спотворень) під час передачі інформації в ТКС чисельно характеризує здатність системи протидіяти модифікації або знищенню інформації, яка передається і обробляється. Даний показник представимо в вигляді коефіцієнту спотворення інформації  $K_{сппрд}(t)$ , що передається, і який має вигляд відношення кількості спотворених даних до загальної кількості даних, які обробляються і передаються.

Критерій оцінки неспотвореної передачі інформації може бути заданий у імовірнісно-часовому вигляді як імовірність неспотвореної інформації:

$$P_{несп.прд}^{TKC}(t) = P(\vec{F}_{несп.прд}(t) \leq \vec{F}_{несп.прд.доп}(t)) = P(K_{сп.прд}(t) \leq K_{сп.прд.доп}(t)). \quad (2.45)$$

Імовірнісний критерій оцінки достовірності передачі інформації ТКС представляє собою спільну умовну імовірність виконання вимог по точності (безпомилковості) і неспотвореності передачі інформації:

$$P_{дост.прд}^{TKC}(t) = P_{пом}^{TKC} \left( \left( \vec{F}_{точн.прд}(t) \geq \vec{F}_{точн.прд.необ}(t) \right) \mid \left( \vec{F}_{несп.прд}(t) \geq \vec{F}_{несп.прд.необ}(t) \right) \right) \times \\ \times P_{несп.прд}^{TKC} \left( \vec{F}_{несп.прд}(t) \geq \vec{F}_{несп.прд.необ}(t) \right). \quad (2.46)$$

Для кількісної оцінки здатності системи достовірно оцінювати (спостерігати) стан і змінювати його в необхідних межах введемо експертний показник спостерігаємості-керованості.

Оцінка спостерігає мості ТКС дозволяє робити висновок щодо достовірності і повноти спостереження (оцінки) значень стану системи або окремих підпроцесів системи.

Оцінка керованості процесу функціонування ТКС дозволяє визначити в яких межах система здатна змінити свою якість шляхом цілеспрямованого

вибору впливів, які управляють в конкретних умовах з урахуванням обмежених ресурсів.

В якості експертного показника для оцінки спостерігаємості процесу функціонування перспективної ТКС приймемо імовірність спостереження (можливість достовірної оцінки) показників якості:

$$P_{cn}(t) = 1 - (1 - P_{cn.вв}(t))(1 - P_{cn.зв}(t)), \quad (2.47)$$

де  $P_{cn.вв}(t)$  – імовірність спостерігаємості значень показника якості внутрішніх властивостей системи (стійкості, безпечності, продуктивності, витрат ресурсів);

$P_{cn.зв}(t)$  – імовірність спостерігаємості параметрів зовнішніх впливів, наприклад параметрів інформаційного навантаження на ТКС, деструктивних впливів різного роду та завад.

Експертний показник якості управління ТКС оцінює два аспекти [14, 58, 59]:

імовірність того, що значення елементів вектора відхилень показника функціонування, які обумовлені похибками в контурі управління  $\Delta \vec{F}_{к.у}$  не будуть перевищувати допустимих  $\Delta \vec{F}_{к.у.дон}$ ;

імовірність неузгодженості алгоритмів оперативно-технічного управління з задачами, які вирішуються в реальних або прогнозованих умовах функціонування ТКС.

Враховуючи сказане вище, вектор спостерігаємості-керованості процесу функціонування ТКС матиме вигляд:

$$\vec{F}_{с.у}(t) = \left( P_{cn}(t); \Delta \vec{F}_{к.у}(t); \Delta U_{н.у}(t) \right)^T, \quad (2.48)$$

де  $\Delta U_{н.у}(t)$  – неузгодженість алгоритмів оперативно-технічного управління.

Критерій оцінки спостерігаємості-керованості процесу функціонування ТКС може бути заданий як спільна умовна імовірність того, що значення елементів вектора відхилень показника якості процесу функціонування

ТКС, які обумовлені похибками і неузгодженостями в контурі управління не будуть перевищувати допустимих значень:

$$P_{c,y}^{TKC}(t) = P_{n,y}(\Delta U_{n,y}(t) \leq \Delta U_{n,y.dop}(t)) | (\Delta \vec{F}_{к,y}(t) \leq \Delta \vec{F}_{к,y.dop}(t)) \times \\ \times P_{відх} \left( (\Delta \vec{F}_{к,y}(t) \leq \Delta \vec{F}_{к,y.dop}(t)) | (\vec{F}_{cn}(t) \geq \vec{F}_{cn.необ}(t)) \right) P(\vec{F}_{cn}(t) \geq \vec{F}_{cn.необ}(t)) \quad (2.49)$$

З метою урахування здатності системи нарощувати кількість своїх елементів і зон покриття без погіршення продуктивності введемо показник масштабованості.

Аналіз свідчить [13, 60-62], що продуктивність ТКС тісно пов'язана з кількістю користувачів, які обслуговуються, кількістю базових вузлів мережі, які приймають участь у транспортуванні та обробці трафіку.

Враховуюче сказане вище, визначимо що в якості експертного показника масштабованості системи може виступати допустима кількість елементів ТКС  $\Delta N_{елем}(t)$ , на яку система може бути збільшена без втрат для продуктивності.

Таким же чином на продуктивність системи може вплинути зростання можливостей самих елементів системи. Тому можна зробити висновок, що показником масштабованості системи може виступати максимально допустима кількість субелементів в складі елементів ТКС  $\Delta N_{субелем}(t)$ , на яку система може бути збільшена при умові виконання вимог до продуктивності.

Таким чином, вектор масштабованості ТКС може складатись з двох елементів:

$$\vec{F}_{масш}^{TKC}(t) = (\Delta N_{елем}(t); \Delta N_{субелем}(t))^T. \quad (2.50)$$

Критерій оцінки масштабованості ТКС може бути заданий як спільна умовна імовірність того, що нарощування числа елементів системи і збільшення їх можливостей не приведе до втрати продуктивності ТКС:

$$P_{масш}^{TKC}(t) = P(\vec{F}_{масш}(t) \leq \vec{F}_{масш.необ}(t)) = \\ = P_{елем} \left( (\Delta N_{елем}(t) \leq \Delta N_{елем.dop}(t)) | (\Delta N_{субелем}(t) \leq \Delta N_{субелем.dop}(t)) \right) \times \\ \times P_{субелем}(\Delta N_{субелем}(t) \leq \Delta N_{субелем.dop}(t)). \quad (2.51)$$



Наступним експертним показником якості ТКС є показник сумісності (здатності до інтеграції, гетерогенності)  $F_{\text{сум}}(t)$ . Мета використання даного показника – чисельно оцінити здатність системи функціонувати на основі безконфліктної взаємодії різних телекомунікаційних технологій, різнопланового програмного і апаратного забезпечення.

Фізичний зміст даного експертного показника полягає у оцінці здатності інтегрованої ТКС забезпечити необхідну продуктивність.

Формалізуємо експертний показник сумісності інтегрованої системи наступним чином:

$$G(K_{im}(t)) = G(K_1(t); K_2(t); \dots; K_n(t)) , \quad (2.52)$$

де  $K_i(t)$  – тип  $i$ -ї (з  $n$  можливих) телекомунікаційних технологій і обладнання, які суміщаються.

Таким чином, показник сумісності (здатності до інтеграції, гетерогенності) буде мати вигляд:

$$F_{\text{сум}}(t) = G(K_{im}(t)) . \quad (2.53)$$

Критерій оцінки сумісності визначимо як імовірність такої події, при настанні якої інтегрована конкретним чином ТКС здатна забезпечити необхідну відносну продуктивність:

$$P_{\text{сум}}^{\text{TKC}}(t) = P(G(K_{im}(t)) \geq G(K_{\text{им.необ}}(t))) . \quad (2.54)$$

Для кількісної характеристики здатності системи підтримувати різні типи трафіку з різними характеристиками, які впливають на якість обслуговування, введемо показник мультисервісності  $F_{\text{м.с}}(t)$ .

Для опису властивості мультисервісності необхідно класифікувати трафік ТКС і визначити, що система повинна підтримувати множину  $N_{\text{тип.траф.необ}}(t)$  і дотримуватись вимог по якості обслуговування.

Таким чином, експертний показник мультисервісності ТКС може бути записаний наступним чином:

$$F_{\text{м.с}}(t) = N_{\text{тип.траф}}(t) . \quad (2.55)$$

Критерієм оцінки мультисервісності ТКС буде імовірність підтримки системою необхідної кількості трафіку с заданою якістю, тобто імовірність того, що множина типів трафіків, що реально підтримуються, належить заданій множині:

$$P_{m.c}^{TKC}(t) = P(\vec{F}_{m.c}(t) \geq \vec{F}_{m.c.зад}(t)) = P(N_{мин.траф}(t) \in N_{мин.траф.зад}(t)). \quad (2.56)$$

Наступним показником в системі експертних показників якості ТКС визначимо показник безпеки передачі інформації. Мета даного показника – кількісна оцінка здатності ТКС забезпечувати конфіденційність інформації, яка передається та опрацьовується.

В якості експертного показника якості безпеки передачі інформації визначимо коефіцієнт дешифрування інформації, яка циркулює в системі:

$$K_{зах.инф}(t) = 1 - P_{деши.инф}(t), \quad (2.57)$$

де  $P_{деши.инф}(t)$  – імовірність дешифрування інформації за інтервал часу, довжина якого не перевищує значення, яке визначається швидкістю старіння інформації.

Крім того, імовірність  $P_{деши.инф}(t)$  залежить від співвідношення кількості криптографічно захищених і незахищених інформаційних каналів. Дане співвідношення приймемо за коефіцієнт захищеності інформаційних каналів  $K_{зах.ик}(t)$ .

Таким чином, експертний показник безпеки передачі інформації в ТКС запишемо наступним чином:

$$F_{б.прд}^{TKC}(t) = (K_{зах.ик}(t); K_{зах.инф}(t)). \quad (2.58)$$

Імовірнісний критерій оцінювання безпеки задається у вигляді імовірності забезпечення необхідного коефіцієнта захищеності інформаційних каналів:

$$P_{б}^{TKC}(t) = P((K_{зах.ик}(t) \geq K_{зах.ик.необ}(t)) | (K_{зах.инф}(t) \geq K_{зах.инф.необ}(t))). \quad (2.59)$$

З метою кількісної оцінки сукупних витрат для забезпечення функціонування системи використаємо експертний показник витрат ресурсів.

Аналіз робіт [63, 65, 66] свідчить, що оцінку витрат ресурсів проводять згідно із декількома підходами. Один з них полягає у формалізації витрат ресурсів у вигляді вектора:

$$\vec{F}_{рес}^{TKC}(t) = (E_{\Sigma}(t); \Delta f(t); t_{експ\Sigma}), \quad (2.60)$$

де  $E_{\Sigma}(t)$  – енергетичні витрати на процес функціонування ТКС в цілому;

$\Delta f(t)$  – полоса робочих частот, що використовується для організації процесу функціонування ТКС;

$t_{експ\Sigma}$  – час експлуатації ТКС.

З іншого боку, оцінка витрат ресурсів може полягати в оцінці сукупного ресурсу пропускної здатності  $V_{\Sigma}(t)$ , яка може бути реалізована на базі робочих  $V_{роб}(t)$  ТКС резервних ресурсів  $V_{рез}(t)$  пропускної здатності ТКС, яка виражена в обсязі інформації, яка передається або обробляється в одиницю часу.

Враховуючи існуючі підходи, вектор витрат ресурсів на процес функціонування ТКС буде мати вигляд:

$$\vec{F}_{рес}^{TKC}(t) = ( (E_{\Sigma}(t); \Delta f(t); t_{експ\Sigma}), V_{\Sigma}(t) )^T. \quad (2.61)$$

Імовірнісний критерій оцінки витрат ресурсів на процес функціонування системи може бути заданий як сумісна умовна імовірність того, що сукупний ресурс (пропускної здатності, енергетичний, часовий, частотний), який витрачається на реалізацію процесу функціонування ТКС не перевищує необхідного:

$$\begin{aligned} P_{рес}^{TKC}(t) = & P_{V_{\Sigma}}((V_{\Sigma}(t) \leq V_{\Sigma,зад}(t)) | (E_{\Sigma}(t) \leq E_{\Sigma,зад}(t)); (\Delta f_{\Sigma}(t) \leq \Delta f_{\Sigma,зад}(t)); (t_{експ\Sigma} \leq t_{експ\Sigma,зад})) \times \\ & \times P_{енер\Sigma}((E_{\Sigma}(t) \leq E_{\Sigma,зад}(t)) | (\Delta f_{\Sigma}(t) \leq \Delta f_{\Sigma,зад}(t)); (t_{експ\Sigma} \leq t_{експ\Sigma,зад})) \times \\ & \times P_{част\Sigma}((\Delta f_{\Sigma}(t) \leq \Delta f_{\Sigma,зад}(t)); (t_{експ\Sigma} \leq t_{експ\Sigma,зад})) P_{час\Sigma}(t_{експ\Sigma} \leq t_{експ\Sigma,зад}). \end{aligned} \quad (2.62)$$

Таким чином, основними показниками якості функціонування ТКС СП є: продуктивність; стійкість; достовірність передачі; керованість/спостерігаємість; здатність мережі до масштабування; сумісність мережі; мультисервісність; безпечність передачі інформації; витрати ресурсів на реалізацію процесу функціонування ТКС.

## Висновки з розділу

Експертиза телекомунікаційної системи може бути здійснена шляхом визначення та оцінки властивостей системи, кожна з яких може бути описана за допомогою деякої змінної, значення якої характеризує міру якості цих властивостей і представляє собою частковий показник якості ТКС.

Частковим показником якості телекомунікаційної системи будемо вважати кількісну або якісну характеристику одного або декількох властивостей ТКС, які складають якість системи і розглядаються відповідно до певних умов створення та використання ТКС.

Глобальна система показників якості функціонування ТКС складається з локальних систем показників якості функціонування ТКС у відповідності до еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

Аналіз досліджень в цій предметній області показав, що існуючі методи формування системи показників якості не дозволяють врахувати особливості фізичного, каналного і мережевого рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем і потребують подальшого вдосконалення. Таким чином, для оцінки якості функціонування ТКС вибраний фізичний, каналний та мережевий рівень еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

До локальних показників якості фізичного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем віднесені: продуктивність фізичного з'єднання; стійкість фізичного з'єднання; достовірність передачі повідомлень через фізичне з'єднання; можливість спостерігати та управляти об'єктами фізичного рівня з боку об'єктів каналного та мережевого рівнів; витрати ресурсів на організацію фізичного з'єднання.

З метою оцінки ефективності функціонування каналного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем локальними показниками якості вибрані: продуктивність каналного з'єднання; стійкість каналного з'єднання; достовірність передачі повідомлень через каналне з'єднання;

можливість спостереження та управління об'єктами каналного рівня з боку мережевого рівня; безпечність передачі даних через каналне з'єднання; витрати ресурсів на організації каналного з'єднання.

Мережевий рівень еталонної моделі взаємодії відкритих систем забезпечує визначення шляху передачі даних. До показників, які характеризують якість процесів функціонування мережевого рівня телекомунікаційної системи віднесемо наступні характеристики: продуктивність; стійкість; достовірність передачі; керованість/спостерігаємість; здатність мережі до масштабування; сумісність мережі; мультисервісність; безпечність передачі інформації; витрати ресурсів на реалізацію процесу функціонування ТКС.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБКА НАУКОВО-МЕТОДИЧНОГО АПАРАТУ **ТА ПРИСТРОЮ** ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРТИЗИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ **В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

В попередніх розділах була побудована система показників якості функціонування телекомунікаційної системи. Дана система сформована з урахуванням еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

Аналіз предметної області, який був зроблений в попередніх розділах показав, що проведення експертизи телекомунікаційних проектів пов'язано з необхідністю врахування умов невизначеності, які об'єктивно існують практично на кожному етапі експертизи.

У межах даного розділу необхідно сформулювати методику урахування невизначеності вихідних даних, необхідних для експертизи та з використанням такої методики вдосконалити математичні моделі показників якості функціонування телекомунікаційних систем.

### **3.1. Розроблення методики врахування невизначеності вихідних даних при знаходженні експертних показників якості функціонування ТКС**

Аналіз процесу експертизи, який наведений вище, свідчить про наявність фактично на всіх етапах умов невизначеності.

Неврахування умов невизначеності при знаходженні експертних показників якості функціонування ТКС призводить до спрощення (ідеалізації) отриманих результатів, які, в свою чергу, не повною мірою відповідають вимогам до ефективності проведеної експертизи ТКС, що проектується.

Метою даного підрозділу є формулювання підходів до врахування в об'єктивно існуючої невизначеності на етапі розрахунку експертних показ-

ників якості функціонування ТКС та відпрацювання методики такого врахування.

Дослідженню прийняття рішень в умовах невизначеності присвячено ряд робіт [9, 10, 19, 21, 23, 24, 67, 68]. Їх аналіз свідчить про необхідність узагальнення та вибору єдиного підходу до врахування невизначеності в процедурі експертизи.

Як показує аналіз робіт по даній тематиці [27-29, 69, 70], характер невизначеності по-різному впливає на загальну невизначеність процесу моделювання. Найбільший вплив на результат моделювання має невизначеність вихідних даних (близько 82-84 %), відповідно вплив невизначеності математичної моделі (або чисельного методу) оцінюється, як 16-18 %. Дана обставина надає підстави пропонувати до врахування в розроблюваній методиці вплив невизначеності вихідних даних.

Аналіз математичних методів, придатних для врахування характеру невизначеності вихідних даних, дає можливість ці методи розділити на дві основні групи:

методи зменшення впливу неточної інформації з подальшим використанням звичайних детермінованих алгоритмів;

методи переходу (за наявності неточної інформації) до спеціальних алгоритмів (стохастичних, нечітких, інтервальних).

Для першого напрямку характерним є застосування різних методів фільтрації й згладжування вихідної інформації, усереднення й зважування даних. Застосовуються також методи відновлення відсутніх даних, інтерполяції й екстраполювання [65, 66, 71, 72].

При використанні стохастичних моделей виникає цілий ряд труднощів, пов'язаних зі складністю одержання розподілу щільностей ймовірностей для параметрів, нерегулярними явищами при вирішенні стохастичних диференціальних рівнянь.

Таким чином, спроби застосування якого-небудь конкретного математичного апарату (інтервального аналізу, статистичних методів, теорії ігор,

детермінованих моделей тощо) для прийняття рішень в умовах невизначеності дозволяє адекватно відтворити в моделі лише окремі види даних і призводить до безповоротної втрати інформації інших типів.

За браком інформації для суворого застосування імовірнісних моделей і труднощів оперування випадковими величинами, а також у зв'язку з тим, що з інтервальними величинами можна працювати в рамках теорії нечітких множин, остання набуває важливого значення.

З оглядом на зазначене в якості основного інструменту для врахування невизначеності доцільно вибрати методи теорії нечітких множин.

Наступним етапом методики слід вважати формалізацію вихідних даних у вигляді нечітких величин.

З аналізу відомих робіт [19, 24, 28, 29] відомо, що в якості базового поняття теорії нечітких множин використовується «нечітка множина», основою та єдиною можливою характеристикою якої є функція належності.

Враховуючи характер невизначеності та переваги методів теорії нечітких множин для її формалізації оберемо в якості основного способу формалізації вихідних даних використання апарату нечітких чисел.

Нечітке число  $\tilde{x} = (a, \gamma, \delta)$  представляє собою нечітку множину з функцією належності вигляду [24, 28, 29]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \frac{a-x}{\gamma}, & \text{для } -\gamma \leq x \leq a \\ 1 - \frac{x-a}{\delta}, & \text{для } a \leq x \leq a + \delta \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \frac{a-x}{\gamma}, & \text{для } -\gamma \leq x \leq a \\ 1, & \text{для } a \leq x \leq b \\ 1 - \frac{x-b}{\delta}, & \text{для } b \leq x \leq b + \delta \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (3.2)$$

Графічна інтерпретація функції належності представлена на рис. 3.1.



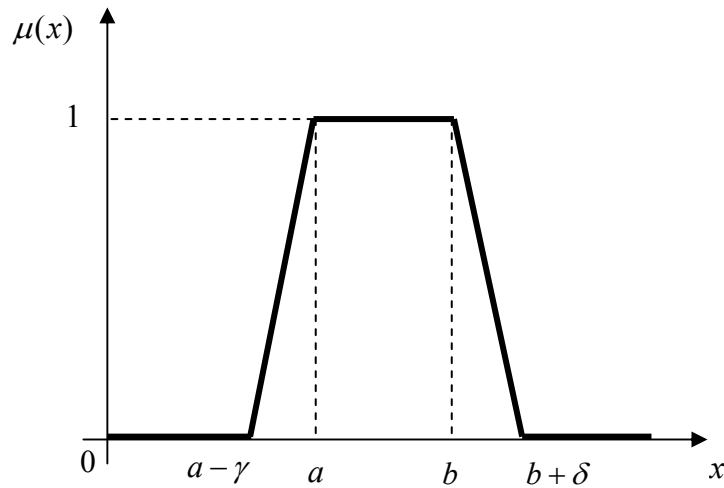


Рис. 3.1. Графік функції належності нечіткого числа  $\tilde{x}$

На ньому (в загальному випадку) відрізок  $[a, b]$  є інтервалом найбільш імовірного знаходження значення нечіткого числа  $\tilde{x}$ , інтервал  $[a - \gamma, b + \delta]$  та характеризує область імовірного знаходження значення нечіткого числа  $\tilde{x}$ , а величини  $\gamma, \delta$  - відповідно лівий та правий коефіцієнт нечіткості.

В умовах вирішуваної задачі на основі зібраного статистичного матеріалу, або завдяки опитуванню групи експертів можна визначити інтервали імовірного знаходження вихідних даних і представити їх у вигляді нечітких чисел з відповідними функціями належності.

З [27-29] відомо, якщо у функції від  $n$  незалежних змінних  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  аргументи  $x_1, x_2, \dots, x_n$  задані нечіткими числами, то і значення самої функції буде нечітким числом  $\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$  з відповідною функцією належності.

Таким чином, наступним етапом опрацьовуваної методики вважати- мемо дослідження показників якості функціонування ТКС з врахуванням того факту, що вихідними даними для моделювання є частково або повністю нечіткі числа. При цьому основний зміст методики полягатиме в виконанні математичних операції над нечіткими числами.

Як свідчить аналіз робіт [27-29, 67], існує два основних способи ведення операцій над нечіткими числами:

використання принципу узагальнення Заде;

використання  $\alpha$  - рівневого принципу узагальнення.

Використання першого принципу полягатиме у наступному. Якщо  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  - функція від  $n$  незалежних змінних й аргументи задані нечіткими числами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , відповідно, то значенням функції  $\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$  називається нечітке число  $\tilde{y}$  з функцією належності:

$$\mu_{\tilde{y}}(y^*) = \sup \min_{i=1, n} (\mu_{\tilde{x}_i}(x_i^*)), \quad (3.3)$$

де  $y^* = f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ ,  $x_i^* \in \sup p(\tilde{x}_i), i = \overline{1, n}$ .

Другий принцип дозволить знайти функцію належності нечіткого числа, що відповідає значенню чіткої функції від нечітких аргументів. Наведений підхід заснований на представленні нечіткого числа на дискретній універсальній множині, тобто:

$$\tilde{x} = \sum_{p=1}^P \mu_{\tilde{x}}(x_p) / x_p. \quad (3.4)$$

Зазвичай вихідні дані  $\tilde{x}_i, i = \overline{1, n}$  задаються кусочно-безперервними функціями належності. Для обчислення значень функції  $\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$  аргументи  $\tilde{x}_i, i = \overline{1, n}$  дискретизують, тобто представляють у вигляді:

$$\tilde{x}_i = \sum_{p=1}^P \mu_{\tilde{x}_i}(x_{i,p}) / x_{i,p}. \quad (3.5)$$

Число точок  $R$  вибирають так, щоб забезпечити необхідну точність обчислень. На виході алгоритму утворюється нечітка множина, також задана на дискретній універсальній множині. Результуючу кусочно-безперервну функцію належності нечіткого числа  $\tilde{y}$  одержують, як верхню огинаючу точок  $(y^*, \mu_{\tilde{y}}(y^*))$ .

Варто зазначити, що використання такого підходу пов'язано з двома труднощами, а саме:

з великим обсягом обчислень – кількість елементів результуючої нечіткої множини, які необхідно опрацювати, дорівнює  $r_1, r_2, \dots, r_i$ , де  $r_i$  - кількість точок, на яких задано  $i$ -й нечіткий аргумент,  $i = \overline{1, n}$ ;

з необхідністю побудови верхньої лінії, яка огинає елементи результуючої нечіткої множини.

При застосуванні  $\alpha$  - рівневого принципу узагальнення нечіткі числа представляються у вигляді розкладань по  $\alpha$ - рівневим множинам:

$$\tilde{x} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{x}_\alpha, \bar{x}_\alpha), \quad (3.6)$$

де  $\underline{x}_\alpha$  ( $\bar{x}_\alpha$ ) - мінімальне (максимальне) значення  $\tilde{x}$  на  $\alpha$  - рівні.

Відповідно, значення нечіткого числа  $\tilde{y}$  для  $\alpha$ - рівневого принципу узагальнення набуде вигляду:

$$\tilde{y} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{y}_\alpha, \bar{y}_\alpha), \quad (3.7)$$

де  $\underline{y}_\alpha = \inf_{x_{i,\alpha} \in [\underline{x}_{j,\alpha}, \bar{x}_{j,\alpha}]} (f(x_{1,\alpha}, x_{2,\alpha}, \dots, x_{n,\alpha}))$  та  $\bar{y}_\alpha = \sup_{x_{i,\alpha} \in [\underline{x}_{j,\alpha}, \bar{x}_{j,\alpha}]} (f(x_{1,\alpha}, x_{2,\alpha}, \dots, x_{n,\alpha}))$ ,  $j = \overline{1, n}$ .

Застосування  $\alpha$ - рівневого принципу узагальнення зводиться до рішення для кожного  $\alpha$ - рівня наступної задачі оптимізації: знайти максимальне та мінімальне значення функції  $\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$  за умови, що аргументи будуть приймати значення з відповідних  $\alpha$ - рівневих множин. Кількість  $\alpha$ - рівнів вибирають таким чином, щоб забезпечити необхідну точність обчислень.

Для формулювання основних правил виконання арифметичних операцій з нечіткими числами скористаємось виразом (3.2) та дослідимо, як вираховується значення нечіткої функції від нечітких аргументів.

Правила виконання арифметичних операцій над позитивними нечіткими числами наведені в таблиці 3.1. У таблиці 3.1.  $\underline{y}, \bar{y}$  - максимальне та мінімальне значення функції  $\tilde{y}$  на відповідному  $\alpha$ - рівні.

Певну цікавість своєю неординарністю викликає вираз виду:  $\tilde{y} = \frac{1}{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2}$ .

Результати дослідження цього виразу наведені в таблиці 3.2. Як видно з таблиці 3.2, вигляд результату знаходження мінімального та максимального значення функції  $\tilde{y}$  залежить від характеру нечітких чисел (функцій належності нечітких чисел).

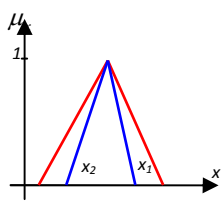
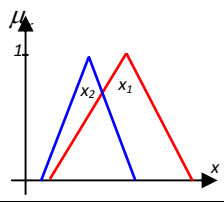
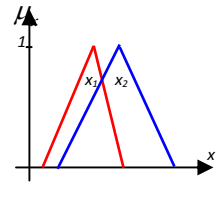
Таблиця 3.1

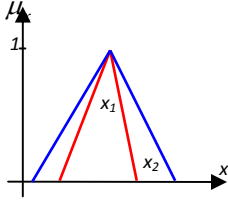
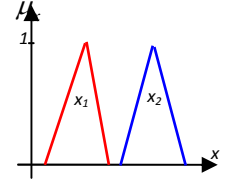
Правила виконання арифметичних операцій з нечіткими числами для деяких арифметичних виразів

Арифметичний вираз	$\underline{y}$	$\overline{y}$
$\tilde{y} = \tilde{x}_1 + \tilde{x}_2$	$\underline{x}_1 + \underline{x}_2$	$\overline{x}_1 + \overline{x}_2$
$\tilde{y} = \tilde{x}_1 - \tilde{x}_2$	$\underline{x}_1 - \overline{x}_2$	$\overline{x}_1 - \underline{x}_2$
$\tilde{y} = \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2$	$\underline{x}_1 \cdot \underline{x}_2$	$\overline{x}_1 \cdot \overline{x}_2$
$\tilde{y} = \frac{\tilde{x}_1}{\tilde{x}_2}$	$\frac{\underline{x}_1}{\underline{x}_2}$	$\frac{\overline{x}_1}{\overline{x}_2}$
$\tilde{y} = \frac{1}{\tilde{x}_1 + \tilde{x}_2}$	$\frac{1}{\underline{x}_1 + \underline{x}_2}$	$\frac{1}{\overline{x}_1 + \overline{x}_2}$
$\tilde{y} = \frac{1}{\tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2}$	$\frac{1}{\underline{x}_1 \cdot \underline{x}_2}$	$\frac{1}{\overline{x}_1 \cdot \overline{x}_2}$

Таблиця 3.2

Верхні та нижні оцінки функції виду  $\tilde{y} = \frac{1}{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2}$  від нечітких аргументів

Графіки функцій належності нечітких чисел $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$	$\underline{y}$	$\overline{y}$
	$\left  \frac{1}{\underline{x}_1 - \underline{x}_2} \right $	$\left  \frac{1}{\overline{x}_1 - \overline{x}_2} \right $
	$\left  \frac{1}{\underline{x}_1 - \underline{x}_2} \right $	$\left  \frac{1}{\overline{x}_1 - \overline{x}_2} \right $
	$\left  \frac{1}{\underline{x}_1 - \underline{x}_2} \right $	$\left  \frac{1}{\overline{x}_1 - \overline{x}_2} \right $

Графіки функцій належності нечітких чисел $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$	$\underline{y}$	$\overline{y}$
	$\left  \frac{1}{\underline{x}_1 - \underline{x}_2} \right $	$\left  \frac{1}{\overline{x}_1 - \overline{x}_2} \right $
	$\left  \frac{1}{\underline{x}_1 - \underline{x}_2} \right $	$\left  \frac{1}{\underline{x}_1 - \overline{x}_2} \right $

Таким чином, аналіз вигляду нечіткої функції та наведені вище правил виконання арифметичних операцій дають можливість знайти мінімальне та максимальне значення нечіткої функції від нечітких аргументів по кожному з  $\alpha$ -рівні.

Використання того чи іншого принципу узагальнення призведе до знаходження функції належності нечіткого результату множини всіх можливих та множини найбільш імовірних значень параметру, який моделюється.

Структура методики врахування невизначеності в вихідних даних при знаходженні експертних показників якості функціонування ТКС СП наведена на рисунку 3.2.

Розроблена методика реалізована у вигляді програмного продукту «Нечіткі розрахунки», написаного у системі програмування Borland Delphi7.0. Даний програмний продукт дає можливість розраховувати нижні та верхні оцінки нечітких функцій від будь-якої кількості нечітких аргументів та будувати графіки функції належності нечіткої функції та графіки функцій належності нечітких вихідних даних. Вигляд нечіткої функції та вихідні дані для розрахунків задаються у текстовому файлі.

Текст програми реалізації програмного продукту «Нечіткі розрахунки» наведений у додатку А.

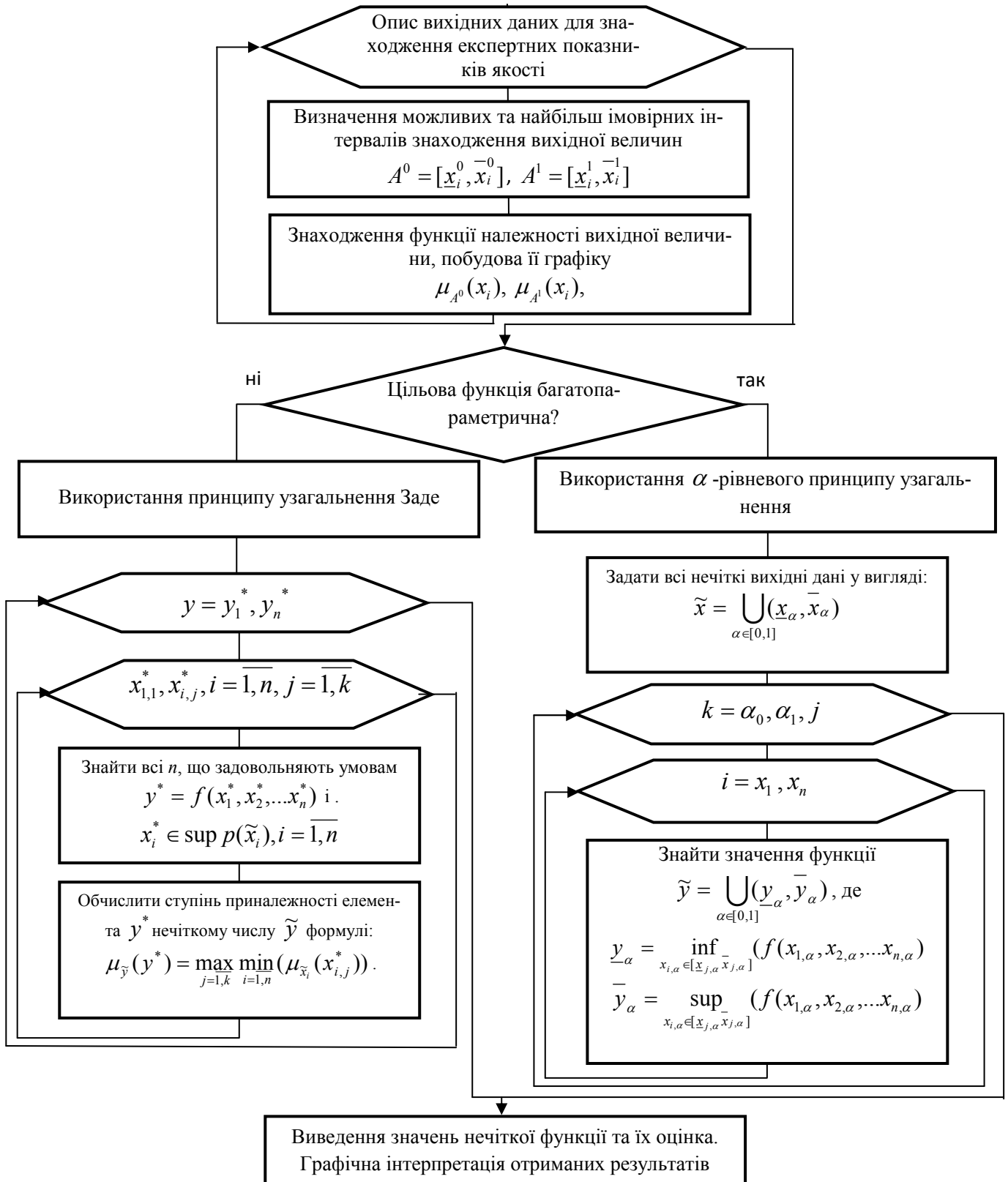


Рис. 3.2. Структура методики врахування невизначеності в вихідних даних при визначенні експертних показників якості функціонування ТКС

### **3.2. Удосконалення математичних моделей визначення показників якості для урахування невизначеності параметрів функціонування ТКС**

У першому розділі було показано, що на багатьох етапах проведення експертизи існують елементи невизначеності. Відсутність механізмів врахування умов невизначеності може призвести до зниження достовірності та об'єктивності експертизи, тобто до зниження її якості.

Метою даного підрозділу є розвиток моделей для визначення показників якості функціонування ТКС з урахуванням умов невизначеності.

У першому розділі функціонування ТКС розглядалось з точки зору моделі взаємодії відкритих систем. Система експертних показників для оцінки якості функціонування ТКС складається з систем експертних показників якості функціонування ТКС на фізичному, каналному та мережевому рівнях моделі взаємодії відкритих систем.

Розглянемо послідовно математичні моделі для визначення експертних показників якості функціонування для кожного рівня.

#### ***3.2.1. Удосконалення математичних залежностей показників якості функціонування телекомунікаційної системи для фізичного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем.***

До експертних показників якості функціонування ТКС на фізичному рівні у підрозділі 2.1. були віднесені наступні показники (рис. 3.3):

- продуктивність;
- стійкість;
- достовірність передачі повідомлень;
- можливість спостерігати та управляти об'єктами фізичного рівня з боку об'єктів каналного та мережевого рівнів;
- витрати ресурсів на організацію фізичного з'єднання.

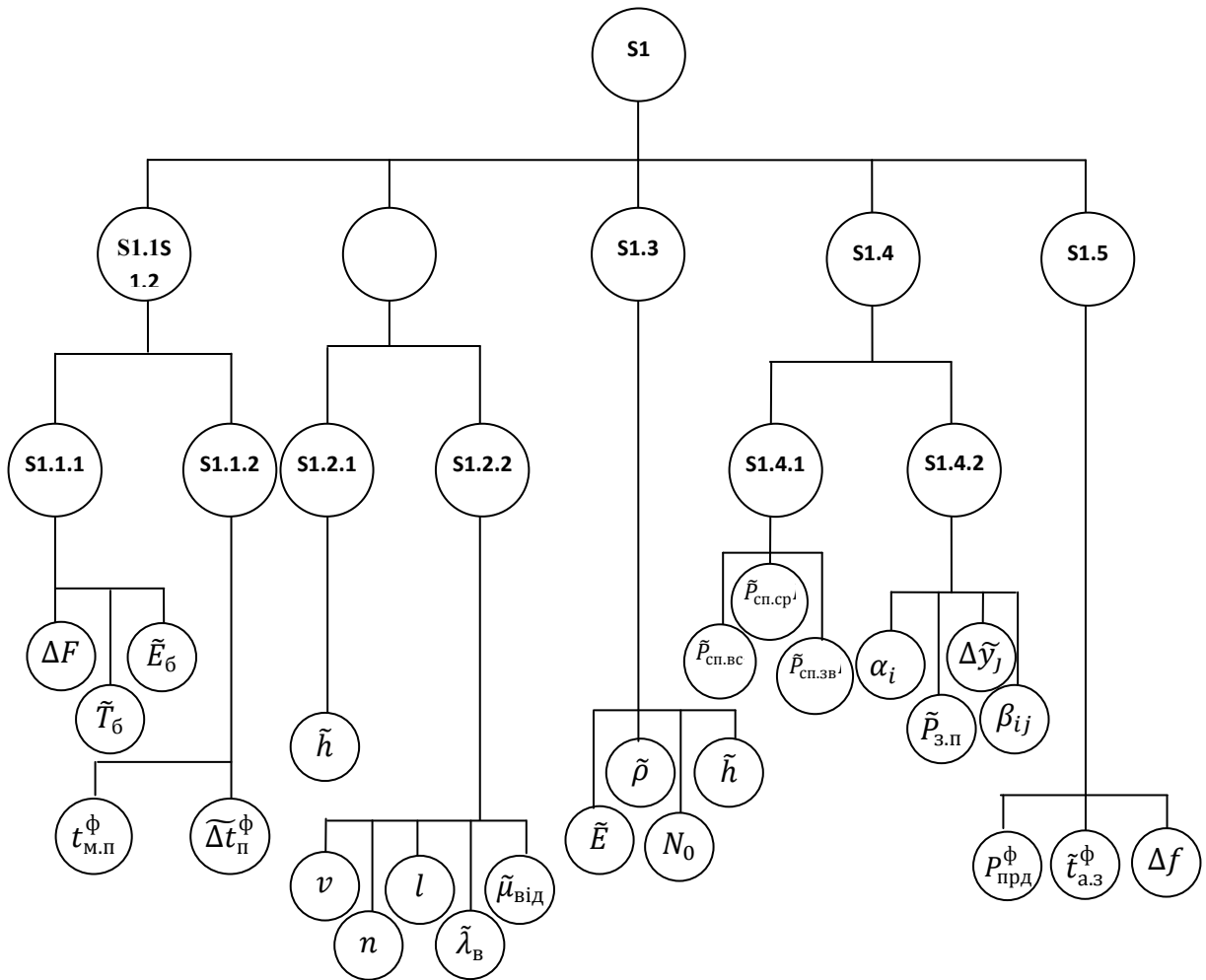


Рис. 3.3. Система показників якості функціонування ТКС для фізичного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем

Показники якості функціонування ТКС для фізичного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем представляють множину:

$$S1 = \langle S1.1, S1.2, S1.3, S1.4, S1.5 \rangle. \quad (3.8)$$

Пояснення щодо характеру показників, математичних виразів для їх розрахунку та перелік вихідних даних наведений у таблиці 3.3.

Аналіз характеру вихідних даних, на основі яких необхідно визначати показники якості функціонування ТКС на фізичному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем свідчить, що відсоток даних, які носять нечіткий характер дорівнює 55,2%.



Таблиця 3.3

## Показники якості функціонування ТКС на фізичному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем

Показник якості	Часткові показники якості	Математичний вираз
Продуктивність фізичного рівня ТКС (SI.1)	Пропускна спроможність (SI.1.1)	$\tilde{C}_{п.с}^{\phi}(t) = \Delta F \log_2 \left( 1 + \frac{\tilde{E}_6}{\tilde{T}_6 \Delta F \sigma^2} \right)$
	Затримка передачі (SI.1.2)	$\tilde{T}_3^{\phi} = t_{м.п}^{\phi} + \tilde{\Delta t}_{п}^{\phi}(t)$
<b>Вихідні дані:</b>		
<p><math>\Delta F</math> – полоса частот;  <math>\tilde{E}_6</math> – нечітка величина енергії, яка витрачається на передачу одного біту даних;  <math>\tilde{T}_6</math> – нечітка величина часу, який витрачається на передачу одного біту даних;  <math>\Delta F \sigma^2</math> – середня потужність шуму в полосі частот <math>\Delta F</math> з нульовим математичним очікуванням і дисперсією <math>\sigma^2</math>;  <math>t_{м.п}^{\phi}</math> – максимальний інтервал часу між моментом надходження біта інформації на вхід з'єднання і моментом появи його на виході;  <math>\tilde{\Delta t}_{п}^{\phi}(t)</math> – нечітка величина варіації затримки передачі.</p>		
Стійкість ТКС на фізичному рівні (SI.2)	Завадозахищеність ТКС на фізичному рівні (SI.2.1)	$\tilde{P}_{3.3}^{\phi}(t) = \frac{1}{2} \exp(-\tilde{h})$
	Надійність фізичного з'єднання (SI.2.2)	$\tilde{F}_н^{\phi}(t) = 1 - (v + n)! l^l \left( \frac{\tilde{\lambda}_в}{l \tilde{\mu}_{від}} \right)^{n+1} \frac{1}{v! l!}$
<b>Вихідні дані:</b>		
<p><math>v</math> – кількість робочих елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;  <math>n</math> – кількість резервних елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;  <math>l</math> – кількість елементів, що безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних і одночасно відновлюють свою працездатність;  <math>\tilde{\lambda}_в</math> – нечітка величина інтенсивності відмов елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;  <math>\tilde{\mu}_{від}</math> – нечітка величина інтенсивності відновлення елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;  <math>\tilde{h}</math> – нечітка величина відношення сигнал/шум на вході приймача.</p>		
Достовірність передачі даних по фізичному з'єднанню (SI.3)	$\tilde{P}_п^{\phi}(t) = 1 - F \left( \sqrt{\frac{\tilde{E}(1-\tilde{\rho})}{N_0}} \right)$ – в умовах реалізації кореляційного методу обробки ортогональних сигналів;	
	$\tilde{P}_п^{\phi}(t) = 2 \left[ 1 - F \left( \sqrt{2\tilde{E}/N_0} \right) \right] F \left( \sqrt{2\tilde{E}/N_0} \right)$ – в умовах реалізації зміщеної квадратурної фазової маніпуляції сигналів в умовах флуктуаційних завод;	
	$\tilde{P}_п^{\phi}(t) = \frac{1}{2(1+\tilde{h})}$ – в умовах флуктуаційних завод при реалізації частотної модуляції;	
	$\tilde{P}_п^{\phi}(t) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{\pi\tilde{h}}} \right) e^{-\tilde{h}/4}$ – в умовах флуктуаційних завод при реалізації амплітудної модуляції.	
<b>Вихідні дані:</b>		

Показник якості	Часткові показники якості	Математичний вираз
$\tilde{E}$ – нечітка величина енергії одиничного та нульового сигналу; $\tilde{\rho}$ – нечітка величина коефіцієнту кореляції одиничного та нульового сигналу; $F(x)$ – інтегральна функція нормального закону розподілу; $N_0$ – спектральна щільність потужності сигналу; $\tilde{h}$ – нечітка величина відношення сигнал/шум на вході приймача.		
Спостерігаємість-керіваність фізичного рівня ТКС (SI.4)	Спостерігаємість стану інформаційного обміну на фізичному рівні ТКС (SI.4.1)	$\tilde{P}_{cn}^{\phi}(t) = 1 - (1 - \tilde{P}_{cn.sc}(t))(1 - \tilde{P}_{cn.cp}(t))(1 - \tilde{P}_{cn.zv}(t))$
	Керіваність з'єднанням на фізичному рівні ТКС (SI.4.2)	$\Delta \tilde{F}_{неуз.у}^{\phi}(t) = \sum_{k=1}^{N_{у.в}^{\phi}} \tilde{P}_{з.п}(t) \sum_{i=1}^{N_{ПЯ}^{\phi}} \alpha_{ki}(t) \times \prod_{j=1}^{N_{ел.ПЯ}^{\phi}} \beta_{kij} \Delta \tilde{y}_j(t)$
<p><b>Вихідні дані:</b></p> $\tilde{P}_{cn.sc}(t)$ – нечітка величина імовірності спостерігаємості значень внутрішнього стану фізичного з'єднання (продуктивності, стійкості, безпеки і т.д.); $\tilde{P}_{cn.cp}(t)$ – нечітка величина імовірності спостерігаємості параметрів середовища розповсюдження (коефіцієнту передачі середовища розповсюдження); $\tilde{P}_{cn.zv}(t)$ – нечітка величина імовірності спостерігаємості параметрів зовнішніх впливів; $N_{у.в}^{\phi}$ - кількість варіантів управляючих впливів на фізичному рівні; $\tilde{P}_{з.п}(t)$ - нечітка величина імовірності застосування зловмисником $k$ -го варіанту протидії; $N_{ПЯ}^{\phi}, N_{ел.ПЯ}^{\phi}$ - кількість векторів показників якості інформаційного обміну фізичного рівня і елементів цих векторів відповідно; $\Delta \tilde{y}_j(t)$ - нечітка величина відхилення оцінки $j$ -го елементу $i$ -го вектора показника якості інформаційного обміну через фізичне з'єднання; $\alpha_i$ - степінь важливості $i$ -го вектора показника якості; $\beta_{ij}$ - степінь важливості $j$ -го елементу $i$ -го вектора показника якості.		
Витрати ресурсів для організації фізичного з'єднання ТКС (SI.5)	$\tilde{E}^{\phi}(t) = P_{прд}^{\phi}(t) \tilde{t}_{a.з}^{\phi}$ $\Delta \tilde{f}^{\phi}(t) = (\tilde{t}, \tilde{t}_{a.з}^{\phi}) \Delta f(t)$	
<p><b>Вихідні дані:</b></p> $P_{прд}^{\phi}(t)$ – потужність пристрою, який передає; $\tilde{t}_{a.з}^{\phi}$ – нечітка величина активності фізичного з'єднання; $(\tilde{t}, \tilde{t}_{a.з}^{\phi})$ – нечітка величина селектора часового інтервалу; $\Delta f(t)$ – кількість діапазонів частот, які використовуються для організації фізичного з'єднання.		

Користуючись методикою, що розглядалась вище, вдосконалимо математичні вирази для розрахунку показників якості функціонування ТКС на фізичному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем з врахуванням нечіткого характеру вихідних даних.

Враховуючи, що при визначенні вихідних даних експерту (особі, яка приймає рішення) найпростіше визначити максимально можливий і найбільш імовірний інтервал їх знаходження, в якості інструменту для роботи з нечіткими величинами використаємо  $\alpha$ -рівневий принцип узагальнення.

Співставивши результати досліджень, які наведені вище математичним виразам розрахунку показників оцінки ефективності, запишемо математичні вирази для знаходження верхньої та нижньої оцінки наведених вище показників. Результати цього опрацювання наведені у табл. 3.4.

Використання математичних виразів, наведених у таблиці 3.4 дають можливість знайти значення показників якості функціонування ТКС для фізичного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем у вигляді максимально можливого та найбільш імовірного інтервалів цих величин та у подальшому використовувати ці оцінки під час проведення експертизи.

Таблиця 3.4

Математичні вирази для розрахунку експертних показників якості функціонування ТКС на фізичному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем в умовах невизначеності

Назва показника	Нижня оцінка	Верхня оцінка
Пропускна спроможність (S1.1.1)	$\underline{C}_{п.с}^{\phi}(t) = \Delta F \log_2 \left( 1 + \frac{\underline{E}_6}{T_6 \Delta F \sigma^2} \right)$	$\overline{C}_{п.с}^{\phi}(t) = \Delta F \log_2 \left( 1 + \frac{\overline{E}_6}{T_6 \Delta F \sigma^2} \right)$
Затримка передачі (S1.1.2)	$\underline{T}_3^{\phi} = t_{м.п}^{\phi} + \underline{\Delta t}_п^{\phi}(t)$	$\overline{T}_3^{\phi} = t_{м.п}^{\phi} + \overline{\Delta t}_п^{\phi}(t)$
Завадозахищеність ТКС (S1.2.1)	$\underline{P}_{3.3}^{\phi}(t) = \frac{1}{2} \exp(-\underline{h})$	$\overline{P}_{3.3}^{\phi}(t) = \frac{1}{2} \exp(-\overline{h})$
Надійність фізичного з'єднання (S1.2.2)	$\underline{F}_н^{\phi}(t) = 1 - (v + n)! l^l \left( \frac{\underline{\lambda}_B}{l \underline{\mu}_{Від}} \right)^{n+1} \frac{1}{v! l!}$	$\overline{F}_н^{\phi}(t) = 1 - (v + n)! l^l \left( \frac{\overline{\lambda}_B}{l \overline{\mu}_{Від}} \right)^{n+1} \frac{1}{v! l!}$
Достовірність передачі даних (S1.3)	$\underline{P}_п^{\phi}(t) = 1 - F \left( \sqrt{\underline{E}(1 - \underline{\rho}) / N_0} \right)$	$\overline{P}_п^{\phi}(t) = 1 - F \left( \sqrt{\overline{E}(1 - \overline{\rho}) / N_0} \right)$
Спостерігаємість стану інформаційного обміну ТКС (S1.4.1)	$\underline{P}_{сп}^{\phi}(t) = 1 - \left( 1 - \overline{P}_{сп.вс}(t) \right) * \\ * \left( 1 - \overline{P}_{сп.сп}(t) \right) \left( 1 - \overline{P}_{сп.зв}(t) \right)$	$\overline{P}_{сп}^{\phi}(t) = 1 - \left( 1 - \underline{P}_{сп.вс}(t) \right) * \\ * \left( 1 - \underline{P}_{сп.сп}(t) \right) \left( 1 - \underline{P}_{сп.зв}(t) \right)$
Керованість фізичним з'єднанням на фізичному рівні ТКС (S1.4.2)	$\Delta \underline{F}_{неуз.у}^{\phi}(t) = \sum_{k=1}^{N_{у.в}^{\phi}} \underline{P}_{з.п}(t) \sum_{i=1}^{N_{п.я}^{\phi}} \alpha_{k_i}(t) \times \prod_{j=1}^{N_{ел.п.я}^{\phi}} \beta_{k_{ij}} \Delta \underline{y}_j(t)$	$\Delta \overline{F}_{неуз.у}^{\phi}(t) = \sum_{k=1}^{N_{у.в}^{\phi}} \overline{P}_{з.п}(t) \sum_{i=1}^{N_{п.я}^{\phi}} \alpha_{k_i}(t) \times \prod_{j=1}^{N_{ел.п.я}^{\phi}} \beta_{k_{ij}} \Delta \overline{y}_j(t)$
Витрати ресурсів для організації фізичного з'єднання ТКС (S1.5)	$\underline{E}^{\phi}(t) = P_{прд}^{\phi}(t) \underline{t}_{а.з}^{\phi}$ $\Delta \underline{f}^{\phi}(t) = (\underline{t}, \underline{t}_{а.з}^{\phi}) \Delta f(t)$	$\overline{E}^{\phi}(t) = P_{прд}^{\phi}(t) \overline{t}_{а.з}^{\phi}$ $\Delta \overline{f}^{\phi}(t) = (\overline{t}, \overline{t}_{а.з}^{\phi}) \Delta f(t)$

**3.2.2. Удосконалення математичних залежностей показників якості функціонування телекомунікаційної системи для каналного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем.**

До експертних показників якості функціонування ТКС на каналному рівні у підрозділі 2.2 були віднесені наступні показники:

- продуктивність каналного з'єднання;
- стійкість каналного з'єднання;
- достовірність передачі повідомлень через каналне з'єднання;
- можливість спостереження та управління об'єктами каналного рівня з боку мережевого рівня;
- безпеку передачі даних через каналне з'єднання;
- витрати ресурсів на організації каналного з'єднання.

Показники якості функціонування ТКС для каналного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем представляють множину:

$$S_2 = \langle S_{2.1}, S_{2.2}, S_{2.3}, S_{2.4}, S_{2.5}, S_{2.6} \rangle. \quad (3.9)$$

Система показників якості каналного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем представлена на рисунку 3.4.

Пояснення щодо характеру показників, математичних виразів для їх розрахунку та перелік вихідних даних наведений у табл. 3.5.

Аналіз характеру вихідних даних, на основі яких необхідно визначати показники якості функціонування ТКС на каналному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем свідчить, що відсоток даних, які носять нечіткий характер дорівнює 48,5%.

Користуючись методикою, яка розглядалась вище, вдосконалимо математичні вирази для розрахунку показників якості функціонування ТКС на фізичному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем з врахуванням нечіткого характеру вихідних даних.

Враховуючи, що при визначенні вихідних даних експерту (особі, яка приймає рішення) найпростіше визначити максимально можливий і най-

більш імовірний інтервал їх знаходження, в якості інструменту для роботи з нечіткими величинами використаємо  $\alpha$ -рівневий принцип узагальнення.

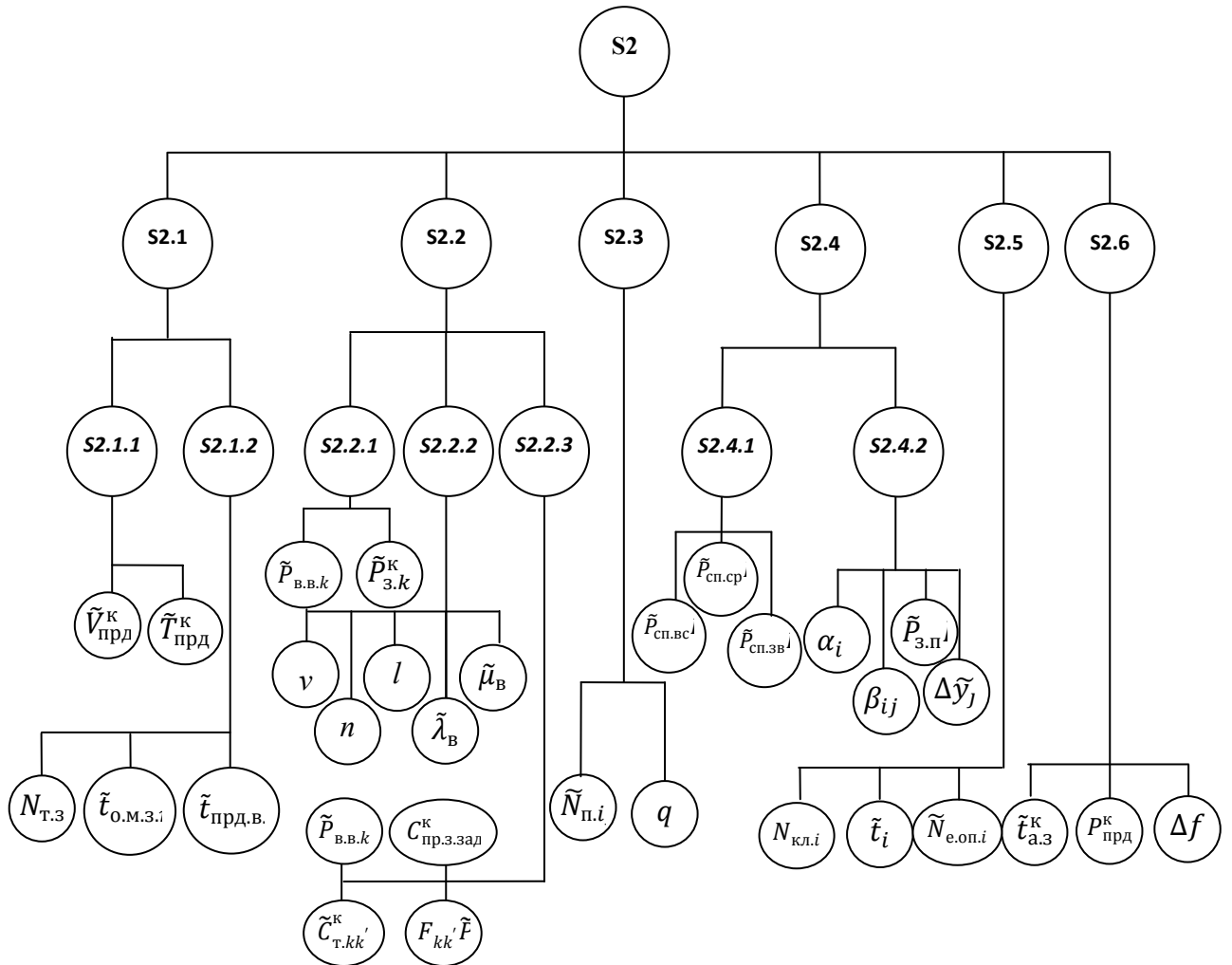


Рис.3.4. Система показників якості функціонування ТКС для каналного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем

Співставивши результати досліджень, які наведені вище математичним виразам розрахунку показників оцінки ефективності, запишемо математичні вирази для знаходження верхньої та нижньої оцінки наведених вище показників. Результати цього опрацювання наведені у табл. 3.6.

Таблиця 3.5

Показники якості функціонування ТКС на каналному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем

Показник якості	Часткові показники якості	Математичний вираз
Продуктивність каналного рівня ТКС (S2.1)	Пропускна здатність (S2.1.1)	$\tilde{C}_{\text{пр.зд}}^k(t) = \frac{\tilde{V}_{\text{прд}}^k(t)}{\tilde{T}_{\text{прд}}^k(t)}$
	Час реакції каналного з'єднання (S2.1.2)	$\tilde{T}_{\text{ч.реак}}^k(t) = \frac{1}{N_{\text{т.з}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{т.з}}} (\tilde{t}_{\text{о.м.з.н}} + \tilde{t}_{\text{прд.в.н}})$
<p><b>Вихідні дані:</b>  <math>N_{\text{т.з}}</math> – кількість типів каналних з'єднань;  <math>n</math> – кількість типів каналів інформаційного обміну;  <math>\tilde{t}_{\text{о.м.з.н}}</math> – нечітка величина часу, який витрачається на обробку мережевого запиту на каналне з'єднання <math>n</math>-го типу;  <math>\tilde{t}_{\text{прд.в.н}}</math> – нечітка величина часу передачі відповіді на мережевий рівень щодо стану з'єднання.</p>		
Стійкість ТКС на каналному рівні (S2.2)	Об'єктова стійкість каналного з'єднання (S2.2.1)	$\tilde{P}_{\text{о.с}}^k(t) = 1 - \sum_{k=1}^{K_{\text{в.в}}} \tilde{P}_{\text{в.в.к}}(t)(1 - \tilde{P}_{\text{з.к}}^k(t))$
	Об'єктова технічна надійність каналного з'єднання (S2.2.2)	$\tilde{P}_{\text{о.т.н}}^k(t) = 1 - \frac{(m+v)! l^l}{l! v!} \cdot \left(\frac{\tilde{\lambda}_{\text{в}}}{l \tilde{\mu}_{\text{в}}}\right)^{m+1}$
	Функціональна стійкість каналного з'єднання (S2.2.3)	$\tilde{P}_{\text{ф.ст}}^k(t) = \frac{1}{C_{\text{пр.з.зад}}^k(t)} \sum_{k=1}^{N_{\text{вв}}} (1 - \tilde{P}_{\text{в.в.к}}(t)) \times \sum_{k'=1}^{N_{\text{вп}}} \tilde{C}_{\text{т.кк}'}^k(t-1) \times F_{\text{кк}'}(t-1, t)$
<p><b>Вихідні дані:</b>  <math>v</math> – кількість робочих елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;  <math>m</math> – кількість резервних елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;  <math>\tilde{P}_{\text{в.в.к}}(t)</math> – нечітка величина імовірності застосування зловмисником <math>k</math>-го варіанту протидії;  <math>\tilde{P}_{\text{з.к}}^k(t)</math> – нечітка величина імовірності захищеності каналу інформаційного обміну при <math>k</math>-го варіанту протидії;  <math>N_{\text{вв}}</math> – кількість можливих варіантів впливу з боку зловмисника;  <math>N_{\text{вп}}</math> – кількість можливих варіантів протидії, які реалізовані на каналному рівні;  <math>l</math> – кількість елементів, що безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних і одночасно відновлюють свою працездатність;  <math>\tilde{\lambda}_{\text{в}}</math> – нечітка величина інтенсивності відмов елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;</p>		

Показник якості	Часткові показники якості	Математичний вираз
$\tilde{\mu}_B$ – нечітка величина інтенсивності відновлення елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних; $C_{пр.з.зад}^k(t)$ - задана пропускна здатність на каналному рівні; $\tilde{C}_{т.кк'}^k(t-1)$ - нечітка величина технічної пропускної здатності при $k'$ способі протидії застосуванню зловмисником $k$ -го варіанта впливу на $(t-1)$ -му етапі функціонування; $F_{kk'}(t-1, t)$ - функція корисності для оцінки варіантів відновлення каналного з'єднання.		
Достовірність інформаційного обміну по каналному з'єднанню (S2.3)		$\tilde{K}_n^k(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \tilde{N}_{n,ij}(t)$
<b>Вихідні дані:</b>		
$\tilde{N}_{n,ij}(t)$ – нечітка величина кількості помилок в повідомленнях з $i$ -м пріоритетом трафіку і $j$ -м пріоритетом користувача; $i=1, \dots, n$ – номер пріоритету, який визначається видом трафіку; $j=1, \dots, q$ – номер користувацького пріоритету.		
Спостерігаємість-керуваність каналного рівня ТКС (S2.4)	Спостерігаємість стану інформаційного обміну на каналному рівні ТКС(S2.4.1)	$\tilde{P}_{cn}^k(t) = 1 - (1 - \tilde{P}_{cn,sc}(t))(1 - \tilde{P}_{cn,cp}(t))(1 - \tilde{P}_{cn,ze}(t))$
	Керуваність каналним з'єднанням на каналному рівні ТКС(S2.4.2)	$\Delta \tilde{F}_{неуз.у}^k(t) = \sum_{k=1}^{N_{у.в.к}^k} \tilde{P}_{з.п}(t) \sum_{i=1}^{N_{п.я}^k} \alpha_{k_i}(t) \times \times \prod_{j=1}^{N_{ел.п.я}^k} \beta_{k_{ij}} \Delta \tilde{y}_j(t)$
<b>Вихідні дані:</b>		
$\tilde{P}_{cn,sc}(t)$ – імовірність спостерігаємість значень внутрішнього стану каналного і фізичного з'єднань (продуктивності, стійкості, безпеки і т.д.); $\tilde{P}_{cn,cp}(t)$ – імовірність спостерігаємість параметрів середовища розповсюдження (коефіцієнт передачі середовища розповсюдження); $\tilde{P}_{cn,ze}(t)$ – імовірність спостерігаємість параметрів зовнішніх впливів (зовнішнє інформаційне навантаження); $\tilde{P}_{в.в.к}(t)$ - нечітка величина імовірності застосування зловмисником $k$ -го варіанту протидії; $N_{у.в.к}^k$ - кількість варіантів управляючих впливів на підсистеми управління каналного рівня; $\tilde{P}_{з.п}(t)$ - нечітка величина імовірності застосування зловмисником $v$ -го варіанту протидії; $N_{п.я}^k, N_{ел.п.я}^k$ - кількість векторів показників якості інформаційного обміну каналного рівня і елементів цих векторів відповідно; $\Delta \tilde{y}_j(t)$ - нечітка величина відхилення оцінки $j$ -го елементу $i$ -го вектора показника якості інформаційного обміну через каналне		



Показник якості	Часткові показники якості	Математичний вираз
з'єднання; $\alpha_i$ - степінь важливості $i$ -го вектора показника якості; $\beta_{ij}$ - степінь важливості $j$ -го елементу $i$ -го вектора показника якості.		
Безпека передачі інформації на каналному рівні ТКС (S2.5)	$\tilde{K}_{6.п}^k = \sum_{i=1}^{N_{a.ш}} N_{кл.i} + \frac{\tilde{N}_{e.оп.i}}{\tilde{t}_i}$	
<p style="text-align: center;"><b>Вихідні дані:</b></p> $N_{кл.i}$ - довжина ключа для $i$ -го алгоритму шифрування, який застосовується під час організації інформаційного обміну; $\tilde{N}_{e.оп.i}$ - нечітка величина кількості елементарних операцій, необхідних для компрометації ключового матеріалу; $\tilde{t}_i$ - нечітка величина часу для компрометації ключового матеріалу; $N_{a.ш}$ - загальна кількість алгоритмів шифрування.		
Витрати ресурсів для організації каналного з'єднання ТКС (S2.6)	$\tilde{E}^k(t) = P_{прд}^k(t) \tilde{t}_{a.з}^k$ $\Delta \tilde{f}^k(t) = (\tilde{t}, \tilde{t}_{a.з}^k) \Delta f(t)$	
<p style="text-align: center;"><b>Вихідні дані:</b></p> $P_{прд}^k(t)$ - потужність пристрою, який передає; $\tilde{t}_{a.з}^k$ - нечітка величина активності каналного з'єднання; $(\tilde{t}, \tilde{t}_{a.з}^k)$ - нечітка величина селектора часового інтервалу; $\Delta f(t)$ - кількість діапазонів частот, які використовуються для організації каналного з'єднання.		

Таблиця 3.6

Математичні вирази для розрахунку експертних показників якості функціонування ТКС на каналному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем в умовах невизначеності

Назва показника	Нижня оцінка	Верхня оцінка
Пропускна здатність (S2.1.1)	$\underline{C}_{\text{пр.зд}}^{\text{к}}(t) = \frac{V_{\text{прд}}^{\text{к}}(t)}{T_{\text{прд}}^{\text{к}}(t)}$	$\overline{C}_{\text{пр.зд}}^{\text{к}}(t) = \frac{\overline{V}_{\text{прд}}^{\text{к}}(t)}{\overline{T}_{\text{прд}}^{\text{к}}(t)}$
Час реакції каналного з'єднання (S2.1.2)	$\underline{T}_{\text{ч.реак}}^{\text{к}}(t) = \frac{1}{N_{\text{т.з}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{т.з}}} (\underline{t}_{\text{о.м.з.н}} + \underline{t}_{\text{прд.в.н}})$	$\overline{T}_{\text{ч.реак}}^{\text{к}}(t) = \frac{1}{N_{\text{т.з}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{т.з}}} (\overline{t}_{\text{о.м.з.н}} + \overline{t}_{\text{прд.в.н}})$
Об'єктова стійкість каналного з'єднання (S.2.2.1)	$\underline{P}_{\text{о.с}}^{\text{к}}(t) = 1 - \sum_{k=1}^{K_{\text{в.в}}} \overline{P}_{\text{в.в.к}}(t) (1 - \overline{P}_{\text{з.к}}^{\text{к}}(t))$	$\overline{P}_{\text{о.с}}^{\text{к}}(t) = 1 - \sum_{k=1}^{K_{\text{в.в}}} P_{\text{в.в.к}}(t) (1 - \underline{P}_{\text{з.к}}^{\text{к}}(t))$
Об'єктова технічна надійність каналного з'єднання (S2.2.2)	$\underline{P}_{\text{о.т.н}}^{\text{к}}(t) = 1 - \frac{(m+v)! l^l}{l! v!} \cdot \left(\frac{\lambda}{l\mu_{\text{в}}}\right)^{m+1}$	$\overline{P}_{\text{о.т.н}}^{\text{к}}(t) = 1 - \frac{(m+v)! l^l}{l! v!} \cdot \left(\frac{\overline{\lambda}_{\text{в}}}{l\overline{\mu}_{\text{в}}}\right)^{m+1}$
Функціональна стійкість каналного з'єднання (S2.2.3)	$\underline{P}_{\text{ф.ст}}^{\text{к}}(t) = \frac{1}{C_{\text{пр.з.зад}}^{\text{к}}(t)} \sum_{k=1}^{N_{\text{вв}}} (1 - \overline{P}_{\text{в.в.к}}(t)) \times \sum_{k'=1}^{N_{\text{вп}}} \underline{C}_{\text{т.кк}'}^{\text{к}}(t-1) \times F_{\text{кк}'}(t-1, t)$	$\overline{P}_{\text{ф.ст}}^{\text{к}}(t) = \frac{1}{C_{\text{пр.з.зад}}^{\text{к}}(t)} \sum_{k=1}^{N_{\text{вв}}} (1 - P_{\text{в.в.к}}(t)) \times \sum_{k'=1}^{N_{\text{вп}}} \overline{C}_{\text{т.кк}'}^{\text{к}}(t-1) \times F_{\text{кк}'}(t-1, t)$
Достовірність інформаційного обміну по каналному з'єднанню (S2.3)	$\underline{K}_{\text{п}}^{\text{к}}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \underline{N}_{\text{п.ij}}(t)$	$\overline{K}_{\text{п}}^{\text{к}}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \overline{N}_{\text{п.ij}}(t)$
Спостерігаємість стану інформаційного обміну на	$\underline{P}_{\text{сп}}^{\text{к}}(t) = 1 - (1 - \overline{P}_{\text{сп.вс}}(t))^*$	$\overline{P}_{\text{сп}}^{\text{к}}(t) = 1 - (1 - \underline{P}_{\text{сп.вс}}(t))^*$

Назва показника	Нижня оцінка	Верхня оцінка
канальному рівні ТКС(S2.4.1)	$* (1 - \bar{P}_{\text{сп.сп}}(t))(1 - \bar{P}_{\text{сп.зв}}(t))$	$* (1 - \underline{P}_{\text{сп.сп}}(t))(1 - \underline{P}_{\text{сп.зв}}(t))$
Керованість каналним з'єднанням на каналному рівні ТКС(S2.4.2)	$\Delta F_{\text{неуз.у}}^{\text{к}}(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{у.в.к}}^{\text{к}}} \underline{P}_{\text{з.п}}(t) \sum_{i=1}^{N_{\text{п.я}}^{\text{к}}} \alpha_{k_i}(t) \times$ $\times \prod_{j=1}^{N_{\text{ел.п.я}}^{\text{к}}} \beta_{k_{ij}} \Delta y_j(t)$	$\Delta \bar{F}_{\text{неуз.у}}^{\text{к}}(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{у.в.к}}^{\text{к}}} \bar{P}_{\text{з.п}}(t) \sum_{i=1}^{N_{\text{п.я}}^{\text{к}}} \alpha_{k_i}(t) \times \times \prod_{j=1}^{N_{\text{ел.п.я}}^{\text{к}}} \beta_{k_{ij}} \Delta \bar{y}_j(t)$
Безпека передачі інформації на каналному рівні ТКС(S2.5)	$\underline{K}_{\text{б.п}}^{\text{к}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{а.ш}}} N_{\text{кл.і}} + \frac{N_{\text{е.оп.і}}}{\underline{t}_i}$	$\bar{K}_{\text{б.п}}^{\text{к}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{а.ш}}} N_{\text{кл.і}} + \frac{\bar{N}_{\text{е.оп.і}}}{\bar{t}_i}$
Витрати ресурсів для орга- нізації каналного з'єднання ТКС (S2.6)	$\underline{E}^{\text{к}}(t) = P_{\text{прд}}^{\text{к}}(t) \underline{t}_{\text{а.з}}^{\text{к}}$ $\Delta f^{\Phi}(t) = (\underline{t}, \underline{t}_{\text{а.з}}^{\text{к}}) \Delta f(t)$	$\bar{E}^{\text{к}}(t) = P_{\text{прд}}^{\text{к}}(t) \bar{t}_{\text{а.з}}^{\text{к}}$ $\Delta \bar{f}^{\text{к}}(t) = (\bar{t}, \bar{t}_{\text{а.з}}^{\text{к}}) \Delta f(t)$

Використання математичних виразів, наведених у табл. 3.6 дають можливість знайти значення показників якості функціонування ТКС для каналного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем у вигляді максимально можливого та найбільш імовірного інтервалів цих величин та у подальшому використовувати ці оцінки під час проведення експертизи.

**3.2.3. Удосконалення математичних залежностей показників якості функціонування телекомунікаційної системи для мережевого рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем.** До експертних показників якості функціонування ТКС на мережевому рівні у параграфі 2.3. були віднесені наступні показники:

- продуктивність;
- стійкість;
- достовірність передачі,
- керованість/спостерігаємість,
- здатність мережі до масштабування;
- сумісність мережі;
- мультисервісність;
- безпечність передачі інформації;
- витрати ресурсів на реалізацію процесу функціонування ТКС СП.

Показники якості функціонування ТКС на каналному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем представляють множину:

$$S3 = \langle S3.1, S3.2, S3.3, S3.4, S3.5, S3.6, S3.7, S3.8, S3.9 \rangle. \quad (3.10)$$

Система показників якості каналного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем представлена на рисунку 3.5.

Пояснення щодо характеру показників, математичних виразів для їх розрахунку та перелік вихідних даних наведений у табл. 3.7.

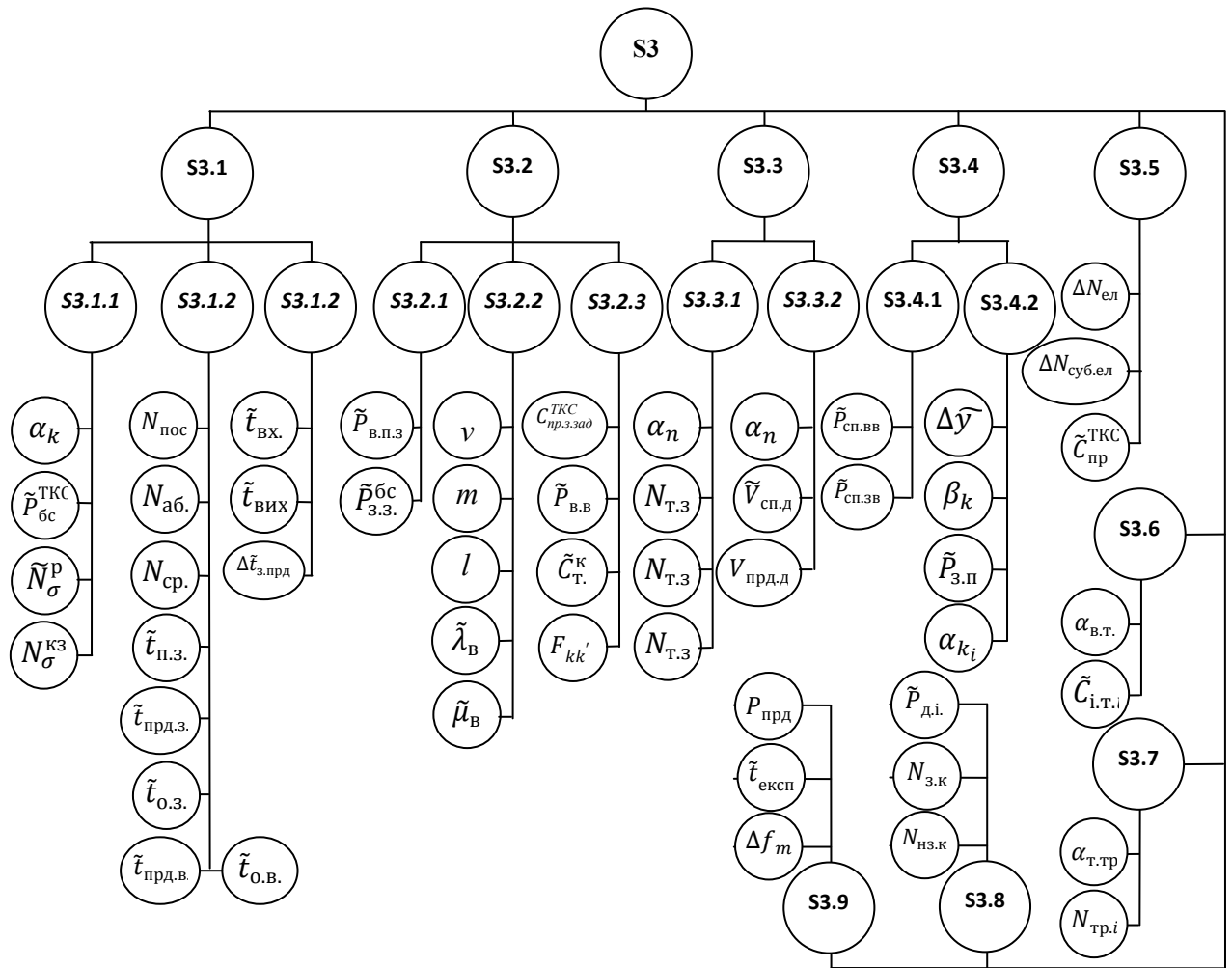


Рис.3.5. Система показників якості функціонування ТКС для мережевого рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем

Аналіз характеру вихідних даних, на основі яких необхідно визначати показники якості функціонування ТКС на мережевому рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем свідчить, що відсоток даних, які носять нечіткий характер дорівнює 62,5%.

Таблиця 3.7

## Показники якості функціонування ТКС на мережевому рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем

Показник якості	Часткові показники якості	Математичний вираз
Продуктивність мережевого рівня ТКС (S3.1)	Пропускна здатність (S3.1.1)	$\tilde{N}_p^{\text{TKC}}(t) = \sum_{k=1}^{K_{e.f}} \tilde{\alpha}_k \tilde{P}_{\text{бс}}^{\text{TKC}}(t) \cdot \sum_{\sigma=1}^{\Omega_{\tau}} \tilde{N}_{\sigma}^p(t) \tilde{N}_{\sigma}^{\text{кс}}(t)$
	Час реакції ТКС (S3.1.2)	$\tilde{T}_{\text{ч.реак}}^{\text{TKC}}(t) = \frac{1}{N_{\text{ср.}} N_{\text{аб.}} N_{\text{пос.}}} \sum_{n_{\text{ср.}}=1}^{N_{\text{ср.}}} \sum_{n_{\text{аб.}}=1}^{N_{\text{аб.}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{пос.}}} (\tilde{t}_{\text{п.з.н}} + \tilde{t}_{\text{прд.з.н}} + \tilde{t}_{\text{о.з.н}} + \tilde{t}_{\text{прд.в.н}} + \tilde{t}_{\text{о.в.н}})$
	Час затримки передачі (S3.1.3)	$\tilde{T}_{\text{з.прд}}^{\text{TKC}} = (\tilde{t}_{\text{вих.}} - \tilde{t}_{\text{вх.}}) + \Delta \tilde{t}_{\text{з.прд}}$
<p><b>Вихідні дані:</b>  <math>\tilde{\alpha}_k</math> – нечітка величина відносної важливості <math>k</math>-го етапу;  <math>\tilde{P}_{\text{бс}}^{\text{TKC}}(t)</math> – нечітка величина імовірності функціонування ТКС в умовах радіоелектронної протидії;  <math>\tilde{N}_{\sigma}^p(t)</math> – кількість робочих терміналів <math>\sigma</math> – го типу;  <math>N_{\text{пос.}}</math> – кількість послуг, які надаються ТКС;  <math>N_{\text{аб.}}</math> – кількість абонентів, які обслуговуються ТКС;  <math>N_{\text{ср.}}</math> – кількість серверів послуг, до яких звертаються абоненти;  <math>\tilde{t}_{\text{п.з.н}}</math> – нечітка величина часу, який витрачається на підготовку користувачем запиту на мобільному терміналі <math>n</math>-го типу;  <math>\tilde{t}_{\text{прд.з.н}}</math> – нечітка величина часу передачі запиту між терміналом і сервером послуг через сегмент мережі;  <math>\tilde{t}_{\text{о.з.н}}</math> – нечітка величина часу обробки запиту на сервері;  <math>\tilde{t}_{\text{прд.в.н}}</math> – нечітка величина часу передачі відповіді від сервера до терміналу;  <math>\tilde{t}_{\text{о.в.н}}</math> – нечітка величина часу обробки отриманих відповідей на терміналі;  <math>\tilde{t}_{\text{вх.}}, \tilde{t}_{\text{вих.}}</math> – нечітка величина часу появи пакету (повідомлення) на вході та на виході системи відповідно;  <math>\Delta \tilde{t}_{\text{з.прд}}</math> – нечітка величина варіації затримки передачі.</p>		
Стійкість ТКС на каналному рівні (S2.2)	Об'єктова стійкість каналного з'єднання (S2.2.1)	$\tilde{P}_{\text{о.с}}^{\text{к}}(t) = 1 - \sum_{k=1}^{K_{\text{в.в}}} \tilde{P}_{\text{в.в.к}}(t) (1 - \tilde{P}_{\text{з.к}}^{\text{к}}(t))$
	Об'єктова технічна надійність каналного з'єднання (S2.2.2)	$\tilde{P}_{\text{о.т.н}}^{\text{к}}(t) = 1 - \frac{(m+v)! l^l}{l! v!} \cdot \left( \frac{\tilde{\lambda}_{\text{в}}}{l \tilde{\mu}_{\text{в}}} \right)^{m+1}$

Показник якості	Часткові показники якості	Математичний вираз
	Функціональна стійкість каналного з'єднання (S2.2.3)	$\tilde{P}_{\text{ф.ст}}^k(t) = \frac{1}{C_{\text{пр.з.зад}}^k(t)} \sum_{k=1}^{N_{\text{ВВ}}} (1 - \tilde{P}_{\text{в.в.к}}(t)) \times \sum_{k'=1}^{N_{\text{ВП}}} \tilde{C}_{\text{т.кк}'}^k(t-1) \times F_{\text{кк}'}(t-1, t)$
<p><b>Вихідні дані:</b>  <math>\nu</math> – кількість робочих елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;  <math>m</math> – кількість резервних елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;  <math>\tilde{P}_{\text{в.в.к}}(t)</math> – нечітка величина імовірності застосування зловмисником <math>k</math>-го варіанту протидії;  <math>\tilde{P}_{\text{з.к}}^k(t)</math> – нечітка величина імовірності захищеності каналу інформаційного обміну при <math>k</math>-го варіанту протидії;  <math>N_{\text{ВВ}}</math> – кількість можливих варіантів впливу з боку зловмисника;  <math>N_{\text{ВП}}</math> – кількість можливих варіантів протидії, які реалізовані на каналному рівні;  <math>l</math> – кількість елементів, що безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних і одночасно відновлюють свою працездатність;  <math>\tilde{\lambda}_{\text{в}}</math> – нечітка величина інтенсивності відмов елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;  <math>\tilde{\mu}_{\text{в}}</math> – нечітка величина інтенсивності відновлення елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних;  <math>C_{\text{пр.з.зад}}^k(t)</math> – задана пропускна здатність на каналному рівні;  <math>\tilde{C}_{\text{т.кк}'}^k(t-1)</math> – нечітка величина технічної пропускну здатності при <math>k'</math> способі протидії застосуванню зловмисником <math>k</math>-го варіанта впливу на <math>(t-1)</math>-му етапі функціонування;  <math>F_{\text{кк}'}(t-1, t)</math> – функція корисності для оцінки варіантів відновлення каналного з'єднання.</p>		
	Достовірність інформаційного обміну по каналному з'єднанню (S2.3)	$\tilde{K}_{\text{п}}^k(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \tilde{N}_{\text{п.іj}}(t)$
<p><b>Вихідні дані:</b>  <math>\tilde{N}_{\text{п.іj}}(t)</math> – нечітка величина кількості помилок в повідомленнях з <math>i</math>-м пріоритетом трафіку і <math>j</math>-м пріоритетом користувача;  <math>i=1, \dots, n</math> – номер пріоритету, який визначається видом трафіку;  <math>j=1, \dots, q</math> – номер користувацького пріоритету.</p>		
Спостерігаємість-керіваність каналного рівня ТКС (S2.4)	Спостерігаємість стану інформаційного обміну на каналному рівні ТКС(S2.4.1)	$\tilde{P}_{\text{сн}}^k(t) = 1 - (1 - \tilde{P}_{\text{сн.вс}}(t))(1 - \tilde{P}_{\text{сн.ср}}(t))(1 - \tilde{P}_{\text{сн.зв}}(t))$
	Керіваність каналним з'єднанням на каналному рівні ТКС(S2.4.2)	$\Delta \tilde{F}_{\text{неуз.у}}^k(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{у.в.к}}} \tilde{P}_{\text{з.п}}(t) \sum_{i=1}^{N_{\text{іjа}}} \alpha_{\text{кi}}(t) \times \times \prod_{j=1}^{N_{\text{ел.пjа}}} \beta_{\text{кij}} \Delta \tilde{y}_j(t)$
<p><b>Вихідні дані:</b>  <math>\tilde{P}_{\text{сн.вс}}(t)</math> – імовірність спостерігаємості значень внутрішнього стану каналного і фізичного з'єднань (продуктивності, стійкості, безпеки і т.д.);  <math>\tilde{P}_{\text{сн.ср}}(t)</math> – імовірність спостерігаємості параметрів середовища розповсюдження (коефіцієнт передачі середовища розповсюдження);</p>		

Показник якості	Часткові показники якості	Математичний вираз
<p><math>\tilde{P}_{сп.зб}(t)</math> – імовірність спостережності параметрів зовнішніх впливів (зовнішнє інформаційне навантаження);  <math>\tilde{P}_{в.в.к}(t)</math> - нечітка величина імовірності застосування зловмисником <math>k</math>-го варіанту протидії;  <math>N_{у.в.к}^k</math> - кількість варіантів управляючих впливів на підсистеми управління каналного рівня;  <math>\tilde{P}_{з.п}(t)</math>- нечітка величина імовірності застосування зловмисником <math>v</math>-го варіанту протидії;  <math>N_{ПЯ}^k, N_{ел.ПЯ}^k</math> - кількість векторів показників якості інформаційного обміну каналного рівня і елементів цих векторів відповідно;  <math>\Delta\tilde{y}_j(t)</math> - нечітка величина відхилення оцінки <math>j</math>-го елементу <math>i</math>-го вектора показника якості інформаційного обміну через каналне з'єднання;  <math>\alpha_i</math> - степінь важливості <math>i</math>-го вектора показника якості;  <math>\beta_{ij}</math>- степінь важливості <math>j</math>-го елементу <math>i</math>-го вектора показника якості.</p>		
<p>Безпека передачі інформації на каналному рівні ТКС (S2.5)</p>		$\tilde{K}_{6.п}^k = \sum_{i=1}^{N_{а.ш}} N_{кл.і} + \frac{\tilde{N}_{е.оп.і}}{\tilde{t}_i}$
<p><b>Вихідні дані:</b>  <math>N_{кл.і}</math> - довжина ключа для <math>i</math>-го алгоритму шифрування, який застосовується під час організації інформаційного обміну;  <math>\tilde{N}_{е.оп.і}</math> - нечітка величина кількості елементарних операцій, необхідних для компрометації ключового матеріалу;  <math>\tilde{t}_i</math> - нечітка величина часу для компрометації ключового матеріалу;  <math>N_{а.ш}</math> - загальна кількість алгоритмів шифрування.</p>		
<p>Витрати ресурсів для організації каналного з'єднання ТКС (S2.6)</p>		$\tilde{E}^k(t) = P_{прд}^k(t)\tilde{t}_{а.з}^k$ $\Delta\tilde{f}^k(t) = (\tilde{t}, \tilde{t}_{а.з}^k)\Delta f(t)$
<p><b>Вихідні дані:</b>  <math>P_{прд}^k(t)</math>–потужність пристрою, який передає;  <math>\tilde{t}_{а.з}^k</math> – нечітка величина активності каналного з'єднання;  <math>(\tilde{t}, \tilde{t}_{а.з}^k)</math> – нечітка величина селектора часового інтервалу;  <math>\Delta f(t)</math> – кількість діапазонів частот, які використовуються для організації каналного з'єднання.</p>		



Користуючись методикою, яка розглядалась вище, вдосконалимо математичні вирази для розрахунку показників якості функціонування ТКС на фізичному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем з врахуванням нечіткого характеру вихідних даних.

Враховуючи, що при визначенні вихідних даних експерту (особі, яка приймає рішення) найпростіше визначити максимально можливий і найбільш імовірний інтервал їх знаходження, в якості інструменту для роботи з нечіткими величинами використаємо  $\alpha$ -рівневий принцип узагальнення.

Співставивши результати досліджень, які наведені вище математичним виразам розрахунку показників оцінки ефективності, запишемо математичні вирази для знаходження верхньої та нижньої оцінки наведених вище показників. Результати цього опрацювання наведені у табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Математичні вирази для розрахунку експертних показників якості функціонування ТКС на каналному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем в умовах невизначеності

Назва показника	Нижня оцінка	Верхня оцінка
Пропускна здатність (S2.1.1)	$\underline{C}_{\text{пр.зд}}^{\text{K}}(t) = \frac{V_{\text{прд}}^{\text{K}}(t)}{T_{\text{прд}}^{\text{K}}(t)}$	$\overline{C}_{\text{пр.зд}}^{\text{K}}(t) = \frac{\overline{V}_{\text{прд}}^{\text{K}}(t)}{\overline{T}_{\text{прд}}^{\text{K}}(t)}$
Час реакції каналного з'єднання (S2.1.2)	$\underline{T}_{\text{ч.реак}}^{\text{K}}(t) = \frac{1}{N_{\text{т.з}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{т.з}}} (t_{\text{о.м.з.н}} + t_{\text{прд.в.н}})$	$\overline{T}_{\text{ч.реак}}^{\text{K}}(t) = \frac{1}{N_{\text{т.з}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{т.з}}} (\overline{t}_{\text{о.м.з.н}} + \overline{t}_{\text{прд.в.н}})$
Об'єктова стійкість каналного з'єднання (S2.2.1)	$\underline{P}_{\text{о.с}}^{\text{K}}(t) = 1 - \sum_{k=1}^{K_{\text{в.в}}} \overline{P}_{\text{в.в.к}}(t)(1 - \overline{P}_{\text{з.к}}^{\text{K}}(t))$	$\overline{P}_{\text{о.с}}^{\text{K}}(t) = 1 - \sum_{k=1}^{K_{\text{в.в}}} P_{\text{в.в.к}}(t)(1 - P_{\text{з.к}}^{\text{K}}(t))$
Об'єктова технічна надійність каналного з'єднання (S2.2.2)	$\underline{P}_{\text{о.т.н}}^{\text{K}}(t) = 1 - \frac{(m+v)! l^l}{l! v!} \cdot \left(\frac{\lambda}{l\mu_{\text{в}}}\right)^{m+1}$	$\overline{P}_{\text{о.т.н}}^{\text{K}}(t) = 1 - \frac{(m+v)! l^l}{l! v!} \cdot \left(\frac{\overline{\lambda}_{\text{в}}}{l\overline{\mu}_{\text{в}}}\right)^{m+1}$
Функціональна стійкість каналного з'єднання (S2.2.3)	$\underline{P}_{\text{ф.ст}}^{\text{K}}(t) = \frac{1}{C_{\text{пр.з.зад}}^{\text{K}}(t)} \sum_{k=1}^{N_{\text{вв}}} (1 - \overline{P}_{\text{в.в.к}}(t)) \times \sum_{k'=1}^{N_{\text{вп}}} \underline{C}_{\text{т.кк}'}^{\text{K}}(t-1) \times F_{\text{кк}'}(t-1, t)$	$\overline{P}_{\text{ф.ст}}^{\text{K}}(t) = \frac{1}{C_{\text{пр.з.зад}}^{\text{K}}(t)} \sum_{k=1}^{N_{\text{вв}}} (1 - P_{\text{в.в.к}}(t)) \times \sum_{k'=1}^{N_{\text{вп}}} \overline{C}_{\text{т.кк}'}^{\text{K}}(t-1) \times F_{\text{кк}'}(t-1, t)$
Достовірність інформаційного обміну по каналному з'єднанню (S2.3)	$\underline{K}_{\text{п}}^{\text{K}}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m N_{\text{п.ij}}(t)$	$\overline{K}_{\text{п}}^{\text{K}}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \overline{N}_{\text{п.ij}}(t)$
Спостерегаємість стану інформаційного обміну на каналному рівні ТКС(S2.4.1)	$\underline{P}_{\text{сп}}^{\text{K}}(t) = 1 - (1 - \overline{P}_{\text{сп.вс}}(t)) * (1 - \overline{P}_{\text{сп.сп}}(t))(1 - \overline{P}_{\text{сп.зв}}(t))$	$\overline{P}_{\text{сп}}^{\text{K}}(t) = 1 - (1 - P_{\text{сп.вс}}(t)) * (1 - P_{\text{сп.сп}}(t))(1 - P_{\text{сп.зв}}(t))$

Назва показника	Нижня оцінка	Верхня оцінка
Керованість каналним з'єднанням на каналному рівні ТКС(S2.4.2)	$\Delta F_{\text{неуз.у}}^{\text{к}}(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{у.в.к}}^{\text{к}}} P_{\text{з.п}}(t) \sum_{i=1}^{N_{\text{п.я}}^{\text{к}}} \alpha_{k_i}(t) \times$ $\times \prod_{j=1}^{N_{\text{ел.п.я}}^{\text{к}}} \beta_{k_{ij}} \Delta y_j(t)$	$\Delta \bar{F}_{\text{неуз.у}}^{\text{к}}(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{у.в.к}}^{\text{к}}} \bar{P}_{\text{з.п}}(t) \sum_{i=1}^{N_{\text{п.я}}^{\text{к}}} \alpha_{k_i}(t) \times \times$ $\prod_{j=1}^{N_{\text{ел.п.я}}^{\text{к}}} \beta_{k_{ij}} \Delta \bar{y}_j(t)$
Безпека передачі інформації на каналному рівні ТКС(S2.5)	$\underline{K}_{\text{б.п}}^{\text{к}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{а.ш}}} N_{\text{кл.і}} + \frac{N_{\text{е.оп.і}}}{\underline{t}_i}$	$\bar{K}_{\text{б.п}}^{\text{к}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{а.ш}}} N_{\text{кл.і}} + \frac{\bar{N}_{\text{е.оп.і}}}{\underline{t}_i}$
Витрати ресурсів для організації каналного з'єднання ТКС (S2.6)	$\underline{E}^{\text{к}}(t) = P_{\text{прд}}^{\text{к}}(t) \underline{t}_{\text{а.з}}^{\text{к}}$ $\Delta f^{\phi}(t) = (\underline{t}, \underline{t}_{\text{а.з}}^{\text{к}}) \Delta f(t)$	$\bar{E}^{\text{к}}(t) = P_{\text{прд}}^{\text{к}}(t) \bar{t}_{\text{а.з}}^{\text{к}}$ $\Delta \bar{f}^{\text{к}}(t) = (\bar{t}, \bar{t}_{\text{а.з}}^{\text{к}}) \Delta f(t)$

Використання математичних виразів, наведених у таблиці 3.6 дають можливість знайти значення показників якості функціонування ТКС для канального рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем у вигляді максимально можливого та найбільш імовірного інтервалів цих величин та у подальшому використовувати ці оцінки під час проведення експертизи.

### **3.3. Концепція експертизи ТКС**

Основною метою проведення експертизи ТКС СП є обґрунтування висновку щодо якості технічних рішень в ході проектування і розробки телекомунікаційної системи. Однією з головних задач, яка вирішується в ході проведення експертизи ТКС є формування оптимальної системи показників якості, які підлягають експертному оцінюванню в ході проектування ТКС СП і, разом з тим, дозволяють охопити всі найбільш суттєві властивості системи.

Як свідчить аналіз робіт [6, 14, 44], під ефективністю функціонування системи розуміється комплексна властивість процесу функціонування, яка характеризується оціночним твердженням відносно придатності або пристосованості технічних засобів передачі інформації і управління до вирішення поставлених задач на основі визначення показників якості системи або показників ефективності процесу функціонування системи.

Під показником ефективності функціонування складної системи розуміється міра відповідності реального результату процесу функціонування системи необхідному.

Враховуючи вимоги до показників ефективності функціонування системи та особливості процесу функціонування ТКС СП в якості показників ефективності може бути використана імовірність відповідності системи своєму функціональному призначенню (імовірність досягнення цілі).

Багатокритеріальний характер вимог до якості інформаційного обміну і управління, врахування процесів, які протікають в системі, приводить до постановки векторної задачі аналізу ефективності функціонування ТКС.

Одним з основних етапів оцінювання ефективності функціонування складної інформаційної системи є етап розробки ієрархічно зв'язаною системи показників якості функціонування цієї системи. Загальноприйнятим підходом до розробки системи показників якості (СПЯ) таких систем є формування такої множини локальних СПЯ, яка відповідає сукупності властивостей ТКС СП, що впливають на виконання поставлених перед нею завдань. Глобальна СПЯ, що характеризує загальне, єдине завдання, що стоїть перед ТКС СП, виходить шляхом з'єднання вихідних СПЯ.

Аналіз роботи [14], в якій запропонований метод формування системи показників якості, свідчить, що даний метод не дозволяє врахувати особливості фізичного, каналного та мережевого рівнів, які відповідають еталонній моделі взаємодії відкритих систем.

Основним користувацькими властивостями телекомунікаційної системи спеціального призначення є види і рівень інформаційних послуг, які забезпечуються користувачеві. Як було зазначено вище, разом з процесом інформаційного обміну в ТКС СП має місце процес управління якістю обміну інформацією, а також структурою алгоритмами і параметрами роботи ТКС.

З метою проведення якісної експертизи ТКС СП слід сформувати структурну схему експертної системи для оцінки показників якості функціонування системи. Структурна схема експертної системи представлена рис. 3.6.

Як видно з рис.3.6, експертна система представляє собою глобальну систему показників якості функціонування ТКС СП, яка формується експертною системою часткових процесів функціонування ТКС і експертною системою показників якості елементів ТКС.

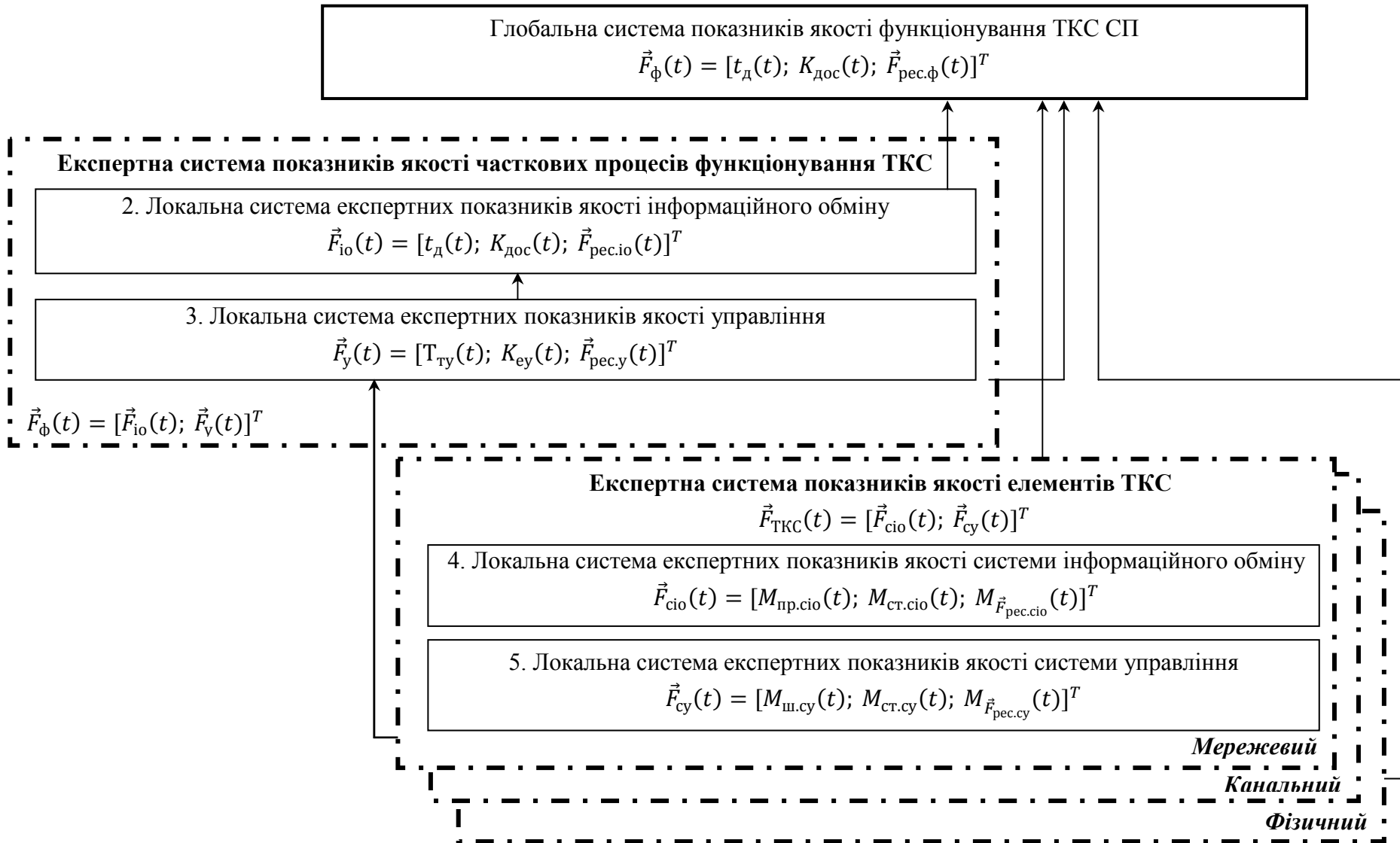


Рис. 3.6. Структура експертної системи показників якості ТКС СП

### 3.4. Розробка пристрою для розрахунку експертних показників якості функціонування ТКС в умовах невизначеності

Вище було показано, як можливо в умовах невизначеності знайти показники для проведення експертизи ТКС. Їх пошук в окремих випадках потребує проведення складних обчислень. При наявності ПЕОМ ці обчислення можливо реалізувати програмно. Альтернативою є створення спеціалізованого пристрою на основі використання мікроконтролера. Перевагами цього підходу є: значно нижча вартість, компактність пристрою, суттєво менше енергоспоживання і як наслідок значний час автономної роботи.

Для розробки пристрою за основу було взято мікроконтролер з сімейства AVR компанії ATMEL. Такий вибір обґрунтований тим, що дані мікроконтролери мають низьку вартість, є загальнодоступними, надійними, простими. Вони мають достатньо високу швидкодію (більшість інструкцій виконуються за 1 такт). При тактових частотах до 20 МГц це дає можливість виконувати до 20 мільйонів інструкцій за секунду. В даних мікроконтролерах розвинена система адресації яка оптимізована для роботи програмного коду отриманого з використанням С-компіляторів (високорівневу мову програмування С зручно використовувати для реалізації обчислень експертних показників якості функціонування ТКС в умовах невизначеності). В мікроконтролерах сімейства AVR реалізовано 6 апаратних команд множення, що дозволяє швидше виконувати програмний код який передбачає проведення складних обчислень. Окрім цього в них інтегровано достатній набір додаткових елементів, які спрощують конструкцію виробу:

FLASH ПЗП для програм (10000 циклів перезапису що дає можливість при необхідності оновлювати програмне забезпечення розрахунку експертних показників якості функціонування ТКС в умовах невизначеності);

синхронний послідовний порт;

двох провідний інтерфейс TWI, який сумісний з інтерфейсом I2C

багатоканальний PWM;

10 бітний АЦП з програмованим коефіцієнтом підсилення;  
 вбудоване джерело опорної напруги;  
 аналоговий компаратор;  
 сторожовий таймер (для боротьби з можливими «зависаннями»);  
 схема стеження за рівнем напруги;

Мікроконтролери AVR характеризуються невисоким енергоспоживанням (менше 100 мкА в активному режимі на частоті 32 КГц) що дає можливість створити пристрій з незначним енергоспоживанням і відповідно значним часом автономної роботи.

Для розробки пристрою було обрано мікроконтролер ATmega16 який належить до сімейства AVR. Він має всі необхідні компоненти для зручної побудови пристрою розрахунку експертних показників і в той же час в його складі відсутні «зайві» елементи (наприклад датчик температури) які збільшують вартість виробу. Перевагою цього мікроконтролера (в порівнянні навіть з деякими більш новими моделями) є наявність 4-х восьмибітних портів. Ці порти є програмуємі. Можливо побітно змінювати їх ролі (використання в якості входів або виходів). Це дає можливість організувати ввід-вивід. Схема пристрою наведена на рис. 3.7.

Основною складовою є мікроконтролер AMTELAТmega16 який для спрощення будови пристрою сконфігурований на використання вбудованого тактового генератора. Оскільки при обчисленні нечітких оцінок більшості показників використовуються 2-4 аргументи і, окрім цього є необхідність для кожної нечіткої оцінки виводити по два числа – верхню і нижню оцінку чотирьох навіть чотирьох наявних портів цього мікроконтролера недостатньо. Тому для вводу інформації використане мультиплексування. Чотири восьмибітних входи (при необхідності можливо наростити кількість входів до 16-ти) з допомогою мультиплексора програмно комутуються з першим портом мікроконтролера (PORTA). Для управління мультиплексорами зарезервовано чотири біти (половина розрядів) другого порта PORTB. В поточній версії пристрою з 4-ма входами (що дозволяє реалізувати обчислення більшості показників) в



програмі використовується лише два розряди для адресації мультиплексорів. Інша половина розрядів другого порта програмно (додаток В) конфігурується і використовується в режимі входів. Ці чотири розряди дозволяють обирати до 16-ти показників які по черзі можливо обчислити з допомогою пристрою. В поточній версії програми реалізоване обчислення трьох основних експертних показників в умовах невизначеності.

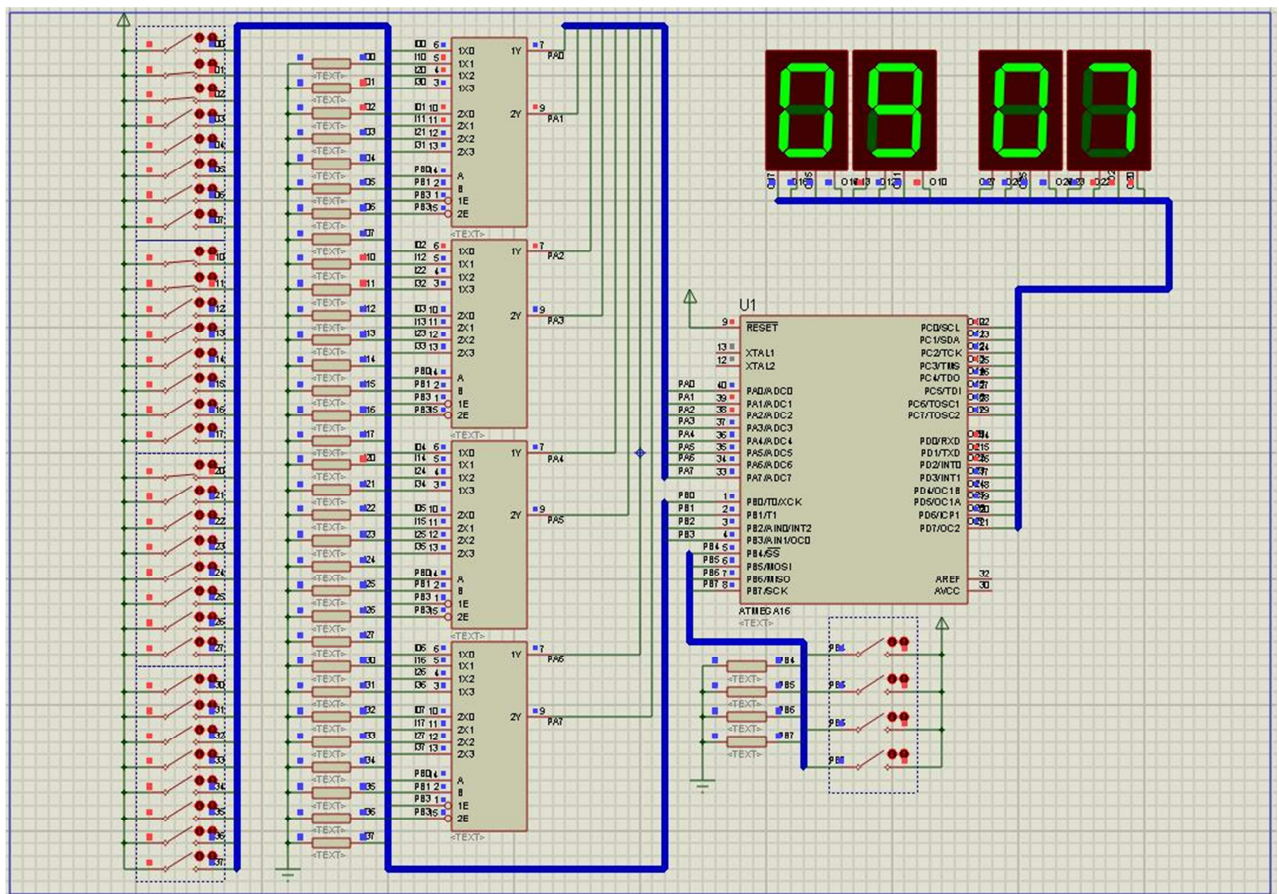


Рис. 3.7. Принципова електрична схема пристрою для розрахунку експертних показників якості функціонування ТКС в умовах невизначеності

У зв'язку з тим, що для вводу-виводу використовуються восьмибітні порти з метою підвищення точності обчислень значення аргументів нормуються. При обчисленнях в програмі використовуються 32-х бітні регістри, що зменшує похибки в ході обчислень.

Отримана нижня і верхня оцінки в програмі нормуються з приведенням до однобайтного формату і виводяться з використанням третього (PORTC – нижня оцінка) і четвертого портів (PORTD – верхня оцінка).

Для введення і виведення чисел можливо використовувати будь яке периферійне цифрове обладнання, розраховане на однобайтне кодування числа у двійковій формі.

Для відлагодження програмного забезпечення мікроконтролеру і перевірки працездатності пристрою було використане моделювання з використанням програмного симулятора Proteus VSM.

Для введення чисел в симуляторі використано 32 перемикачі (4 групи по 8 перемикачів) які формують сигнали на вході чотирьох мультиплексорів. Кожна з 4-х мікросхем містить по 2 чотирьохрозрядних мультиплексора. Оскільки входи мультиплексорів характеризуються Z-станом для формування логічного нуля вони з'єднані з «землею» через резистори. Для формування логічної одиниці через увімкнений перемикач на вхід подається напруга живлення.

Для виводу результатів обчислень в симуляторі до виходів пристрою під'єднані чотири семи сегментні індикатори з вбудованими дешифраторами (по два індикатори до кожного порта). Індикатори забезпечують зчитування результатів обчислень нижньої і верхньої оцінки в шістнадцятковій формі. З метою спрощення аналізу роботи пристрою в симуляторі в програмний код внесені затримки, які відсутні в остаточній «прошивці» пристрою.

Таким чином, з метою реалізації оперативної експертної оцінки телекомунікаційних систем було розроблено пристрій на основі мікроконтролера, який автоматизує проведення обчислень за отриманими вище в результаті проведених досліджень виразами.

## **Висновки з розділу**

Аналіз процедури експертизи телекомунікаційних проектів засвідчив про наявність умов невизначеності при визначення показників якості функціо-

нування ТКС. Неврахування даних особливостей функціонування ТКС може призвести до спрощення (ідеалізації) отриманих результатів, які, в свою чергу, не повною мірою відповідають вимогам до ефективності проведеної експертизи ТКС, що проектується. Враховуючи сказане вище, важливою задачею є формулювання підходів до врахування в об'єктивно існуючій невизначеності на етапі розрахунку експертних показників якості функціонування ТКС СП та відпрацювання методики такого врахування.

В розділі проаналізовані математичні методи для врахування умов невизначеності. В якості основного інструменту для врахування невизначеності доцільно вибрати методи теорії нечітких множин, зокрема апарат нечітких чисел для формалізації вихідних даних для експертизи. Для ведення операцій над нечіткими числами використаний  $\alpha$  - рівневий принцип узагальнення.

Для системи експертних показників якості фізичного, каналного та мережевого рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем визначені вихідні дані та степінь їх нечіткості.

З використанням запропонованої методики врахування нечіткого характеру вихідних даних вдосконалені математичні моделі для показників якості функціонування ТКС на фізичному, каналному та мережевому рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем, знайдені математичні вирази для знаходження максимально можливого та найбільш імовірного інтервалів цих величин.

В розділі сформована структурна схема експертної системи для оцінки показників якості функціонування ТКС. Експертна система представляє собою глобальну систему показників якості функціонування ТКС СП, яка формується експертною системою часткових показників функціонування ТКС і експертною системою показників якості елементів ТКС.

З метою апаратної реалізації процедури знаходження експертних показників якості функціонування ТКС з використанням нечітких вихідних даних розроблений пристрій на основі мікроконтролера AMTELATmega16. Отримана нижня і верхня оцінки в програмі нормуються з приведенням до однобайтного

формату і виводяться з використанням третього (PORTC – нижня оцінка) і четвертого портів (PORTD – верхня оцінка).

## РОЗДІЛ 4

### МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ

В попередньому розділі були визначені підходи до розрахунку експертних показників якості функціонування ТКС в умовах невизначеності. З метою врахування невизначеності для опису окремих показників було використано апарат нечітких величин. Їх сукупність достатньо повно характеризує ТКС і дозволяє провести її експертизу.

Однак для проведення експертизи телекомунікаційної системи необхідне її співставлення за сукупністю ознак з відповідним класом. Таке співставлення здійснюється за значеннями показників, що характеризують функціонування ТКС СП. У результаті такої класифікації визначається стан до якого слід віднести ТКС і, відповідно, реалізується її експертиза.

Одним з підходів до вирішення завдання класифікації об'єктів (в тому числі і ТКС) по сукупності ознак, які їх описують, є кластерний аналіз.

Кластерний аналіз представляє собою задачу розбиття певної вибірки об'єктів на підмножини. Ці підмножини в межах кластерного аналізу називаються кластерами. Кластери утворюються таким чином, щоб до складу кожного кластеру входили близькі за ознаками об'єкти. Об'єкти з різних кластерів, звичайно, мають суттєво відрізнитись.

Головною метою кластерного аналізу є визначення множин схожих об'єктів у вибірці. Відсутність жорсткого визначення вимог до об'єктів класифікації в кластерному аналізі робить його універсальним інструментом. Саме тому спектр його прикладних застосувань є надзвичайно широким. Однак універсальність застосування привела до появи несумісних методів і підходів, які в окремих випадках ускладнюють однозначне використання і коректну інтерпретацію результатів кластерного аналізу. Окрім цього, класичні методи клас-

терного аналізу не розраховані на використання нечітко визначених величину випадках нечіткого опису об'єктів кластеризації.

Все це робить актуальним аналіз можливості застосування і адаптацію методів кластерного аналізу до вирішення задачі класифікації і відповідно експертизи інформаційно-телекомунікаційних систем в умовах невизначеності.

#### **4.1. Методика застосування теорії штучних нейронних мереж в завданнях експертних оцінок якості ТКС в умовах неповноти вихідної інформації**

Формування експертних оцінок технічних рішень на ранніх стадіях проектування ТКС СП сильно ускладнене «розмитістю» зовнішності системи, що розробляється, і, як наслідок, неповнотою, а часто і суперечністю інформації про передбачувану архітектуру, топологію, алгоритми функціонування системи тощо. За таких умов завдання формування експертних оцінок якості технічних рішень, що приймаються розробником на різних етапах проектування ТКС СП може бути математично коректно вирішене на основі обчислювальних моделей нового класу, що дозволяють ухвалювати рішення в умовах невизначеності з урахуванням думок великої кількості експертів. До таких моделей відносяться штучні нейронні мережі, що знайшли застосування в різних областях ухвалення рішень в умовах невизначеності [69, 70, 75, 76].

Штучними нейронними мережами (ШНМ) є математичні моделі (обчислювальні моделі, обчислювальне середовище), в основі яких лежать сучасні уявлення про будову мозку людини і процеси обробки інформації, що відбуваються в ній.

Сучасний інтерес до ШНМ обумовлений тим, що процеси обробки інформації людиною і ЕОМ істотно відрізняються один від одного. Комп'ютер здатний виконати складні обчислення з колосальною швидкістю і в той же час виявляється безсилим перед вирішенням типових «людських» завдань. Людсь-

кий мозок не здатний обчислювати із швидкістю комп'ютера, але наділений здібністю до образного сприйняття зовнішнього світу і спілкування на природній мові. Час циклу обробки інформації в сучасному комп'ютері складає лише 1 нс, а середній час циклу для нейронів мозку приблизно рівного 1 мс. Тобто мозок поступається комп'ютеру по швидкодії в мільйон разів, проте здатний вирішувати завдання, перед якими комп'ютер безсилий. Причина криється в різних принципах обробки інформації. Відмінність в принципах обробки полягає в тому, що в комп'ютері обробка інформації відбувається послідовно під управлінням деякого алгоритму, тоді як у людини процес обробки інформації протікає паралельно. З технічної точки зору людський мозок можна представити як величезна кількість паралельно працюючих процесорів (нейронів), що мають розподілене управління і численні зв'язки між собою. На відміну від комп'ютера робота мозку не підпорядкована деякому центральному процесору. Кожен нейрон функціонує автономно і впливає лише на нейрони, безпосередньо з ним зв'язані.

Крім того, дані в комп'ютері зберігаються в спеціальному блоці пам'яті, а пам'ять людини носить розподілений і асоціативний характер. Це зумовлює миттєву відповідь мозку на запит і необхідний час на перегляд всього об'єму інформації, що зберігається, в пам'яті комп'ютера. Причому однією з головних особливостей мозку є здібність до узагальнення і накопичення нової інформації без руйнування старою, оскільки інформація в мозку людини зберігається у вигляді численних зв'язків між нейронами. Цим також досягається високий ступінь надійності, що забезпечує збереження функцій мозку навіть при руйнуванні деякій його частини.

Таким чином, дослідження в області ШНМ, використовуваних на користь синтезу оптимальних експертних систем показників якості (ЕСПЯ), що підлягають оцінці в ході проведення експертизи, повинні бути націлені на розробку таких алгоритмів синтезу, які суміщали б в собі як можливості обчислювальних засобів, так і здібності людського мозку в області ухвалення експе-

ртних рішень в нечітких ситуаціях (інтуїція), прогноз результатів по обмежених вибірках даних (передбачення) та інші.

Розглянемо особливості роботи нейрона. При активації нейрон посиляє вихідний сигнал по своєму аксону. Через синапси цей сигнал досягає інших нейронів, які можуть у свою чергу активуватися. Штучний нейрон (ШН) активується тоді, коли сумарний рівень сигналів, що прийшли в його ядро з дендритів, перевищить певний рівень (порог активації). Інтенсивність сигналу, що отримується нейроном (а отже, і можливість його активації), сильно залежить від активності синапсів.

Таким чином, основу базової моделі ШНМ складає ШН, в якому: вхідні сигнали (початкові дані або вихідні сигнали інших нейронів ШНМ) виходять через декілька вхідних каналів. Кожен вхідний сигнал проходить через з'єднання, що має певну інтенсивність (або вага); ваги з'єднань відповідають синаптичній активності нейрона. З кожним нейроном пов'язано певне порогове значення. Обчислюється зважена сума входів, з неї віднімається порогове значення, і в результаті виходить величина активації нейрона (вона також називається постсинаптичним потенціалом нейрона); сигнал активації перетвориться за допомогою функції активації (або передавальній функції), і в результаті виходить вихідний сигнал нейрона.

Штучний нейрон (базовий процесорний елемент), що є математичною моделлю біологічного нейрона, представлений на рис. 4.1.

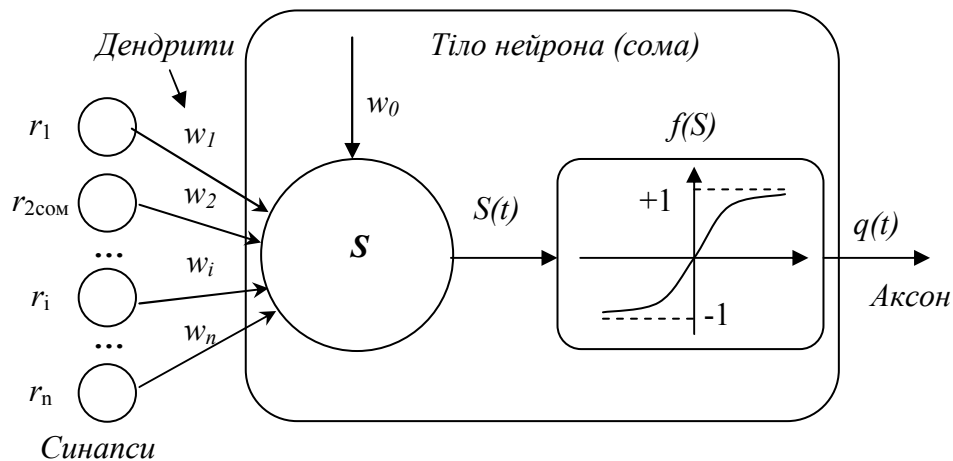


Рис. 4.1. Структура штучного нейрона (базового процесорного елемента)



На входи штучного нейрона (базового процесорного елемента) поступає множина сигналів  $r_i$ , з виходів інших нейронів, які утворюють вхідний вектор

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n]. \quad (4.1)$$

Всі сигнали, помножені на відповідні вагові коефіцієнти  $\omega_j$  підсумовуються в суматорі. Такі коефіцієнти утворюють ваговий вектор

$$\overline{\omega_j} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n], \quad (4.2)$$

що характеризує синаптичні зв'язки базового процесорного елемента. Результат підсумовування поступає на пороговий елемент  $S(t)$ , що характеризується величиною порогу і деякою функцією активації  $f()$ .

Вхід  $r_0$  і коефіцієнт зв'язку  $\omega_0$  вводять спеціально для ініціалізації мережі; зазвичай  $r_0 = +1$ ; коефіцієнти  $w_0$ , як і останні  $\omega_j$ ,  $j \in \overline{1, n}$ , настроюються в процесі навчання;  $f(.)$  – «функція активації» – монотонна, така, що безперервно диференціюється на інтервалі або  $(-1, +1)$ , або  $(0 + 1)$ .

Таким чином, сигнал  $q$  на виході нейрона (базового процесорного елемента) може бути представлений у вигляді

$$q = f\left(\sum_{j=1}^n \omega_j r_j + \omega_0 r_0\right) = f\left(\sum_{j=1}^n \omega_j r_j\right). \quad (4.3)$$

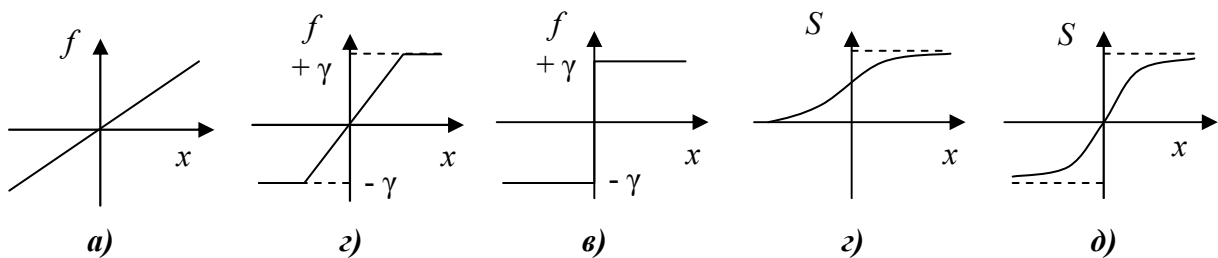


Рис. 4.2. Види функцій активації нейронів

У штучних нейронах найбільшого поширення набули функції активації, наведені на рис. 4.2. На цьому рисунку:

*a*– лінійна функція  $f(x) = x$ , еквівалентна відсутності порогового елемента взагалі;

$b$  – кусочно-лінійна функція, що отримується з лінійної шляхом обмеження діапазону її змін в межах  $[-\gamma, +\gamma]$ , тобто

$$f(x) = \begin{cases} \gamma, & x \geq \gamma; \\ x, & |x| < \lambda; \\ -\lambda, & x \leq -\gamma; \end{cases} \quad (4.4)$$

$$f(x) = \begin{cases} \gamma, & x > 0; \\ -\gamma, & x \leq 0; \end{cases} \quad (4.5)$$

$e$  – ступінчаста функція активації типу

$s$  – сигмоїдна функція активації  $S(x) = 1/(1 + e^{-x})$ ;

$d$  – функція активації типу гіперболічний тангенс  $S(x) = \tanh(x)$ .

Протягом останніх років увагу фахівців привертають можливості використання ШНМ на користь ухвалення рішень в умовах невизначеності. ШНМ досить широко використовуються при вирішенні теоретичних і практичних завдань передачі, зберігання і обробки інформації. На їх основі побудовані алгоритми стискування інформації, оптимізації маршрутів передачі потоків повідомлень, розпізнавання образів в радіолокації, обробки сигналів і зображень. Крім того, використовувані в ШНМ принципи обробки інформації дозволяють створювати унікальні експертні системи, здатну виступати як системи підтримки прийняття рішень при формуванні експертних оцінок якості технічних рішень, що приймаються в ході проектування ТКС СП.

Розглянемо один з варіантів побудови алгоритму формування ЕО, на основі реалізації якого передбачається істотно підвищити ступінь об'єктивності і обґрунтованості експертних оцінок технічних рішень, що приймаються на ранніх стадіях проектування ТКС СП.

Проблеми формування експертних оцінок (ЕО) можуть бути вирішені на базі різних структур штучних нейронних мереж, принципів організації пам'яті і навчання. Як базову приймемо ШНМ із зворотними зв'язками за моделлю Хопфільда, моделлю асоціативної пам'яті, різновидом якої є електронна нейромережа (ЕНМ).

Екстраполююча нейронна мережа такого класу складається з двох шарів нейронів – вхідного  $S_a$  і вихідного  $S_b$ . Вхідний шар  $S_a$  складається з  $n$  нейронів, прямих і зворотних зв'язків, що володіють набором, з  $p$  нейронами вихідного шаруючи  $S_b$ , причому кількість вхідних і вихідних образів дорівнює ( $n = p$ ). Варіант структури ЕНМ для формування експертної оцінки ТКС представлений на рис. 4.3.

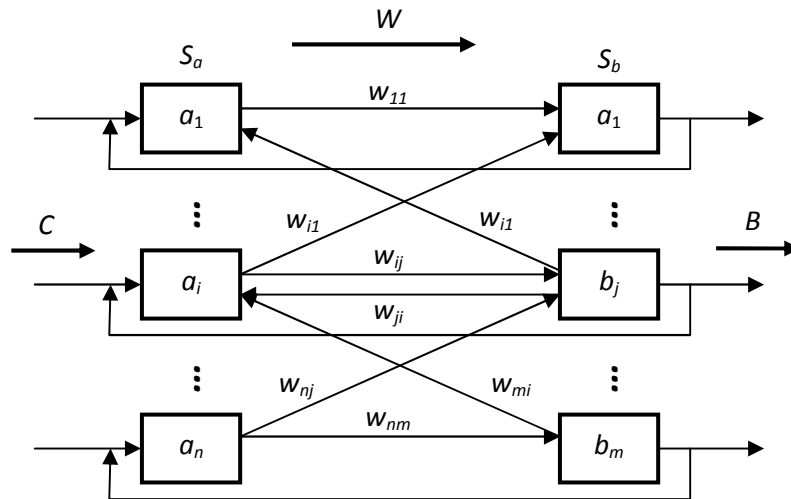


Рис. 4.3. Варіант структури ЕНМ для формування ЕО ПЯ ТКС

У якості функції активації використовується ступінчаста порогова функція вигляду:

$$f(x) = \begin{cases} +1, & x > 0; \\ -1, & x < 0; \\ 0, & x = 0. \end{cases} \quad (4.6)$$

У функції (4.6) значення (+1) характеризує позитивну думку експерта ІТС при формуванні експертного висновку про доцільність реалізації конкретного технічного рішення, що приводить, на його думку, до зростання того або іншого показника якості функціонування системи; значення (-1) свідчить про зниження значення того або іншого показника якості функціонування системи; значення (0) свідчить про те, що експерт ІТС через які-небудь обставини рахує себе недостатньо компетентним саме в цьому питанні, має негативний досвід

практичної реалізації теоретично обґрунтованого рішення і не бере на себе відповідальність сформулювати яку-небудь думку.

На відміну від синаптичної карти, використовуваної в звичайній ШНМ, в ЕНМ використовується так звана когнітивна карта, що повністю задається матрицею зв'язків вигляду

$$W = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \dots & \omega_{1n} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} & \dots & \omega_{2n} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} & \dots & \omega_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{p1} & \omega_{p2} & \omega_{p3} & \dots & \omega_{pn} \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Кожен елемент  $w_{ij}$  матриці (4.7) визначає взаємозв'язок  $i$ -го експертного рішення з  $j$ -м рішенням. Позитивні зв'язки кодуються 1, негативні -1, а відсутність зв'язків між рішеннями – 0. Аналогія структур когнітивних карт і ШНМ обумовлена тим, що кожне з можливих експертних рішень (концептів) може виступати як окремий нейрон, а коефіцієнти зв'язків між ними як синаптичні ваги.

Розглянемо алгоритм функціонування ЕНС для формування експертної оцінки показників якості ТКС [77, 78, 79]. На вхід ЕНМ поступає  $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$  – вхідний образ, що характеризує безліч можливих технічних рішень по побудові ТКС (окремих підсистем ТКС). Експерт ПТКС визначає, що на даному етапі проектування гарантовано використовуватимуться  $k$  компонент  $\bar{C}$  складових безліч рішень  $\Omega_k$  а інші елементи множини технічних рішень, які також можуть бути необхідні (переважні) для реалізації в ТКС СН, не визначені (доцільність їх реалізації і ступінь їх узгодженості з вже ухваленими рішеннями далеко не очевидні). В цілях зниження рівня неповноти і суперечності, тобто в цілях отримання повних, несуперечливих і обґрунтованих рішень по побудові ТКС СП, необхідно реконструювати бракуючі компоненти множини рішень.

Загальний алгоритм функціонування ЕНМ може бути представлений таким чином.

1. Активізація вхідного шару  $S_a$  мережі вхідним чином  $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ . Іншими словами, це приведення нейронів вхідного шару в початкові стани  $a_i(0) = c_i$ .

2. Початкова ініціалізація нейронів вихідного шару відповідно до виразу

$$b_i(0) = \begin{cases} a_i, & i \in \Omega_k; \\ 0, & i \notin \Omega_k. \end{cases} \quad (4.8)$$

3. Приведення нейронів вхідного шару до стану нейронів вихідного шару:

$$a_i(t) = b_i(t). \quad (4.9)$$

4. Обчислення нових станів нейронів вихідного шару для всіх  $i \in \Omega_k$  за формулою:

$$b_i(t+1) = f\left(\sum_{j=1}^n a_j(t)\omega_{ij}\right) = f\left(\sum_{j=1}^n b_j(t)\omega_{ij}\right). \quad (4.10)$$

5. Повторення кроків 3-4 до тих пір, поки ЕНМ не досягне стабільного стану.

Неважко бачити, що ключовою ланкою в реалізації алгоритму, що визначають його збіжність до того або іншого рішення, є матриця когнітивних карт.

Як відомо, під *когнітивною картою* розуміється орієнтований граф, вузлами якого є деякі об'єкти або концепти (у нашому випадку – проектні рішення і пов'язані з ними експертні елементи), а дуги – зв'язки між ними, що характеризують причинно-наслідкові відносини. Той факт, що причинний зв'язок є більш загальним поняттям, ніж, наприклад, логічний зв'язок, дозволяє сподіватися на повніше віддзеркалення взаємозв'язків між технічними рішеннями і пов'язаними з ними елементами процесу функціонування проекрованої ТКС СП. Ці зв'язки можуть бути позитивними і негативними. Якщо збільшення (зменшення) ваги (значущості, переваги) одного рішення приводить до збільшення (зменшення) значущості, важливості, переваги іншого рішення, то причинний зв'язок між ними позитивний, і навпаки. Відсутність причинних зв'яз-

ків між деякими рішеннями об'єктивно закономірно і враховується в когнітивній карті як нуль.

Варіант представлення неповних і суперечливих знань про причинні зв'язки різних рішень у вигляді когнітивної карти представлений на рис. 4.4. На рисунку зображена когнітивна карта для п'яти концептів, що характеризує причинно-наслідкові залежності між деякими умовними варіантами локальних (приватних) проектних рішень, що є елементами загального рішення.

Когнітивна карта, представлена на рис. 4.4, повністю задається своєю матрицею зв'язків

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

Складання подібних карт є одним із завдань експертизи ТКС. Задача полягає у встановленні безлічі локальних проектних рішень, що входять до складу загального рішення по побудові перспективної ТКС СП (концепт), визначають вибрану наочну область, і характеру зв'язків між цими концептами. Когнітивні карти дозволяють природним чином об'єднати неповні і суперечливі думки декількох експертів для адекватнішого опису даного процесу. Перевагою даного методу є можливість узагальнення неповних і суперечливих знань різних експертів в підсумковій когнітивній карті, яка враховує думки всіх фахівців і служить основою для формування прогнозу значущості того або іншого технічного рішення на подальших етапах життєвого циклу ТКС СП.

Розглянемо приклад функціонування ЕНМ на прикладі когнітивної карти, зображеної на рис. 4.4 і матрицею  $W$  ваг (4.11).

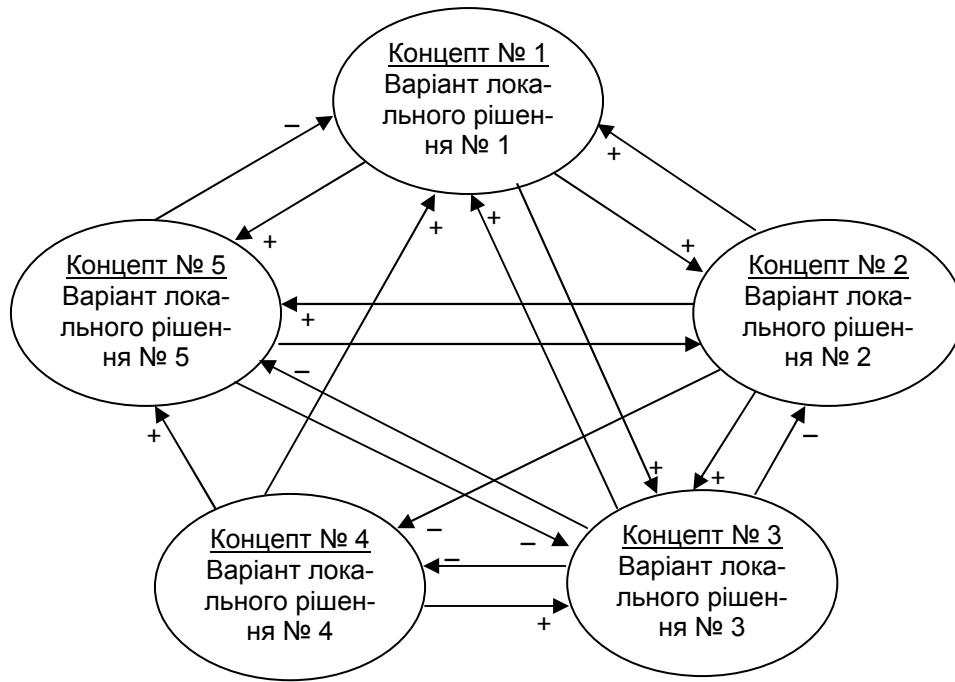


Рис. 4.4. Варіант представлення неповних і суперечливих знань у вигляді когнітивної карти

Припустимо, що нас цікавить отримання прогнозу для випадку експертної оцінки доцільності реалізації того або іншого допоміжного технічного рішення по реалізації ТКС СП у разі основного рішення, що сформовано на попередніх етапах і характеризується концептом № 3. У процесі функціонування ЕНМ повинна реконструювати відсутні компоненти загального підсумкового рішення (видати рекомендації для включення до складу загального рішення ряду локальних рішень).

У даному випадку вхідний вектор нейронної мережі  $C = [0,0,1,0,0]$ . Відповідно до розглянутого раніше алгоритму вихідний вектор  $B = [b_1, b_2, \dots, b_5]$  послідовно приймає ряд значень які визначаються на основі виразу (3.28), записуються у вигляді

$$\begin{aligned}
 B(1) &= f([1, -1, 0, -1, -1]) = [1, -1, 1, -1, -1]; \\
 B(2) &= f([0, -1, 0, 0, -2]) = [0, -1, 1, 0, -1]; \\
 &\dots\dots\dots \\
 B(10) &= f([1, -1, 1, 0, -1]) = [1, -1, 1, 0, -1];
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

і можуть бути графічно представлені у вигляді покрокової діаграми, представленої на рис. 4.5.

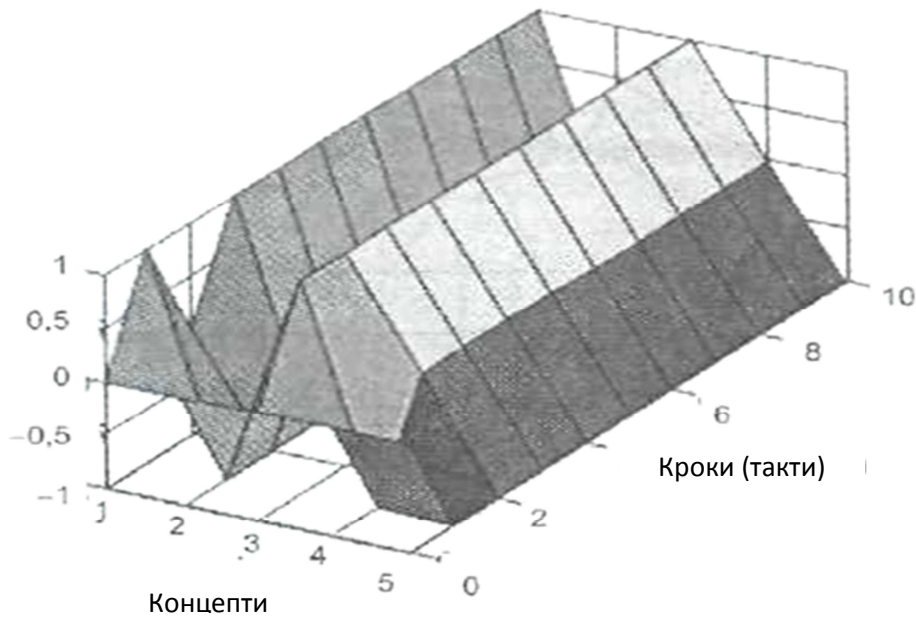


Рис. 4.5. Графік залежності ваги концепту від кроку обчислення нових станів нейронів вихідного шару

Як видно з рис. 4.5, екстраполююча ШНМ стабілізувалася вже після третього такту. Стан екстраполюючої мережі, характеризується зниженням впливу концепту № 2 (часткове технічне рішення № 2), концепту № 5 (часткове технічне рішення № 5) і збільшенням ваги концепту № 1 (часткове технічне рішення № 1) за умови, що технічне рішення, відповідне концепту № 3, є прийнятним.

Результати рішення задачі, приведеної як приклад, дозволяють з високим ступенем об'єктивності і обґрунтованості, спираючись на думки ЕТ ПТКС, що брали участь в складанні когнітивної карти, сформуванати повне і несуперечливе загальне рішення, що приймається на ранніх стадіях проектування ТКС СП. При цьому основу загального рішення гарантовано складуть варіанти технічних рішень, що описуються за допомогою концептів № 1 і № 3. Варіанти технічних рішень, що описуються за допомогою концептів № 2 і № 5 не увійдуть до підсумкового рішення, а відносно концепту № 4 конкретна ухвала мо-



же бути винесене повторною реалізацією розглянутої процедури при складанні когнітивної карти на три концепти.

Таким чином, запропонований алгоритм формування експертної оцінки доцільності реалізації технічних рішень на ранній стадії проектування ТКС СП дозволяє істотно понизити ступінь неповноти і суперечності початкових даних при формуванні рішення, що визначає будову системи. Реалізація методів теорії штучних нейронних мереж, що набули широкого поширення останніми роками, в ТКЕС дозволить формувати прогностні експертні оцінки в умовах різного рівня апіорної невизначеності, у тому числі і не стохастичного характеру, що особливо важливе на початкових стадіях проектування ТКС СП, коли статистичні дані про процес функціонування системи (підсистеми) практично відсутні.

#### **4.2. Загальна характеристика кластерного аналізу**

Незалежно від предмета в межах якого проводиться класифікація, кластерний аналіз передбачає вирішення послідовності типових задач [78, 79, 83, 84, 85]:

відбір вибірки для кластеризації;

визначення множини ознак (параметрів) по яким проводиться кластеризація;

вибір міри подібності об'єктів;

застосування одного з методів кластерного аналізу для створення груп подібних об'єктів (кластерів);

перевірка достовірності результатів.

**4.2.2. Формальна постановка задачі кластеризації.** Нехай  $X$  – множина об'єктів, які необхідно кластеризувати,  $Y$  – множина кластерів,  $X^n$  – скінченна множина (вибірка) об'єктів, на яких проводиться навчання  $X^n \subset X$ .

На множині  $X$  має бути задана метрика – функція визначення відстані між об'єктами. Кластеризація полягає в розбитті множини  $X$  на підмножини (кластери), які не перетинаються, таким чином, щоб кожен кластер містив об'єкти, які близькі за метрикою. Об'єкти з різних кластерів мають суттєво відрізнятися (знаходитись на значній відстані).

При цьому для кожного об'єкту  $x_i \in X^n$  має відповідати кластер  $y_i \in Y$ . Таким чином головна задача кластеризації – визначити відображення

$$\alpha: X \rightarrow Y, \quad (4.13)$$

за яким кожному об'єкту  $x_i \in X$  ставиться у відповідність кластер  $y_j \in Y$ . В окремих випадках множина  $Y$  може бути визначеною завчасно. Однак, звичайно, її визначення проводиться при кластеризації. У цьому випадку необхідно знайти потужність множини кластерів і об'єкти (кластери) які до неї входять.

**4.2.3. Існуючі підходи до кластеризації інформації.** Для вирішення основної задачі кластеризації - визначення відображення (4.13) можуть бути використані різні підходи. Розглянемо їх.

Перший підхід ґрунтується на використанні метода, який отримав назву K-means (к-середніх). Цей метод є найбільш популярними при вирішенні широкого кола прикладних задач кластеризації інформації. K-means представляє собою адаптацію іншого метода – EM (expectation–maximization) [94, 95]. Метод EM використовується в математичній статистиці для визначення оцінок максимальної правдоподібності параметрів імовірнісних моделей. Алгоритмічна реалізація методу EM складається з двох основних етапів. На першому (E-крок) обчислюється очікуване значення функції правдоподібності. На наступному кроці (M-крок) обчислюється оцінка максимальної правдоподібності. Потім це значення використовується у наступній ітерації (EM-кроки повторюються). Алгоритм виконується до сходи мості.

Особливість метода K-means в тому, що кількість кластерів має бути відомою завчасно. При проведенні кластеризації мінімізується дисперсія на точках кожного кластера.

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2, \quad (4.14)$$

де  $k$  – кількість кластерів;  $S_i$  – отримані кластери;  $i = 1, 2 \dots k$ ;  $\mu_i$  – центри мас векторів  $x_i \in S_i$ ;

На рис. 4.6. графічно представлено роботу методу.

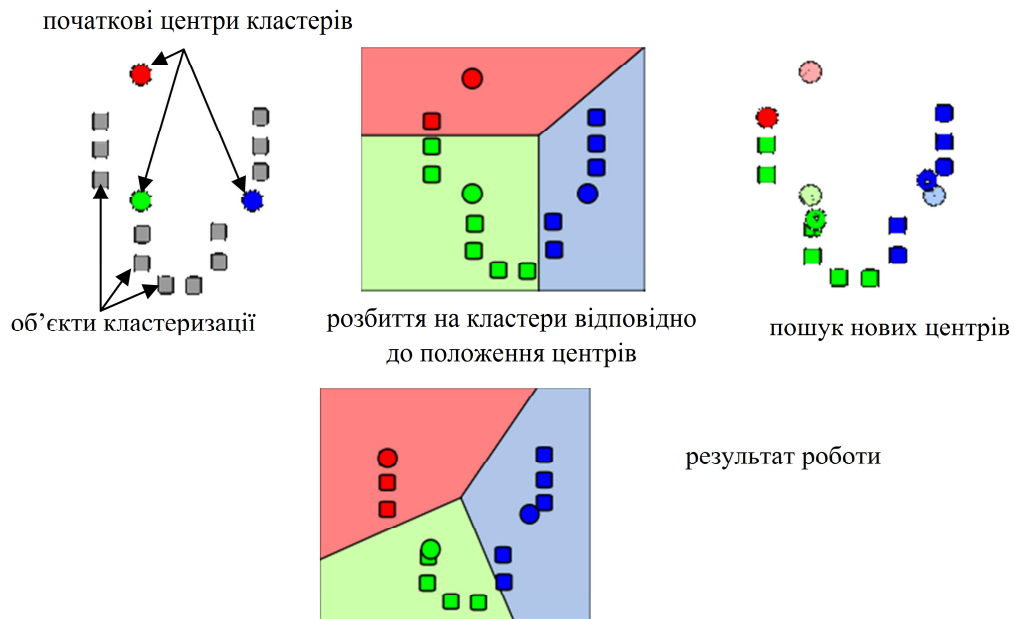


Рис.4.6. Графічна демонстрація методу  $k$ -середніх

Основним принципом метода є нове обчислення на кожній ітерації центра мас для кожного кластера отриманого на попередньому кроці. Після цього проводиться повторно розбиття на кластери відповідно до того, який з нових центрів виявився ближчим за обраною метрикою. Коли дві наступні ітерації не приводять до зміни кластерів – робота алгоритму кластеризації припиняється. Початкові центри кластерів і відповідно початкова кластеризація вибирається випадково.

Основними недоліками метода K-means є:

випадковий вибір початкових кластерів (можливо вдосконалити метод визначивши в конкретному його прикладному застосуванні раціональне початкове розбиття, що дозволить суттєво підвищити його ефективність);

число кластерів має бути завчасно відомим (це відповідає багатьом прикладним задачам кластеризації тому, не є суттєвим недоліком методу).

Оскільки у методі K-means передбачається використання метрики, вона має бути визначена. Тому в тих випадках, коли її визначити неможливо, застосування даного методу обмежене. При вирішенні задачі класифікації інформаційно-телекомунікаційних систем не завжди можливим є визначення метрики. Отже використання метода K-means не є доцільним.

Друга група методів – графові методи кластеризації.

В основі цих методів покладено використання для побудови кластерів об'єктів біграфів. Біграфом є граф який може поділити множину на дві підмножини які не перетинаються. Використовувати це підхід запропонував німецький математик Rudolf Wille. Однак при використанні графових методів для застосування біграфів необхідно визначити відношення між об'єктами які підлягають кластеризації. Проте їх визначення у випадку класифікації інформаційно-телекомунікаційних систем складно реалізувати.

Наступні методи кластеризації – статистичні. Вони передбачають використання методів статистичного аналізу початкових даних які описують об'єкти кластеризації для встановлення спільних ознак і подальшого їх поділу на кластери.

Прикладом евристичного методу кластеризації є FOREL (FOREL2). В основі роботи відповідного алгоритму покладено використання принципу компактності. Близьким за змістом об'єктам в просторі ознак відповідають окремі множини (кластери). Однак для визначення близькості необхідно на просторі ознак визначити метрику, що у випадку класифікації інформаційно-телекомунікаційних систем не завжди є зручним.

Розглянувши цілий ряд методів які використовуються для кластеризації інформації можна зробити висновок, що вони, звичайно, ґрунтуються на визначенні метрики в тому чи іншому вигляді. Відстань між об'єктами використовується для визначення областей близьких об'єктів (кластерів). Однак в окремих задачах, зокрема в задачі класифікації інформаційно-

телекомунікаційних систем, визначення метрики є складним і не завжди однозначним. Тому для кластеризації інформаційно-телекомунікаційних систем потрібно використати інший підхід, який не потребує явного визначення метрики.

Для проведення кластеризації без визначення метрики на просторі ознак об'єктів можливим є використання методів штучного інтелекту, зокрема, нейронних мереж. При вирішенні таких задач відомим є застосування нейронних мереж Кохонена.

### **4.3. Кластеризація з використанням нейронних мереж Кохонена**

Штучні нейронні мережі представляють собою системи , архітектура і принцип дії яких базується на аналогії з мозком живих істот. Основний елемент в нейромережах – штучний нейрон, який імітує роботу нервової клітини нейрона.

При побудові нейромережі важливим є не тільки змоделювати роботу мозку але і в подальшому навчити нейромережу вирішувати прикладні завдання. Зараз розроблені різні моделі навчання, які використовуються для навчання нейромереж. Однією з перших в 1949 році була створена модель навчання Дональда Геба.

Існують різні моделі нейромереж, які по різному моделюють роботу біологічного прототипу (мозку). Ці моделі не тільки повторюють окремі функції мозку, але і здатні виконувати різноманітні завдання обробки інформації. Причому за можливостями вирішення задач нейромережі суттєво відрізняються від комп'ютерів з фон-Нейманівською архітектурою. Вони не тільки моделюють роботу мозку але і здатні вирішувати задачі подібно до того, як це робить біологічний прототип. Це визначає основні області застосування нейромереж – вирішення задач які традиційно відносять до задач „штучного інтелекту”. Однією з таких задач є задача класифікації інформації. Біологічний мозок і, від-

повідно, штучні аналоги – нейромережі здатні здійснювати класифікацію об'єктів.

Для кластеризації інформації традиційно використовують нейромережі Кохонена [87-89]. Нейромережа Кохонена – нейронна мережа розроблена Тойво Кохоненом на початку 1980-х років. Вона принципово відрізняється від багатьох інших нейромереж. Основна її особливість полягає у використанні неконтрольованого навчання. Навчальна множина складається лише із значень вхідних змінних. Основним елементом цих нейромереж є шар Кохонена який складається з лінійних формальних нейронів. Ці нейрони представляють собою адаптивні лінійні суматори.

Розглянемо типову модель нейрона, яка використовується практично в усіх нейромережах, зокрема і в мережі Кохонена.

Штучний нейрон імітує властивості свого біологічного прототипу. Подібно до справжнього нейрона на вхід моделі подається певна множина вхідних сигналів (від інших нейронів). Кожний сигнал множиться на відповідний ваговий коефіцієнт (аналогічно до роботи синапсів). Результати добутків додаються і визначають рівень активації нейрона. Результат додавання є аргументом активаційної функції  $F$ .

Схематично робота моделі нейрона представлена на рис. 4.7.

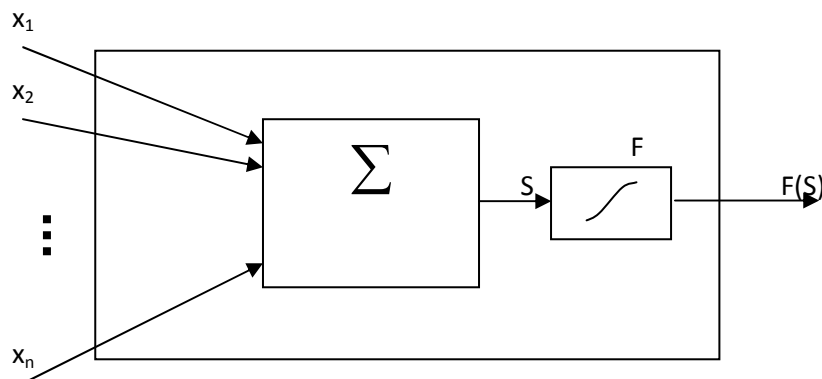


Рис. 4.7. Графічна демонстрація моделі нейрона

В різних моделях нейромереж можуть використовуватись різні активаційні функції  $F$ . В найпростішому випадку нелінійна функція є пороговою. У випадку, коли аргумент менший за певне порогове значення  $p$  (або рівний цьому значенню) – результат функції 0, якщо більший – результат 1. В більш складних моделях результат активаційної функції може приймати неперервні значення.

В нейромережі Кохонена активаційна функція враховує активаційні рівні всіх інших нейронів шару. На виході лише того нейрона, рівень активації якого максимальний, формується 1. В усіх інших – 0.

Таким чином, в нейромережі Кохонена використовується шар паралельно працюючих лінійних елементів (моделей нейронів). Всі вони мають однакове число входів ( $n$ ) і отримують на свої входи один і той же вектор вхідних сигналів  $x=(x_1, \dots, x_n)$ . Проміжний результат на виході  $i$ -того нейрона обчислюється наступним чином

$$y_i = v_{i0} + \sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot x_j, \quad (4.15)$$

де  $y_i$  – проміжний сигнал на виході  $i$ -того нейрона;

$v_{ij}$  – вагові коефіцієнти;

$v_{i0}$  – коефіцієнт зсуву;

$x_i$  – вхідні сигнали.

Серед попередніх вихідних сигналів шару нейронів знаходиться максимальний. Його номер  $i_{max} = \max_i \{y_i\}$ .

$$i_{max} = \max_i \left\{ v_{i0} + \sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot x_j \right\}. \quad (4.16)$$

На виході нейрона з номером  $i_{max}$  виставляється сигнал 1, на виході всіх інших 0. У випадку декількох максимальних вихідних сигналів,  $i_{max}$  вибирається довільним чином серед відповідних нейронів.

Зрозуміло, що відповідно до описаного вище алгоритму роботи, нейромережу Кохонена можливо використати для вирішення задачі кластеризації. Вектор вхідних сигналів  $x$  містить параметри, які описують об'єкт („інформа-

ційно-телекомунікаційну систему”). Кількість нейронів у шарі Кохонена має відповідати кількості кластерів. Після обробки нейромережею вхідних даних лише один з нейронів має активний вихідний сигнал (1). Саме до кластера, який відповідає цьому нейрону і належить об’єкт характеристики якого подавались у вхідному сигналі.

Слід відмітити, що робота нейромережі Кохонена по кластеризації об’єктів має просту інтерпретацію і може бути реалізована без застосування нейромережових технологій. Розглянемо класичну геометричну інтерпретацію роботи нейромережі Кохонена [96, 99].

Для побудови нейромережі необхідно визначити центри майбутніх кластерів (сукупності ознак, параметрів об’єктів які є найбільш характерними для певного класу). Позначимо ці центри  $v_i$ , де  $i$  – номер кластера (змінюється в межах від 1 до  $m$ , де  $m$  – кількість кластерів). Кожен  $i$ -ий центр характеризується сукупністю ознак  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ , де  $n$  – кількість ознак. Об’єкт який потрібно класифікувати (віднести до певного кластера) описується ознаками  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Для кластеризації об’єкта обчислимо евклідові відстані до всіх відомих нам центрів кластерів і знайдемо центр, відстань до якого найменша. Саме до цього кластера і буде належати об’єкт який потрібно було класифікувати.

Позначимо відстань від об’єкта кластеризації до центра  $i$ -того кластера  $r_i(x)$ .

$$r_i(x) = \sqrt{\|x - v_i\|^2}. \quad (4.17)$$

Для зручності замінімо розгляд відстаней квадратами відстаней (для подальшої мінімізації це несуттєво). Перетворимо і спростимо підкореневий вираз в (4.4) і покажемо аналогічність до (4.2) [86].

$$\|x - v_i\|^2 = \|x\|^2 - 2 \cdot \sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot x_j + \|v_i\|^2. \quad (4.18)$$

Перший доданок для всіх  $m$  кластерів є однаковий, тому при пошуці мінімуму ми можемо його не враховувати. Таким чином, для пошуку найближчого центру до об’єкту кластеризації потрібно мінімізувати



$$-2 \cdot \sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot x_j + \|v_i\|^2, \text{ або } -\sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot x_j + \frac{\|v_i\|^2}{2}.$$

Номер найближчого центра  $i$ , відповідно, кластера буде визначатись

$$i_{\min} = \min_i \left\{ -\sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot x_j + \frac{\|v_i\|^2}{2} \right\}, \text{ або } i_{\max} = \max_i \left\{ \sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot x_j - \frac{\|v_i\|^2}{2} \right\} \quad (4.19)$$

Якщо в (3.6) позначити

$$\frac{\|v_i\|^2}{2} = v_{i0}, \quad (4.20)$$

остаточно отримаємо

$$i_{\max} = \max_i \left\{ v_{i0} + \sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot x_j \right\}. \quad (4.21)$$

Слід відмітити, що (4.9) є тотожне (4.3). Таким чином робота нейромережі Кохонена може бути інтерпретована як пошук кластера з найближчим до об'єкта центром.

А сама побудова нейромережі Кохонена (вибір коефіцієнтів зсуву  $v_{i0}$ ) і вагових коефіцієнтів  $v_{ij}$  відповідно до центрів кластерів аналогічна поділу гіперпростору ознак на багатогранники.

У випадку двомірного простору ознак геометрична інтерпретація спрощується до поділу площини ознак на багатокутники, які отримали назву багатокутники Вороного-Дирихле (рис. 4.8).

Багатокутники Вороного-Дирихле представляють графічне відображення кластерів.

Для вирішення задачі кластеризації ТКС СП було розроблено програмне забезпечення в якому змодельована робота нейромережі Кохонена. Для опису ТКС СП використовується сукупність ознак, яка може формуватись користувачем на попередньому етапі. Ознаки можуть включати множину фіксованих значень. У цьому випадку кожне з можливих значень описується текстовим рядком і кодується (автоматично) числовим значенням. Важливим при формуванні таких ознак задавати можливі значення у вірній послідовності, яка має відповідати змісту ознаки. Інший тип ознаки – логічна, яка може приймати

лише 2 значення так (кодується 1) або ні (кодується 0). Передбачена також можливість використання числових ознак. Слід відмітити, що оскільки в основі роботи нейромережі Кохонена покладена Евклідова метрика, надзвичайно важливим є адекватне кодування ознак. Більша різниця в числових значеннях має відповідати більшій відмінності характеристик і навпаки. Це було підтверджено при роботі з програмою.

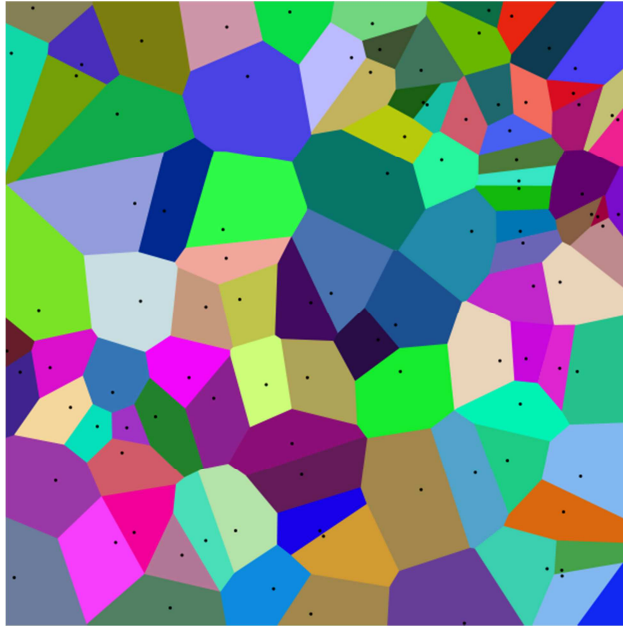


Рис.4.8. Розбиття площини ознак на багатокутники Вороного-Дирихле

Після формування сукупності ознак для побудови нейромережі Кохонена в програмі передбачено її навчання, яке в цій нейромережі полягає в обчисленні відповідних коефіцієнтів. Початковими даними для навчання нейромережі є центри кластерів – сукупності ознак які найбільш точно відповідають окремим класам інформаційно-телекомунікаційних систем по яким буде проводитись подальша класифікація.

Після формування нейромережі існує можливість її збереження разом з описом ознак у файл для подальшого використання. В подальшому програма надає можливість охарактеризувавши певну ТКС по вказаним ознакам визначити до якого класу вона належить.

Дослідна експлуатація програми показала, що її можливо застосовувати для вирішення задач класифікації ТКС.

Перевага використання нейромережі у порівнянні з класичним алгоритмічним підходом полягає у можливості швидкої паралельної обробки інформації. Проте у випадку задач з порівняно невеликою кількістю ознак (параметрів) об'єктів кластеризації, обчислювальної потужності сучасних ЕОМ більш ніж достатньо для використання класичного підходу (обчислення евклідових відстаней і пошук мінімальної відстані). І лише у випадку значної кількості ознак, доцільним є використання нейромережі Кохонена. При цьому існує можливість навіть при емуляції нейромережі на ПЕОМ досягти значного підвищення ефективності обробки інформації за рахунок паралельної емуляції роботи окремих нейронів на різних ядрах мікропроцесора.

Одним з недоліків існуючих підходів до використання нейромереж Кохонена є намагання понизити розмірність до одномірного (шар нейронів) і двомірного (сітка нейронів) варіанту для зручності інтерпретації результатів обробки і відображення на екрані монітора. Однак внаслідок такого обмеження взаємозв'язків між нейронами до утворення лише одномірних або двомірних структур суттєво знижуються потенційні можливості таких нейромереж.

Для одношарових нейромереж існує проблема лінійної подільності [100]. Як було показано, нейромережа Кохонена аналогічна до лінійного поділу простору ознак на багатокутники. Тобто кластери при використанні нейромережі Кохонена можуть мати лише форму багатокутника. Лінійна подільність обмежує нейромережі Кохонена лише тими задачами кластеризації, в яких множини точок в просторі ознак які відповідають початковим значенням можуть бути розділеними лінійно. Звичайно можуть існувати задачі, в яких кластери мають мати більш складну форму і звести її до лінійної неможливо.

У зв'язку з цим, розглянемо можливість застосування для кластеризації ТКС СП нейромереж з більш складною структурою.

#### **4.4. Використання багатошарових нейронних мереж для класифікації телекомунікаційних систем спеціального призначення**

Хоча для вирішення задачі кластеризації інформації традиційно використовують нейромережі Кохонена, як було показано вище, в окремих випадках їх використання може бути недостатньо ефективним.

Для вирішення більш складних задач класифікації пропонується використовувати нейромережі з більш складною структурою – багатошарові нейромережі. Однією з багатошарових нейромереж, яка отримала широке використання при вирішенні широкого кола задач штучного інтелекту є нейромережа зворотного поширення похибки (BackPropagation) [101- 104]. Проведемо аналіз можливості її використання для класифікації інформаційно-телекомунікаційних систем.

Архітектура цієї нейромережі була розроблена на початку 1970-х років декількома незалежними авторами (Вербором; Паркером; Румельгартом, Хінтоном та Вільямсом). На даний час концепція BackPropagation представляє собою найбільш популярну, ефективну та легку модель навчання для складних, багатошарових мереж з різною внутрішньою будовою. Архітектура багатошарової мережі, зокрема, наявність прихованих шарів, дозволяє її використовувати для вирішення більш складних задач штучного інтелекту. Зокрема це і складні задачі класифікації інформації.

Типова нейромережа BackPropagation має вхідний, вихідний та принаймні один прихований шар. Обмежень відносно числа прихованих шарів не існує, але на практиці застосовують один або два. Схематично структура нейромережі BackPropagation відображена на рис.4.9.

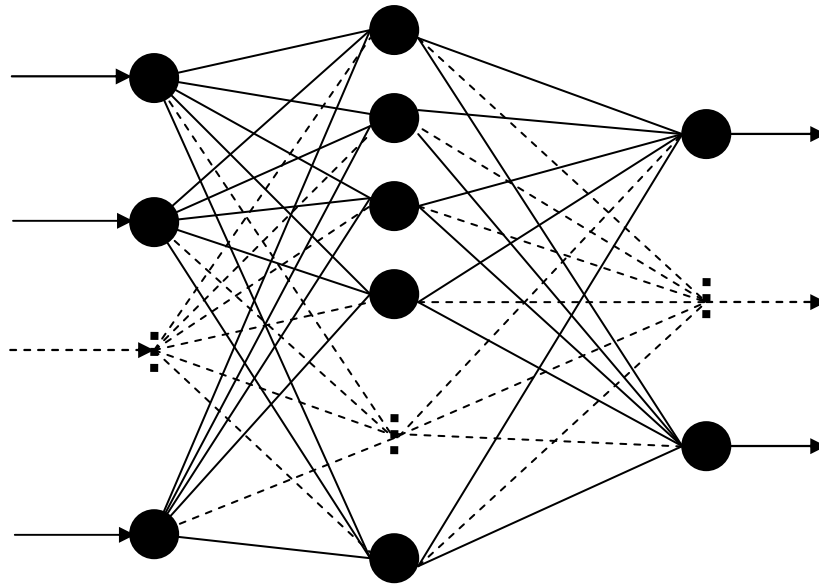


Рис.4.9. Типова структура нейромережі BackPropagation

Нейрони організовані в окремі шари. Кожний нейрон в нейромережі формує зважену суму своїх входів, яка пропускається через передатну функцію (відповідно до класичної моделі нейрона рис. 4.2) та формує свій стан. Кожен нейрон, який знаходиться в певному шарі, надає інформацію про свій стан всім нейронам у наступному шарі. Мережа може моделювати функції практично будь якої складності, причому число шарів і число нейронів у кожному проміжному шарі має відповідати їх складності. Якщо нейронів недостатньо мережа, можливо, буде неспроможна вирішувати певні задачі. Визначення числа проміжних шарів і числа нейронів в них є важливим при проектуванні нейромережі.

В останніх дослідженнях вказуються наступні рекомендації щодо вибору архітектури нейромережі:

кількість входів та виходів мережі визначаються кількістю вхідних та вихідних параметрів досліджуваного об'єкту, явища, процесу, тощо. На відміну від зовнішніх шарів, кількість нейронів прихованого шару  $n_{np}$  обирається емпіричним шляхом. В більшості випадків достатня кількість цих нейронів становить  $n_{np} \leq n_{ex} + n_{vix}(n_{ex}, n_{vix}$  - кількість нейронів у вхідному і, відповідно, у вихідному шарах);

у випадку, коли доводиться вирішувати занадто складну для нейромережі задачу і, відповідно, помилка між бажаним і наявним результатом навчання є великою і не зменшується в процесі навчання - кількість нейронів прихованого шару потрібно збільшити.

Після того, як визначено кількість шарів і число нейронів в кожному з них, потрібно знайти значення для синаптичних ваг і порогів мережі, які спроможні мінімізувати похибку. Для цього використовуються алгоритми навчання. В ході навчання відбувається підгонка параметрів (вагових коефіцієнтів нейронів) мережі для коректного вирішення поставленого завдання. Основним в алгоритмі навчання нейромереж зворотного поширення похибки є визначення похибки яка в ході навчання зменшується до допустимо малого значення. Похибка визначається шляхом проходження через мережу множини навчальних прикладів і порівняння отриманих вихідних значень з бажаними. На основі сукупності похибок обчислюється результуюча похибка мережі. Для обчислення результуючої похибки звичайно використовується сумування квадратів.

Алгоритм навчання нейромережі є ітеративним. На кожному етапі на вхід нейромережі подається один з навчальних образів. На основі поточного стану нейромережа формує вихідний сигнал, який звіряється з еталонним. При неспівпаданні результату з еталоном визначається похибка і здійснюється корегування ваг зв'язків між нейронами для того щоб цю похибку мінімізувати. Потім подається наступний образ і процедура повторюється для всієї навчальної множини.

Розглянемо процес навчання більш докладно [103, 104].

1. Ініціалізація мережі: вагові коефіцієнти і зсуви мережі приймають малі випадкові значення.

3. Вибір чергового елемента навчальної множини: (вхід - вихід). Входи  $(x_1, x_3, \dots, x_N)$ , повинні розрізнятися для всіх прикладів навчальної множини.

3. Обчислення вихідного сигналу:

$$S_{i_m} = \sum_{i_{m-1}}^{N_{m-1}} W_{i_m j_{m-1}} y_{i_{m-1}} - b_{i_m},$$

$$y_{i_m} = f(S_{i_m}),$$

$$i_m = 1, \dots, N_m, m = 1, \dots, L,$$

де  $S$  – вихід суматора;

$w$  – вага зв'язку;

$L$  – число шарів;

$N$  – число нейронів у шарі;

$y$  – вихід нейрона;

$b$  – зсув;

$f$  – передаточна функція.

#### 4. Корегування ваг зв'язку.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + r g_j x'_i,$$

де  $w_{ij}$  – вага від нейрона  $i$  або від елемента вхідного сигналу  $i$  до нейрона  $j$  у момент часу  $t$ ;

$x'_i$  – вихід нейрона  $i$ ;

$r$  – швидкість навчання;

$g_j$  – значення похибки для нейрона  $j$ .

Якщо нейрон з номером  $j$  належить останньому шару, тоді

$$g_j = y_j(1 - y_j)(d_j - y_j)$$

де  $d_j$  – бажаний вихід нейрона  $j$ ;

$y_j$  – поточний вихід нейрона  $j$ .

Якщо нейрон з номером  $j$  належить одному з шарів з першого по передостанній, тоді

$$g_j = x'_j(1 - x'_j) \sum_k g_k w_{jk},$$

де  $k$  – приймає значення всіх нейронів з шару номер якого на 1 більший за то, якому належить  $j$ -тий нейрон.

Аналогічним чином корегуються зсуви  $b$ .

У ролі функції  $f$  можуть використовуватись: функція Фермі; раціональна сигмоїда; гіперболічний тангенс.

Таким чином, перевагами даного класу нейромереж є відсутність необхідності визначення метрики, більш точне розрізнення образів. Недолік полягає в більш складній процедурі навчання.

Для перевірки можливості використання даного класу нейромереж для вирішення завдання класифікації інформаційно-телекомунікаційних систем було модифіковано програму (в якій для кластеризації використовувалась нейромережа Кохонена) в яку було включено можливість використання для кластеризації нейромережі BackPropagation. Кодування вихідних даних (ознак ТКС) для навчання здійснювалось аналогічно до попереднього. Для емуляції нейромережі використовувалась модель в якій кількість нейронів вхідного шару відповідає кількості параметрів ІТС, кількість вихідних нейронів дорівнює кількості кластерів. Навчання нейромережі проводилось по сукупності найбільш характерних для окремих кластерів (класів ТКС) сукупностей ознак. При цьому автоматично корегувались параметри нейромережі для отримання потрібних результатів (активації потрібного нейрона на виході). Дослідження роботи програмного забезпечення показало, що нейромережа з більш складною структурою і зв'язками між окремими шарами дозволяє розрізняти об'єкти більш ефективно.

Однак дослідження [76, 78, 106, 107, 110] показують, що для більш якісного вирішення задач штучного інтелекту доцільним є використання більш складних моделей нейромереж, які краще моделюють процеси у мозку людини. Ці нейромережі мають мати зворотній зв'язок. Однією з подібних нейромереж є нейромережа Хопфілда. Дослідження можливості використання асоціативної пам'яті на основі нейромережі Хопфілда для вирішення задачі кластеризації є напрямком подальших досліджень.

#### **4.5. Кластеризація з використанням нейронних мереж Хопфілда**

Відповідно до висновків отриманих в результаті комплексних досліджень в галузі штучного інтелекту [81] значна кількість штучних нейронних



мереж не повною мірою здатні моделювати обробку інформації біологічним мозком.

Вирішення найбільш складних задач у мозку пов'язані з використанням зворотних зв'язків.

Більшість моделей нейромереж розглядає поширення сигналів лише в одному напрямі і не враховує можливість їх розповсюдження в зворотній бік. Однак саме за рахунок таких зворотних зв'язків біологічні нейромережі здатні вирішувати більш складні задачі [77, 89].

Однією з відомих моделей нейромереж з зворотними зв'язками є модель Хопфілда.

Джон Хопфілд вперше запропонував свою асоціативну мережу у 1982 р. Ця мережа була названа на його честь. В основі ідеї її роботи покладена аналогія з фізикою динамічних систем (рух динамічної системи до стану рівноваги). Принцип роботи нейромережі показаний на рис.4.10. Для спрощення на цьому рисунку показаний приклад який відповідає одномірному простору образів. Звичайно, при вирішенні типових прикладних задач розмірність простору є суттєво більшою. Початковий стан нейромережі (до навчання) аналогічний горизонтальній прямій лінії (рис.4.10 а). В процесі навчання лінія деформується і утворюються «потенційні ями» таким чином, що тим образам, які запам'ятовуються (навчальним образам) відповідають стійкі положення рівноваги (рис.4.10 б). При розпізнаванні образу нейромережа переводиться в відповідний йому початковий стан. Подальша динаміка процесів в нейромережі аналогічна «скочуванню» в потенційну яму.

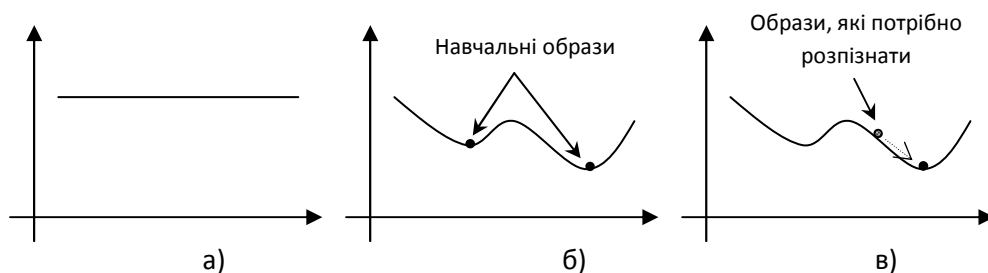


Рис.4.10. Динамічна аналогія роботи нейромережі Хопфілда

Типові прикладні застосування для цього виду нейронної мережі включають асоціативну, або адресовану за змістом пам'ять та задачі оптимізації. Однак, як видно з динамічної аналогії, окіл «потенційної ями» є аналогічним кластеру, а процес навчання нейромережі (утворення «потенційних ям») є аналогічний розбиттю множини образів-об'єктів на кластери. Розпізнавання образів можливо інтерпретувати як процес кластеризації[99].

Наявність зворотних зв'язків вимагає необхідність моделювання динаміки розвитку процесів у нейромережі. Поширення сигналів (динаміка зміни образів) розглядається до тих пір, поки стан нейромережі не стабілізується, або не буде перевищена максимальна кількість ітерацій.

Мережа Хопфілда має два головних обмеження. Число образів, що можуть бути збережені та точно відтворені є строго обмеженим. Якщо зберігається занадто багато параметрів, мережа може збігатись до нового неіснуючого образу, відмінному від всіх запрограмованих образів, або не збігатись взагалі. Ємність пам'яті для мережі складає приблизно 15% від кількості нейронів. Другим обмеженням моделі є те, що нейромережа Хопфілда може стати нестабільною, якщо образи є надто подібними. Слід відмітити, що і біологічний аналог (мозок людини) не у всіх випадках здатний розрізняти дуже близькі образи. Образ з множини навчання вважається нестабільним, якщо мережа збігається до деякого іншого образу з навчальної множини. Ця проблема може бути вирішена вибором навчальних прикладів більш ортогональних (некорельованих), або збільшенням ємності нейромережі.

Задачі які типово розв'язуються даною мережею, звичайно, формулюється наступним чином. Відомий деякий набір двійкових сигналів (даних, які описують якісь об'єкти або характеристики процесів). Цей набір вважається зразковим. Мережа повинна вміти з спотвореного сигналу, поданого на її вхід, виділити («пригадати» по частковій інформації) відповідний зразок або «дати висновок» про те, що вхідні дані не відповідають жодному із зразків. У загаль-

ному випадку, будь-який сигнал може бути описаний вектором  $x_1, x_i, x_n, \dots, n$  - число нейронів у мережі і величина вхідних і вихідних векторів.

Слід відзначити, що така постановка типових задач, які розв'язуються нейромережами Хопфілда є близькою до задач кластеризації. Зразкові образи відповідають найбільш характерним об'єктам кластеризації (центрам кластерів). Алгоритм функціонування нейромережі визначає для поданого на вхід нейромережі неklasифікованого образу «найближчий» центр кластера. Саме до цього кластера і можливо віднести даний образ. Слід відмітити, що даний підхід також не потребує явного визначення метрики. Аналіз близькості образів забезпечується засобами самої нейромережі.

Після розпізнавання образу (об'єкту) необхідно визначити до якого кластера він належить. Для цього можливо використати звичайне порівняння з усіма «навчальними» образами (центрами кластерів) до визначення першого співпадіння. У тому випадку, якщо результат роботи нейромережі не відповідає жодному з запам'ятованих образів результат можна інтерпретувати, як неможливість віднести даний об'єкт до жодного кластеру (неможливість його класифікувати).

Для перевірки ефективності вирішення задачі класифікації інформаційно-телекомунікаційних систем з застосуванням мережі Хопфілда було розроблено програму, яка моделює її роботу. Після введення сукупності ознак по яким здійснюється класифікація і визначення класів ТКС (кластерів) із «зразковими» образами, формується внутрішня структура нейромережі і здійснюється її навчання відповідно до класичних алгоритмів [80, 100]. Після цього програма готова до класифікації невідомих ТКС. Після введення сукупності ознак невідомої ТКС нейромережа переводиться в відповідний початковий стан. Після чого моделюється динаміка розвитку нейромережі до рівноважного стану. Для усунення ефекту зациклювання при виникненні коливальних процесів в нейромережі максимальна кількість ітерацій обмежена до 20 (визначено експериментальним шляхом). Після завершення роботи нейромережі результуючий стан послідовно порівнюється з кожним з «зразкових» образів і визначається відповідний клас ТКС.

Слід відмітити, що хоча основна обробка інформації в ході кластеризації проводиться з використанням нейромережі, для остаточного визначення класу ТКС використовується звичайний класичний алгоритмічний підхід. Для прискорення обробки інформації на цьому етапі можливо використати іншу більш просту нейромережу (Кохонена). Таким чином для кластеризації інформації можливо побудувати гібридну нейромережу попередня обробка інформації в якій здійснюється нейромережею Хопфілда, а остаточне визначення класу ТКС проводиться шаром Кохонена.

Все це дає дозволяє зробити висновок, про можливість використання нейромережі Хопфілда для кластеризації інформації. Наявність і використання зворотних зв'язків робить вирішення задачі кластеризації найбільш близьким до того як класифікує інформацію біологічний мозок.

#### **4.6. Застосування науково-методичного апарату експертизи телекомунікаційної системи спеціального призначення**

З метою перевірки достовірності науково-методичного апарату, який був запропонований в дослідженні, була вибрана телекомунікаційна система органу охорони державного кордону Державної прикордонної служби України (рис. 4.11).

Для проведення експертизи досліджуємої ТКС СП було визначені числові значення основних її показників з використанням науково-методичного апарату, який було сформовано в третьому розділі.

З використанням наведеного вище апарату обробки нечітко визначеної інформації за виразами з таблиць 3.4 – 3.8 були обчислені значення основних показників (для спрощення моделювання з загального переліку було обрано лише найбільш важливі показники які найбільш повно характеризують ТКС СП) якості функціонування ТКС для фізичного, каналного і мережевого рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

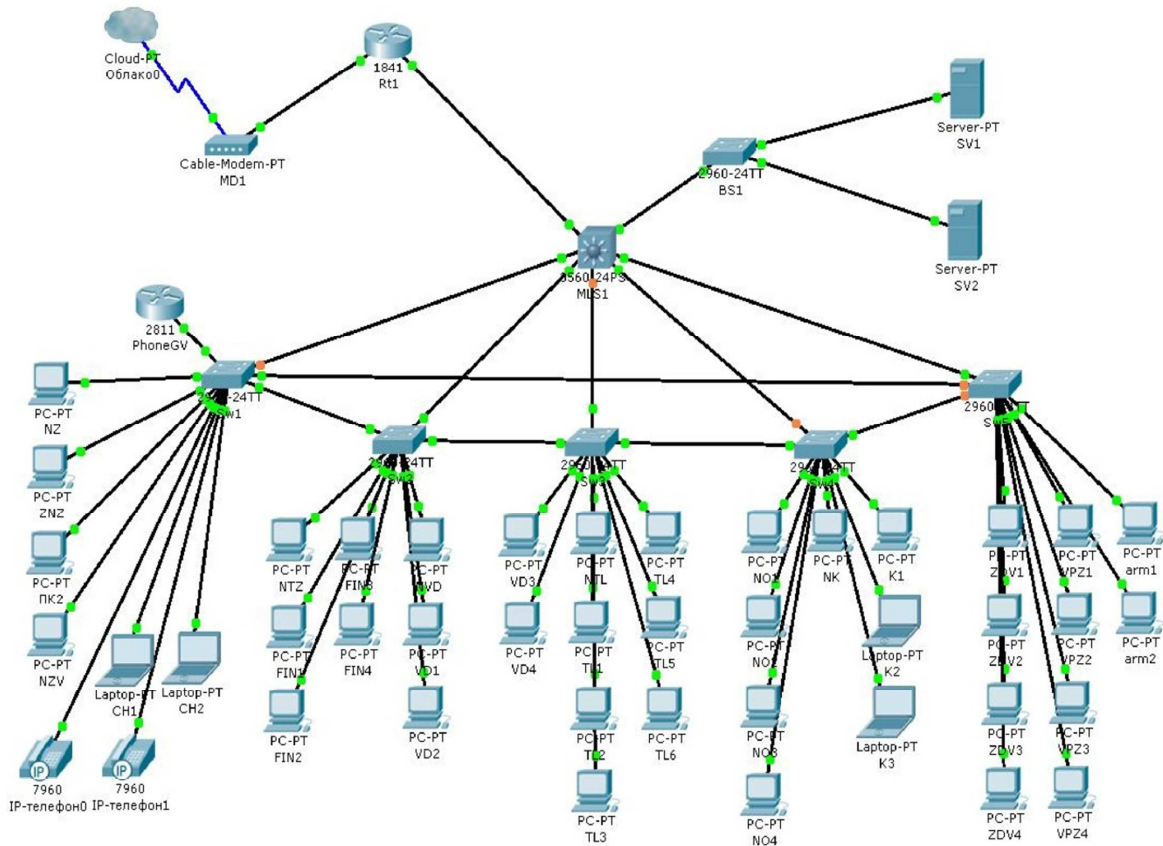


Рис. 4.11. Схема ТКС органу охорони державного кордону ДПСУ

Результати проведених розрахунків для телекомунікаційної системи органу охорони державного кордону Державної прикордонної служби України наведені у Додатку Б.

Сукупність значень основних показників (як нижніх, так і верхніх оцінок) було зібрано в вектор вхідних значень  $X$ .

Для проведення експертизи було визначено три кластери (класи) ТКС СП («клас1» - вискоефективні ТКС, «клас2» - ТКС СП з середньою ефективністю, «клас3» - ТКС СП низької ефективності) і побудовано багат шарову нейромережу (з 3-ма прихованими шарами) (рис.4.12).

З метою навчання нейромережі, було сформовано по 10 навчальних векторів для кожного з трьох класів. Вибір значень показників для кожного вектора навчальної множини здійснювався з використанням метода експертних оцінок. Експерти визначили для кожного з навчальних варіантів ТКС СП по трьом запропонованим класам типові значення показників.

При формуванні 10 навчальних векторів на основі визначених експертами значень показників для кожного з 3-х класів вони обирались таким чином, щоб три вектора відповідали найбільш типовим значенням відповідно до свого класу (формувався «середина» кластера). Інші 7 векторів (навчальних зразків ТКС СП) підбирались виходячи з того, щоб різні показники мали значні відмінності. За одними з них ТКС СП окремо можливо було б віднести до одного класу, за іншими – до іншого. Однак сукупність значень всіх показників давала можливість чіткого віднесення екземпляра «навчальної» ТКС СП до одного з трьох класів. Такий підхід до вибору 7 векторів дозволив в пам'яті нейромережі краще визначити межі кластерів.

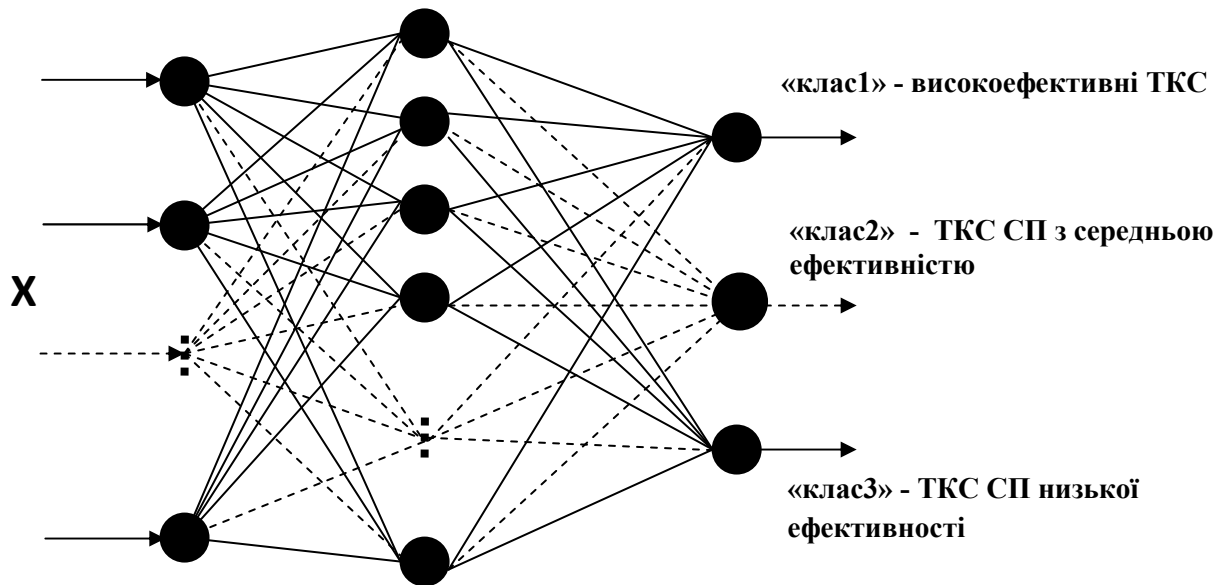


Рис. 4.12. Структура нейромережі для експертизи ТКС СП

В результаті моделювання нейромережі, після проведення процедури навчання було отримано множину вагових коефіцієнтів. Ця множина визначала подальшу роботу нейромережі і, по суті, представляла асоціативну пам'ять в яку була внесена інформація про 3 класи ТКС СП і їх нечітку класифікацію за значеннями показників.

Для перевірки роботи нейромережі на вхід було подано вектор вхідних значень  $X$ , який відповідав обчисленим значенням показників ТКС СП Державної прикордонної служби.

В результаті функціонування нейромережі за значеннями станів нейронів у вихідному шарі було отримано, що досліджувана ТКС СП належить до «класу 1».

З метою перевірки працездатності нейромережі значення показників досліджуваної ТКС погіршувались (спотворювались) і подавались на вхід нейромережі. Коли погіршення ставало суттєвим, значення на виході нейромережі різко змінювалось на відповідне до «класу 2».

При внесенні ще більших спотворень показників в гірший бік вдалось отримати результат експертизи - «клас 3».

Таким чином результат моделювання підтвердив можливість використання для проведення експертизи ТКС СП в умовах невизначеності комплексного підходу з використанням на першому етапі апарату нечітких чисел для визначення показників, які її описують; на другому етапі для остаточної експертизи шляхом кластеризації – використання нейромережі.

Однак в ході досліджень було виявлено, що в ході кластеризації з використанням нейромережі всі показники сприймались нею однаково (з однаковою вагою). І навіть в тому випадку, коли один суттєвий показник зумисно значно погіршувався, нейромережа в окремих випадках відосила ТКС СП до «класу 2». Можливим варіантом вирішення даної проблеми є формування більш складної навчальної множини, яка передбачатиме значно більшу різноманітність варіантів ТКС СП і дозволить більш чітко сформулювати в пам'яті нейромережі межі кластерів.

### **Висновки з розділу**

В даному розділі розглянуто вирішення задачі експертизи ТКС з використанням кластеризації інформації. В результаті проведеного критичного аналізу відомих методів кластеризації визначено як один з перспективних напрямів – застосування для кластеризації нейромереж.

Дослідження використання різних нейромереж дозволило зробити наступні висновки:

використання нейромереж Кохонена можливе для кластеризації, однак для цих нейромереж властиво обмеження лінійної подільності, яке не дозволяє формувати кластери зі складною (нелінійною) формою;

використання багат шарових нейромереж зворотного поширення похибки дозволяє більш ефективно розрізняти окремі об'єкти (ТКС);

перспективним для кластеризації інформації є використання нейромереж Хопфілда;

для ефективної обробки інформації (класифікації ТКС) можливо використати гібридну неймережу попередня обробка в якій здійснюється в нейромережі Хопфілда а остаточне визначення класу ТКС проводиться в шарі Кохонена.

З метою перевірки можливості проведення експертизи ТКС в умовах невизначеності з використанням методів штучного інтелекту було змодельовано багат шарову неймережу. Результати моделювання підтвердили можливість проведення експертизи ТКС на основі комплексного двоетапного підходу з обчисленням нечітко визначених показників і подальшою класифікацією ТКС неймережею.



## ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні представлено теоретико-експериментальне обґрунтування науково-методичного забезпечення проведення експертизи телекомунікаційних систем спеціального призначення в умовах невизначеності.

1. Результати аналізу сучасних науково-технічних досліджень показали, що характерним для сучасного етапу створення ТКС СП є відставання методик, методів і способів експертизи від темпів розвитку ТКС. Наявні підходи до проведення експертиз телекомунікаційних систем, зокрема спеціального призначення, не враховують умов невизначеності. Неврахування об'єктивно існуючої невизначеності вхідних даних в ході експертизи сучасних звичайно складних телекомунікаційних систем приводить до значного спотворення її результатів. Все це визначило актуальність розробки концепції експертизи телекомунікаційних проектів в умовах існування невизначеності (нечіткості) вихідних даних для її проведення та забезпечення необхідного рівня функціонування телекомунікаційної системи спеціального призначення.

2. З метою підвищення достовірності експертизи ТКС з урахуванням невизначеності нечітких параметрів і показників її функціонування було розроблено методику урахування невизначеності вихідних даних при знаходженні експертних показників якості функціонування ТКС. Наукова новизна запропонованої методики полягає у забезпеченні врахування фізичної невизначеності, яка має місце при експертизі ТКС, що в свою чергу дає можливість оперувати кількісними та якісними категоріями при визначенні експертних показників якості функціонування ТКС і забезпечити більшу достовірність та адекватність експертних рішень.

3. Для реалізації запропонованої методики урахування невизначеності вихідних даних в ході експертиз ТКС СП, були вдосконалені математичні моделі визначення показників якості функціонування ТКС. За основу було взято глобальну систему показників якості функціонування ТКС, яка складається з

локальних систем показників якості функціонування ТКС у відповідності до еталонної моделі взаємодії відкритих систем. Для оцінки якості функціонування ТКС вибраний фізичний, каналний та мережевий рівень еталонної моделі взаємодії відкритих систем. В традиційному підході не враховувалась можливість нечіткого визначення окремих параметрів. В роботі отримані вирази для обчислення сукупності всіх показників, які характеризують ТКС і враховують нечіткий характер вихідних даних. В якості основного інструменту для врахування невизначеності вибрані методи теорії нечітких множин, зокрема апарат нечітких чисел. Для проведення операцій над нечіткими числами використаний  $\alpha$  - рівневий принцип узагальнення. Розроблений математичний апарат дає можливість принципово по новому проводити експертизу ТКС СП враховуючи невизначеність.

З метою апаратної реалізації обчислення експертних показників якості функціонування ТКС з використанням нечітких вихідних даних розроблений пристрій на основі мікроконтролера АМТЕЛ АТmega16.

4. Вдосконалені математичні моделі показників якості функціонування ТКС дають можливість охарактеризувати ТКС СП. Однак для проведення експертизи необхідно за сукупністю значень нечітких показників сформулювати остаточну інтегральну експертну оцінку - віднести ТКС СП до певного класу систем. Для вирішення цього завдання була розроблена методика класифікації телекомунікаційних систем в умовах неповноти вихідної інформації на основі використання багатошарових нейромереж зворотного поширення похибки.

5. З метою визначення величини підвищення достовірності проведення експертизи ТКС з урахуванням умов невизначеності в порівнянні з використанням відомих методів було використано науково-методичний апарат теорії експертних оцінок. Результати дослідження з залученням експертів дозволяють зробити висновок, що застосування запропонованого двоетапного підходу до проведення експертизи ТКС з урахуванням невизначеності окремих параметрів покращує її достовірність на 18.3%.

6. В результаті дослідження середнього часу, який витрачається на проведення експертизи з використанням розробленої методики та з застосуванням відомих підходів було визначено, що оперативність проведення експертизи зросла на 13,6%. Це обумовлюється чітким алгоритмічним визначенням порядку проведення експертизи та апаратною реалізацією обчислення нечітких показників у спеціально розробленому пристрої.

7. В порівнянні з відомими, запропонована методика експертизи ТКС враховує практично всі вихідні дані, які характеризують функціонування ТКС відповідно до моделі взаємодії відкритих систем, в тому числі і ті, які не можливо або не раціонально визначити у чіткому вигляді. У зв'язку з цим, за повнотою врахування вихідних даних розроблена методика в 1,3-1,47 разів випереджає аналоги.

З метою перевірки достовірності розроблена методика була використана для експертизи ТКС СП органу охорони кордону ДПСУ з завчасно відомою оцінкою якості функціонування. Отримані результати експертизи співпали з попередньо відомою оцінкою, що підтвердило можливість проведення експертизи ТКС СП на основі комплексного двоетапного підходу з обчисленням нечітко визначених показників і подальшою класифікацією ТКС СП багатосаровою нейромережею.

## **ДОДАТКИ**

Додаток А  
Текст програми „Нечіткі розрахунки”

```

unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, formula, ExtCtrls, TeeProcs, TeEngine, Chart, Series;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    Memo1: TMemo;
    OpenDialog1: TOpenDialog;
    Chart1: TChart;
    Button2: TButton;
    Chart2: TChart;
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form1: TForm1;

implementation

{$R *.dfm}

type TPnt = record
  a,b:real;
end;

TMas = array[1..1000] of TPnt;

TNData = class(TObject)
  formula:string;
  NVar,NSloj:integer;

```

```

    Sloj: array[1..100] of TMas;
    alpha:array[1..100] of real;
    RSloj: array[1..100] of TPnt;
    constructor Create;
public
    procedure ReadFile(FN:String);
    procedure Show;
    procedure Podbor(SL:integer);
//    function My(X:array of real):real;
end;

constructor TNData.Create;
begin
    inherited Create;
    NVar:=0;
    NSloj:=0;
    formula:='1';
end;

{
function TNData.My(X: array of real): real;
var i:integer;
    S:real;
begin
//
    S:=0;
    for i:=0 to NVar-1 do S:=S+X[i];
    Result:=S;
end;
}

procedure TNData.Podbor(SL:integer);
var i,j,l:longint;
    g:integer;
    ar:array[1..1000] of real;
    Y,Min,Max:real;
    frm:TFormula;
begin
//
    frm.init(formula);
    g:=round(exp(2*ln(NVar)))-1;
    for i:=1 to NVar do ar[i]:=Sloj[SL,i].a;
    for l:=1 to NVar do frm.setdifferent(l,ar[l]);
    Min:=frm.reslt;
    Max:=Min;

```

```

for i:=1 to g do
begin
for j:=1 to NVar do
begin
if ((i and (1 shl (j-1))) = 0 then ar[j]:=Sloj[SL,j].a else ar[j]:=Sloj[SL,j].b;
end;
for l:=1 to NVar do frm.setdifferent(l,ar[l]);
Y:=frm.reslt;
if Y > Max then Max:=Y;
if (Y>=0) and (Y < Min) then Min:=Y;
end;
Rsloj[SL].a:=Min;
Rsloj[SL].b:=Max;
end;
end;

```

```

procedure TNData.ReadFile(FN: String);
var t:text;
s,s1,s2,sa,sb:string;
a,b,i,j,ln:integer;
begin
//
AssignFile(t,FN);
reset(t);
NVar:=0;
NSloj:=0;
readln(t,formula);
while not EOF(t) do
begin
readln(t,s);
ln:=Length(S);
if Pos('Sloj',S) <> 0 then
begin
inc(NSloj);
NVar:=0;
a:=Pos('alpha=',S);
i:=a;
while (i<ln) and (s[i]<>' ') do inc(i);
sa:=Copy(S,a+6,i-a-1);
alpha[NSloj]:=StrToFloat(sa);
end else
begin
a:=Pos('a=',S);
b:=Pos('b=',S);
if (a>0) and (b>0) then
begin

```

```

    i:=a;
    j:=b;
    while (i<ln) and (s[i]<>' ') do inc(i);
    while (j<ln) and (s[j]<>' ') do inc(j);
    sa:=Copy(S,a+2,i-a-2);
    sb:=Copy(S,b+2,j-b-1);
    //Form1.Memo1.Lines.Add(IntToStr(a)+'--'+sa+'--'+IntToStr(b)+'--'+Inttostr(j-
b-1)+'--'+sb);
    inc(NVar);
    Sloj[NSloj,NVar].a:=StrToFloat(sa);
    Sloj[NSloj,NVar].b:=StrToFloat(sb);
    end;
  end;
end;
close(t);
end;

```

```

procedure TNData.Show;
var i,j:integer;
begin
  //
  Form1.Memo1.Lines.Add('NVar = '+IntToStr(NVar));
  Form1.Memo1.Lines.Add('NSloj = '+IntToStr(NSloj));
  for i:=1 to NSloj do
    begin
      Form1.Memo1.Lines.Add('Sloj = '+IntToStr(i)+' alpha = '+FloatToStr(alpha[i]));
      for j:=1 to NVar do
        begin
          Form1.Memo1.Lines.Add('a = '+FloatToStr(Sloj[i,j].a)+' b=
'+FloatToStr(Sloj[i,j].b));
        end;
      end;
      for i:=1 to NSloj do Form1.Memo1.Lines.Add('Ra = '+FloatToStr(RSloj[i].a)+' Rb=
'+FloatToStr(RSloj[i].b));
    end;
  end;

```

```

var MyNData:TNData;

```

```

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  MyNData:=TNData.Create;
end;

```

```

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var i:integer;

```



```

begin
  if OpenFileDialog1.Execute then MyNData.ReadFile(OpenDialog1.FileName);
  // MyNData.ReadFile('1.txt');
  for i:=1 to MyNData.NSloj do MyNData.Podbor(i);
  MyNData.Show;
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
var i,j,v:integer;
    y:real;
    mas:array[1..100,1..2] of real;
    ser:TLineSeries;
begin
  { j:=0;
  for i:=1 to MyNData.NSloj do
  begin
    y:=MyNData.alpha[i];
    inc(j);
    mas[j,1]:=MyNData.RSloj[i].a;
    mas[j,2]:=y;
  end;
  for i:=MyNData.NSloj downto 1 do
  begin
    y:=MyNData.alpha[i];
    inc(j);
    mas[j,1]:=MyNData.RSloj[i].b;
    mas[j,2]:=y;
  end;    }

  //ser:=TChartSeries.Create(nil);
  // ser.FillSampleValues(10);
  // chart1.AddSeries(ser);
  {chart1.Series[0].Clear;
  for i:=1 to j do
  begin
    Chart1.Series[0].AddXY(mas[i,1],mas[i,2],"clTeeColor);
  end;  }
  // ser.Style:=0;
  // ser.FillSampleValues(20);
  {ser.AddXY(0,0,"clTeeColor);
  ser.AddXY(1,1,"clTeeColor);
  ser.AddXY(20,4,"clTeeColor);
  ser.AddXY(30,1,"clTeeColor);
  ser.AddXY(40,0,"clTeeColor);}
  Chart2.FreeAllSeries;

```

```
Chart1.FreeAllSeries;

for v:=1 to MyNData.NVar do
begin
  ser:=TLineSeries.Create(Owner);
  ser.SeriesColor:=clBlue;
  for i:=1 to MyNData.NSloj do
  begin
    ser.AddXY(MyNData.Sloj[i,v].a,MyNData.alpha[i],"clTeeColor);
  end;
  for i:=MyNData.NSloj downto 1 do
  begin
    ser.AddXY(MyNData.Sloj[i,v].b,MyNData.alpha[i],"clTeeColor);
  end;
  Chart2.AddSeries(ser);
end;

ser:=TLineSeries.Create(Owner);
ser.SeriesColor:=clRed;
for i:=1 to MyNData.NSloj do
begin
  ser.AddXY(MyNData.RSloj[i].a,MyNData.alpha[i],"clTeeColor);
end;
for i:=MyNData.NSloj downto 1 do
begin
  ser.AddXY(MyNData.RSloj[i].b,MyNData.alpha[i],"clTeeColor);
end;

Chart1.AddSeries(ser);

end;

end.
```

## Додаток Б.

Результати розрахунків показників якості функціонування ТКС СП з урахуванням нечіткого характеру вихідних даних

Таблиця Б.1

## Вихідні дані для розрахунків

Найменування показника	Найменування часткового показника	Найменування вихідних даних для знаходження показника	Максимально можливий інтервал	Найбільш ймовірний інтервал
Продуктивність фізичного рівня ТКС (S1.1)	Пропускна спроможність (S1.1.1)	нечітке значення полоси частот	1-109 МГц	1-21 МГц
		нечітка величина енергії, яка витрачається на передачу одного біту даних	300 пДж-600 пДж	320 пДж-480 пДж
		нечітка величина часу, який витрачається на передачу одного біту даних	3,75-7,5 нс	4-6 нс
		середня потужність шуму в полосі частот з нульовим математичним очікуванням і дисперсією	60,75 дБмкВ	60,75 дБмкВ
	Затримка передачі (S1.1.2)	максимальний інтервал часу між моментом надходження біта інформації на вхід з'єднання і моментом появи його на виході	0,24 с	0,24 с
нечітка величина варіації затримки передачі		0,01-0,09 с	0,045-0,067 с	
Стійкість ТКС на фізичному рівні (S1.2)	Завадозахищеність ТКС на фізичному рівні (S.1.2.1)	нечітка величина відношення сигнал/шум на вході приймача	23,2-4,7Дб	10,41-8,56 Дб
	Надійність фізичного з'єднання (S1.2.2)	кількість робочих елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних	4	4
		кількість резервних елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних	2	2
		кількість елементів, що безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних і одночасно відновлюють свою працездатність	3	3
		нечітка величина інтенсивності відмов елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних	$9,5 \cdot 10^{-8}$ - $1,17 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$ - $1,05 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$

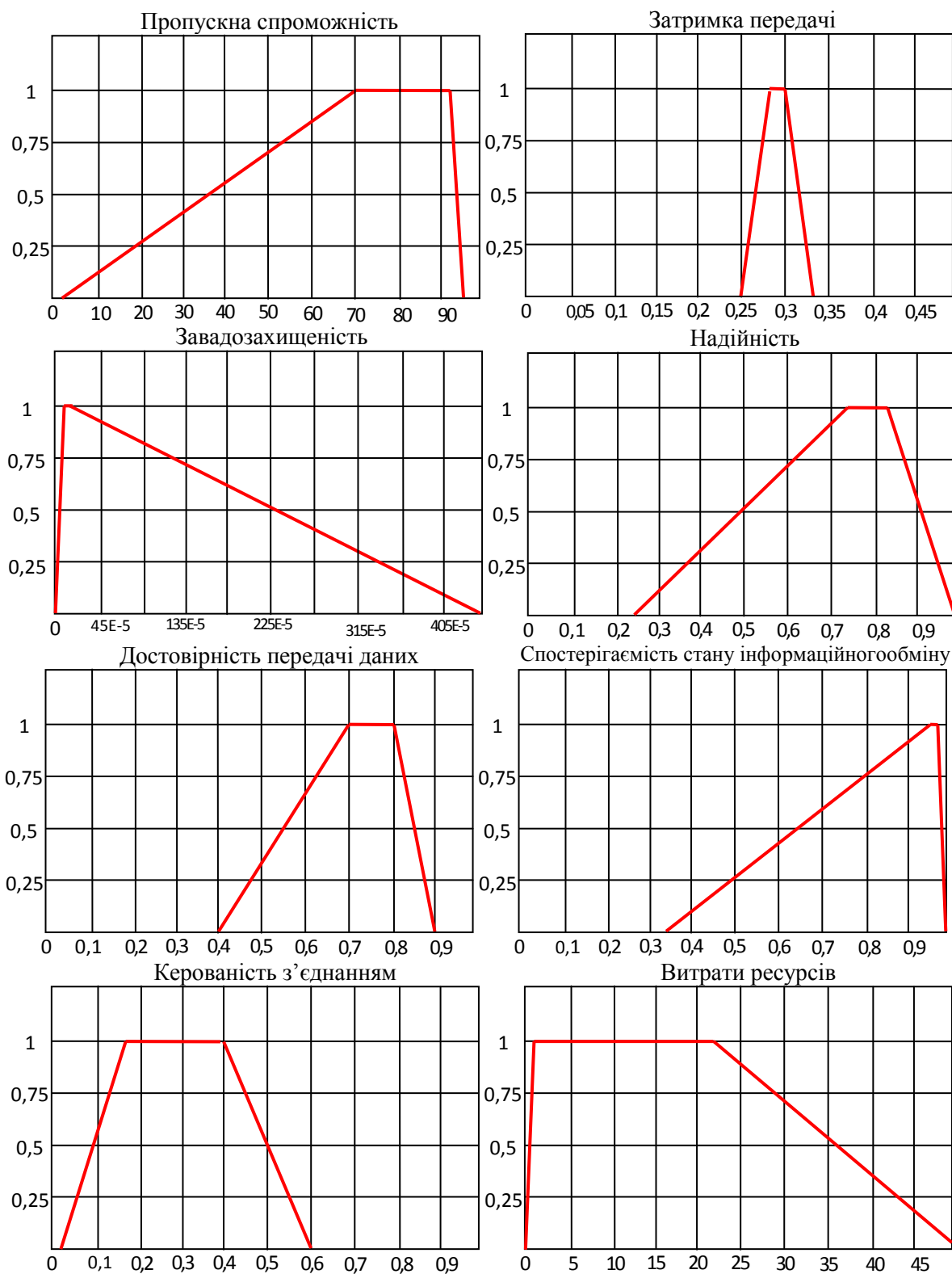
Найменування показника	Найменування часткового показника	Найменування вихідних даних для знаходження показника	Максимально можливий інтервал	Найбільш ймовірний інтервал
		нечітка величина інтенсивності відновлення елементів, які безпосередньо взаємодіють з засобами передачі даних	$9,5 \cdot 10^{-8}$ - $1,17 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$ - $8,5 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$
Достовірність передачі даних по фізичному з'єднанню (SI.3)		нечітка величина енергії одиничного та нульового сигналу	7,2 – 7,8 дБмкВ	7,43 -7,6 дБмкВ
		спектральна щільність потужності сигналу	-9,28 дВмкВ	-9,28 дВмкВ
		нечітка величина коефіцієнту кореляції одиничного та нульового сигналу	0,012-0,78	0,21 – 0,37
Спостерігаємість-керуваність фізичного рівня ТКС (SI.4)	Спостерігаємість стану інформаційного обміну на фізичному рівні ТКС (SI.4.1)	нечітка величина імовірності спостерігаємість значень внутрішнього стану фізичного з'єднання (продуктивності, стійкості, безпеки і т.д.)	0,12-0,95	0,75-0,85
		нечітка величина імовірності спостерігаємість параметрів середовища розповсюдження (коефіцієнт передачі середовища розповсюдження);	0,1-0,9	0,7-0,75
		нечітка величина імовірності спостерігаємість параметрів зовнішніх впливів	0,15-0,89	0,76-0,83
	Керуваність з'єднанням на фізичному рівні ТКС (SI.4.2)	нечітка величина відхилення оцінки $j$ -го елементу $i$ -го вектора показника якості інформаційного обміну через фізичне з'єднання	0,1 – 0,95	0,42 – 0,78
		ступінь важливості $i$ -го вектора показника якості	0,72	0,72
		нечітка величина імовірності застосування зловмисником $k$ -го варіанту протидії	0,1-0,95	0,67-0,75
		ступінь важливості $j$ -го елементу $i$ -го вектора показника якості	0,93	0,93
	Витрати ресурсів для організації фізичного з'єднання ТКС (SI.5)		потужність пристрою, який передає	100 мВт
нечітка величина активності фізичного з'єднання			3- 521	8-211

Таблиця Б.2

## Результати розрахунків показників якості функціонування ТКС

Найменування показника	Найменування часткового показника	Максимально можливий інтервал		Найбільш ймовірний інтервал	
		Нижня оцінка	Верхня оцінка	Нижня оцінка	Верхня оцінка
Продуктивність фізичного рівня ТКС (S1.1)	Пропускна спроможність (S1.1.1)	2,92 Мбіт/с	96,92 Мбіт/с	69,08 Мбіт/с	91,88 Мбіт/с
	Затримка передачі (S1.1.2)	0,25 с	0,33 с	0,285 с	0,307 с
Стійкість ТКС на фізичному рівні (S1.2)	Завадозахищеність ТКС на фізичному рівні (S1.2.1)	$4,2 \cdot 10^{-11}$	0,0045	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$9,58 \cdot 10^{-5}$
	Надійність фізичного з'єднання (S1.2.2)	0,212	0,989	0,756	0,812
Достовірність передачі даних по фізичному з'єднанню (S1.3)		0,413	0,911	0,71	0,804
Спостерігаємість-керуваність фізичного рівня ТКС (S1.4)	Спостерігаємість стану інформаційного обміну на фізичному рівні ТКС (S1.4.1)	0,3268	0,9994	0,982	0,9936
	Керуваність з'єднанням на фізичному рівні ТКС (S1.4.2)	0,0066	0,604	0,188	0,391
Витрати ресурсів для організації фізичного з'єднання ТКС (S1.5)		0,3	52,1	0,8	21,1

Графічна інтерпретація показників якості функціонування ТКС з урахуванням нечіткого характеру вихідних даних



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України «Про телекомунікації» від 18.11.2003 № 1280-IV.
2. Закон України «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах». *Введений в дію Постановою ВР N 81/94-ВР від 05.07.94, ВВР, 1994, N 31, ст.287.*
3. *Вишне夫斯基 В.М.* Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
4. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей. Под ред. *В.Н. Гордиенко и А.Д. Крухмалева.* – М.: Горячая линия - Телеком, 2004. – 510с.
5. *Советов Б.Я., Яковлев С.А.* Построение сетей интегрального обслуживания. – Л.: Машиностроение, 1990. – 332 с.
6. *Терентьев В.М.* Методика обоснования требований к показателям качества автоматизированных сетей многоканальной радиосвязи. - Л.: ВАС, 1990. - 78 с.
7. *Частиков А.П., Гаврилова Т.А., Белов Д.Л.* Разработка экспертных систем, среда CLIPS. - С-Пб.: БХВ-Петербург, 2003. - 608 с.
8. Методика експертизи телекомунікаційних систем в умовах невизначеності. Звіт про НДР / НАДПСУ. Шифр 210-0018 А – Хмельницький, 2010. – 74 с.
9. Методика проведення експертизи телекомунікаційної мережі : звіт про НДР / НАДПСУ, № 210-0018 І. – Хмельницький, 2010. – 98 с.
10. *Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В.* Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. – М.: Радио и связь, 1989. – 632 с.
11. *Загоруйко Н.Г.* Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск, 1999. - 434 с.
12. *Гольштейн А.Б., Ехриель И.М., Рерле Р.Д.* Интеллектуальные сети. – М.: Радио и связь, 2000. – 500 с.
13. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – С-Пб.: Питер, 2001. – 672 с.

14. *Терентьев В.М., Паращук И.Б.* Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи. - СПб.: ВАС, 1995. - 195 с.
15. Большой энциклопедический словарь. – Москва: Научное издательство «Большая Российская Энциклопедия», 1998. – 1340 с.
16. Про Концепцію розвитку Державної прикордонної служби України на період до 2015 року // Офіційний вісник України від 05.07.2006 – 2006 р. – № 25. – С. 14. – (Указ Президента України від 19.06.2007 №546/2006).
17. *Ирвин Д., Харль Д.* Передача данных в сетях: инженерный подход. Серия "Учебное пособие". - СПб.: ВHV-Санкт-Петербург, 2003 - 448 с.
18. *Цициашвили Г.Ш.* Декомпозиционные методы в задачах устойчивости и эффективности сложных систем. - ДВО АН СССР, 1989. - 116 с.
19. *Періг В.М.* Побудова дерева нечіткого висновку для експертизи телекомунікаційних систем. Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Освітньо - наукове забезпечення діяльності правоохоронних органів і військових формувань України» – Хмельницький: Видавництво Національної академії ДПСУ, 2010. – С. 110-114.
20. *Катеринчук І. С., Періг В.М.* Концептуальні засади експертизи телекомунікаційних систем. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка № 28 / головний редактор Ленков С. В. – Київ : Видавництво ВІКНУ, 2010. – С. 76-78.
21. *Ярушкіна Н.Г.* Основы теории нечетких и гибридных систем. - М.: Финансы и статистика, 2004. - 320 с.
22. Розробка методики моніторингу та діагностики стану телекомунікаційної мережі Держприкордонслужби : Звіт про НДР / НАДПСУ. Шифр 206–1001 I – Хмельницький, 2007. – 68 с.
23. *Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В.* Обработка нечеткой информации в системах принятия решений.– М: Радио и связь. 1989. – 304 с.
24. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств. – М.: Радио и связь, 1982 – 432с.
25. *Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М.* Чувствительность систем управления.



- М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 464с.

26. *Аленфельд Г., Херицбергер Ю.* Введение в интервальные вычисления. – М: Мир, 1987. – 360 с.

27. *Орловский С.А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М: Наука, 1981. – 203с.

28. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. *Д.А. Поспелова*. – М.: Наука, 1986. – 396 с.

29. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. – М: Мир, 1976. – 165 с.

30. *Поморова О. В.* Теоретичні основи, методи та засоби інтелектуального діагностування комп'ютерних систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.13 / О. В. Поморова; [Національний університет «Львівська політехніка»]. – Львів, 2007. – 29 с.

31. Проектирование и диагностика компьютерных систем и сетей / [М. Ф. Бондаренко, Г. Ф. Кривуля, В. Г. Рябцев и др.]. – К.: НМЦ ВО, 2000.–306 с.

32. *Короуз Дж., Росс К.* Компьютерные сети / Дж. Короуз, К. Росс. – [3-е изд.]. – СПб.: Питер, 2004. – 765 с.

33. *Сердюков П.Н., Химичев В.А., Шевцов И.Ф.* Цифровые системы передачи аудио- и видеоинформации. - М.: ГУ НПО «Специальная техника и связь», 2000. - 146 с.

34. *Тихонов В.И., Кульман Н.К.* Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов. - М.: Сов. радио, 1975. - 704 с.

35. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. - М.: Радио и связь, 1982. - 624 с.

36. *Соколов С. А.* Архитектура мультиагентной системы для решения задач мониторинга и анализа телекоммуникационной сети / С. А. Соколов, А. Л. Стокипный // Системи обробки інформації. Х.: Харківський університет Повітряних Сил. – 2005. – Вип. 8 (48). – С. 129–134.

37. *Таннебаум Э.* Компьютерные сети / Э. Таннебаум. – [4-е изд]. – СПб.: Питер, 2003.–992 с.
38. *Уилсон Э.* Мониторинг и анализ сетей. Методы выявления неисправностей / Э. Уилсон; пер. с англ. – М.: Лори, 2002. – 350 с.
39. *Ермаков А.А.* Основы надежности информационных систем : учеб. пособие / А. А. Ермаков – Иркутск: ИрГУПС, 2006. – 151 с.
40. *Черкесов Г. Н.* Надежность аппаратно–программных комплексов : учеб. пособие / Г. Н.Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
41. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення : ДСТУ 2389–94. – К. : Держстандарт України, 1994. – 24 с. – (Державний стандарт України)
42. *Литвак Б.Г.* Экспертная информация: методы получения и анализа. – М.: Радио и связь, 1982. –184 с.
43. *Липаев В. В.* Качество программного обеспечения. – М.: Финансы и статистика, 1983.– 263 с.
44. *Сейдж Э., Меле Дж.* Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. Пер. с англ. под ред. Б.Р. Левина. - М.: Связь, 1976. — 496 с.
45. *Соколов С. А.* Теоретическое обоснование комплексного показателя эффективности функционирования IP–сети / С. А. Соколов, А. Л. Стокипный // Системи управління, навігації та зв'язку. ЦНДІ Навігації та управління. – 2009. – Вип. 1(9). – С. 178 – 182.
46. *Уотермен Д.* Руководство по экспертным системам / Д.Уотермен; : пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 388 с.
47. *Соколов С.А.* Диагностическая модель для задач выявления закономерностей функционирования компонентов корпоративной IP–сети / С. А. Соколов, А. Л. Стокипный // Восточно–европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Вып. 4/8 (41). – С. 4–8
48. *Хаханов В. И.* Техническая диагностика элементов и узлов персональных компьютеров / В. И. Хаханов. – К.: ІЗМН, 1997. – 308 с.

49. *Бабич А. В.* Методы поиска неисправностей в локальных вычислительных сетях и их сегментах : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.13 / А. В. Бабич. – Х., 2007. – 188 с.

50. *Шалаев М. П.* Динамический анализ и диагностика состояния IP–сети [Электронный ресурс] : дис. ... канд. техн. наук / М.П.Шалаев. – М.: РГБ, 2005 (Из фондов Российской Государственной библиотеки). – Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/05/0616/050616043.pdf>.

51. *Тартаковский А.Г.* Последовательные методы в теории информационных систем. - М.: Радио и связь, Вып. 33, 1991. - 280 с.

52. *Щербаков А. Ю.* Современная компьютерная безопасность. Теоретические основы. Практические аспекты. — М.: Книжный мир, 2009. — 352 с.

53. *Петренко С. А.* Управление информационными рисками. М.: Компания АйТи; ДМК Пресс, 2004. — 384 с.

54. *Шаньгин В. Ф.* Защита компьютерной информации. Эффективные методы и средства. М.: ДМК Пресс, 2008. — 544 с.

55. Словарь по кибернетике / [под ред. Михалевича]. – К.: Гл. ред. УСЭ им. М. П. Бажана, 1989.–751 с.

56. *Кучер А.В.* Динамический анализ и диагностика состояния IP–сети [Электронный ресурс] : дис. ... канд. техн. наук / А.В.Кучер. – М.: РГБ, 2007 (Из фондов Российской Государственной библиотеки). – Режим доступа: [http://diss.rsl.ru/diss/05/0616/050616043 .pdf](http://diss.rsl.ru/diss/05/0616/050616043.pdf)

57. *Игнатов В. А.* Теория информации и передачи сигналов. – М.: Радио и связь, 1991. – 217 с.

58. *Сашин С. В.* Диагностика сети абонентского доступа с использованием информационных технологий [Электронный ресурс] : дис. ... канд. техн. наук / С.В.Сашин. – М.: РГБ, 2005 (Из фондов Российской Государственной библиотеки). – Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/05/0464/050464041.pdf>.

59. *Тартаковский А.Г.* Последовательные методы в теории информационных систем. - М.: Радио и связь, Вып. 33, 1991. - 280 с.

60. *Паркер Т.* ТСП/Р. Для профессионалов / Т. Паркер, К. Сиян; перевод с англ. – [3-е изд.]. – СПб.: Питер, 2004. – 859 с.
61. *Стратанович Р. Л.* Теория информации. – М.: Советское радио, 1975. – 423 с.
62. *Чисар И., Кернер Я.*, Теория информации. – М.: Мир, 1985. – 317 с.
63. *Гольштейн А.Б., Гольштейн Б.С.* Технология и протоколы MPLS. – С-Пб.: БХВ - Петербург, 2003. – 304 с.
64. *Шапиро Д.И.* Принятие решений в системах организационного управления: Использование расплывчатых категорий. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 184 с.
65. *Гермер Ю. Б.* Введение в теорию исследования операций. – М.: Наука, 1971. – 324 с.
66. *Вентцель Е. С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 208 с.
67. *Мартынов В.И.* Математические основы управления сетями связи с использованием нечётко заданных параметров. - М.: Эльф-М, 1997. - 48 с.
68. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения: Пер. с англ. / Под ред. Р.Р. Ягера. - М.: Радио и связь, 1986. - 408 с.
69. *Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. – С-Пб.: Питер, 2000. – 382 с.
70. *Борисов А. Н., Клумберг О. А., Федоров И. П.* Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования. – Рига: Знание, 1990. – 184 с.
71. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. – М.: Сов. Радио, 1972. – 551 с.
72. *Рыжиков Ю.И.* Имитационное моделирование. Теория и технологии. - С-Пб.: КОРОНА принт; М.: Альтекс-А, 2000. - 384 с.
73. *Питерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем. - М.: Мир, 1984. - 264 с.
74. *Сейдж Э., Уайт Ч.* Оптимальное управление системами / Пер. с

англ. под ред. Б.Р. Левина. - М.: Радио и связь, 1982. - 392 с.

75. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. - М.: Мир, 1992. - 240 с.

76. Щербаков М.А. Искусственные нейронные сети. - Пенза: ПГТУ, 1996. - 44 с.

77. Люггер Джордж Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Под ред. Н.Н.Куссуль; пер. с англ. – [4-е изд.]. – М.: Изд. дом «Вильяме», 2003. – 864 с.

78. Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. «Кластерный анализ» / «Факторный, дискриминантный и кластерный анализ»: пер. с англ.; Под. ред. И. С. Енюкова. – М.: «Финансы и статистика», 1989–215 с.

79. Періг В.М. Концептуальні засади експертизи телекомунікаційних систем / І.С.Катеринчук, В.М. Періг // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка № 28 / головний редактор Ленков С. В. – Київ : Видавництво ВІКНУ, 2010. – С. 76-78.

80. Періг В.М. Підходи до кластерного аналізу інформаційно-телекомунікаційних систем / "Комп'ютерні технології друкарства" / В.М. Періг // Збірник наукових праць № 26, – Львів : видавництво Української академії друкарства, 2011. – с. 79-82

81. Періг В.М. Використання нейромереж в кластерному аналізі інформаційно-телекомунікаційних систем / "Комп'ютерні технології друкарства" / В.М. Періг // Збірник наукових праць № 27, – Львів : видавництво Української академії друкарства, 2012. – с. 81-87.

82. Періг В.М. Урахування нечітко заданих параметрів в нейромережевій експертизі інформаційно-телекомунікаційних систем / В.М. Періг // Вісник Житомирського державного технічного університету / Технічні науки, № 4(59). – Житомир : Вид-во ЖДТУ, 2011. – с.

83. Періг В.М. Методика урахування невизначеності вихідних даних при знаходженні експертних показників якості функціонування телекомунікацій-

них систем / І.С.Катеринчук, В.М. Періг // Наукоємні технології. – К : Вид-во Національного авіаційного університету, 2012. – Вип. 1. – С. 84-88.

84. Періг В.М. Методика експертизи телекомунікаційних систем в умовах невизначеності / І.С.Катеринчук, В.М. Періг // Захист інформації. – К : Вид-во Національного авіаційного університету, 2011. – Вип. 4. – С. 25-28.

85. Періг В.М. Удосконалення аналітичних залежностей показників якості функціонування телекомунікаційних систем з урахуванням умов невизначеності / І.С.Катеринчук, В.М. Періг // Збірник наукових праць. – Хмельницький : Вид-во НАДПСУ, 2012. – № 57. – С. 75-79.

87. Періг В.М. Експертиза телекомунікаційних систем в умовах невизначеності з використанням методів штучного інтелекту : Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Військова освіта та наука: сьогодення та майбутнє», 24-25 листопада 2011 р. Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ : Видавництво ВІКНУ, 2011. – С. 66-67.

88. Періг В.М. Процедури проведення експертизи телекомунікаційних систем в умовах невизначеності / В.М. Періг // Moderní vymoženosti vědy – 2011: VIII mezinárodní vědecko - praktická konference (Praha, 27 ledna - 05 února 2012 r.) - Praha: Publishing House «Education and Science», 2012. - Díl 26. – P. 49-52.

89. Періг В.М. Підходи урахування невизначеності при розрахунку експертних показників якості функціонування телекомунікаційних систем / В.М. Періг // Strategiczne pytania światowej nauki - 2012: VIII międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji (Przemys, 07-15 lutego 2012 r.) - Przemysl: Nauka i studi, 2012. - Vol.29. - P.75-79.

90. Методика визначення раціонального складу необхідних компонентів інформаційно-телекомунікаційних систем : звіт про НДР / НАДПСУ, № 212-0003 І. – Хмельницький, 2012. – 72.

91. Методика оцінки ефективності телекомунікаційної системи : звіт про НДР / НАДПСУ, № 210-0020 І. – Хмельницький, 2010. – 131 с.

92. Методика оцінювання параметрів ІТС Державної прикордонної служби України : звіт про НДР / НАДПСУ, № 209-1007 І. – Хмельницький, 2009. – 124 с.
94. *Дюран Б., Оделл П.* Кластерный анализ. - М.: Статистика, - 1977, - 128 с.
95. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер с англ. / Дж. - О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др.; Под ред. *И.С.Енюкова.* – М. : Финансы и статистика, 1989. - 215с.
96. *Жамбю М.* Иерархический кластер-анализ и соответствия: Пер. с фр. М.: Финансы и статистика, 1988. - 342с.
97. *Мандель И. Д.* Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 313 с.
98. Kohonen, T. (1988), Learning Vector Quantization, Neural Networks, 1 (suppl 1), 303.
99. *Уоссермен, Ф.* Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика = Neural Computing. Theory and Practice. – М.: Мир, 1993. – 240 с.
100. *Миркес, Е.М.* Нейроинформатика: Учеб. пособие для студентов / Е.М. Миркес. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002, 347 с.
101. *Хокинс Джеф, Блейкли Сандра,* Об интеллекте: Пер. с англ. –М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 240 с.
102. *Уидроу Б., Стирнс С.,* Адаптивная обработка сигналов. — М.: Радио и связь, 1989. — 440 с.
103. *Галушкин А. И.* Синтез многослойных систем распознавания образов. — М.: «Энергия», 1974. – 371 с.
104. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. - М.: Горячая линия -Телеком, 2006. - 452 с.
105. *Горбань А.Н.* Обучение нейронных сетей. - М.: СП «ParaGraph», 1990. - 160 с.

106. *Галушкин А.И.* Теория нейронных сетей. Кн.1: Учеб. пособие для вузов / Общая ред. А.И. Галушкина. - М.: ИПРЖР, 2000. - 416 с.

107. The EM algorithm // *The Elements of Statistical Learning*. — New York: Springer, 2001. — P. 236–243.

108. Искусственный интеллект. Применение в интегрированных производственных системах. Под ред. *Э.Кьюсиака*. - М.: Машиностроение, 1991. – 289 с.

109. *Стюарт Рассел, Питер Норвиг*, «Искусственный интеллект: современный подход (AIMA)», 2-е издание.: Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1424 с.

110. *Любарский Ю.Я.* Интеллектуальные информационные системы. - М.: Наука, 1990. – 234 с.

111. *Кормен Т. Х.* Алгоритмы: построение и анализ, 2-е издание / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лайзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – С. 840–841.

112. *Левин Р., Дранг Д., Эдельсон Б.* Практическое введение в технологию искусственного интеллекта и экспертных систем с иллюстрациями на Бейсике. - М.: Финансы и статистика, 1990. – 375 с.