

С. Ш. Кацив, Б. І. Мокін

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ
ДЕТЕРМІНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ
В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

С. Ш. Кацев, Б. І. Мокін

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ
ДЕТЕРМІНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ
В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

МОНОГРАФІЯ

**УНІВЕРСУМ - Вінниця
2005**

УДК 519.876.5:621.311

К30

Рецензенти:

Доктор технічних наук, професор **В. М. Лисогор**

Доктор технічних наук, професор **Б. С. Рогальський**

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 30.06.2005 р.)

Каців С. Ш., Мокін Б. І.

К 30 Математичні моделі детермінізації процесів в системах електропостачання. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 114 с. Іл.: 34. Бібл.: 79 назв.

ISBN 966-641-150-4

В монографії висвітлені нові підходи в математичному моделюванні задач відтворення параметрів режимів електромереж в умовах недостатньої кількості телевимірів. Визначені умови розв'язання таких задач. Завдяки використанню в просторі комплексних електротехнічних параметрів лінійної неевклідової метрики зменшена невизначеність вхідних даних таких задач. В теорію нечітких множин введено нетрадиційний клас слабких операцій та принципів узагальнення. Розроблені моделі та алгоритми евристичної та нечіткої квазидетермінізації.

Монографія розрахована на науковців та інженерів.

УДК 519.876.5:621.311

ISBN 966-641-150-4

© С. Каців, Б. Мокін

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ ВІДТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ	8
РОЗДІЛ 2. ВІДТВОРЕННЯ СТАНУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ НЕПОВНОТИ ВХІДНИХ ДАНИХ....	17
2.1. Складні системи – основні положення та ідентифікація	17
2.2. Детермінізація процесів в складних системах	20
2.3. Визначення загальних умов, за якими можливе відтворення стану складних технічних систем.....	24
2.4. Дослідження умов відтворення стану систем з лінійними та лінеаризованими функціональними зв'язками.....	27
2.5. Визначення умов відтворення стану систем з лінійними та лінеаризованими функціональними зв'язками без попередніх обчислень на мові теорії графів.....	29
РОЗДІЛ 3. ДЕТЕРМІНІЗАЦІЯ ПРОСТОРУ КОМПЛЕКСНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА РАХУНОК ЧАСТКОВОГО ВИКОРИСТАННЯ ЛІНІЙНОЇ НЕЕВКЛІДОВОЇ МЕТРИКИ....	37
3.1. Особливості проблеми неповноти вхідних даних при детермінізації режимів електричних мереж.....	37
3.2. Спосіб детермінізації рівня невизначеності вхідних даних....	38
3.3. Оцінка меж використання отриманого способу детермінізації	43
РОЗДІЛ 4. НЕТРАДИЦІЙНІ ОПЕРАЦІЇ ТА ПРИНЦИПИ УЗАГАЛЬНЕННЯ В МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЯХ НЕЧІТКОЇ КВАЗІДЕТЕРМІНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ.....	46
4.1. Межі використання принципу узагальнення Заде. Про доцільність введення в теорію нечітких множин слабких операцій та слабких принципів узагальнення.....	46
4.2. Аксиоматика слабких операцій та слабких принципів узагальнення в теорії нечітких множин.....	49
4.3. Основні принципи побудови моделей нечіткої квазидетермінізації процесів в складних системах з використанням слабких принципів узагальнення.....	59

РОЗДІЛ 5. РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАДАЧ НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ ДЕТЕРМІНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ	61
5.1. Синтез алгоритмів розташування джерел інформації у вузлах електричної мережі з урахуванням умов неможливості відтворення режиму.	61
5.2. Розробка математичної моделі евристичної квазідетермінізації для розв'язання задачі відтворення режиму електричної мережі та її алгоритмізація... ..	71
5.3. Розробка математичної моделі нечіткої квазідетермінізації для розв'язання задачі відтворення режиму електричної мережі... ..	78
РОЗДІЛ 6. АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА ВІДТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ (АСВЕС)	81
6.1. Програмна реалізація задачі відтворення режиму електричної мережі	81
6.2. Підсистеми АСВЕС	83
6.2.1. Підсистема відтворення режиму мережі	83
6.2.2. Архів інтегральних показників електроспоживання та параметрів режиму підстанцій	85
6.2.3. База статичних даних зі спеціально розробленим редактором	85
6.2.4. База відповідностей зі спеціально розробленим редактором	89
6.2.5. База динамічних даних	90
6.2.6. Інтерфейс головного робочого місця (диспетчера)	90
6.2.7. Інтерфейс віддаленого робочого місця	102
6.3. Ефективність функціонування алгоритмів та програмного забезпечення АСВЕС	103
ВИСНОВКИ	107
ЛІТЕРАТУРА.....	109

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСВЕС – аналітична система відтворення електроспоживання

БНВ – бінарне нечітке відношення

ІВС – інформаційно-вимірювальна система

КА – комутаційний апарат

ММПУ – максимінний принцип узагальнення

ОІК – оперативно-інформаційний комплекс

ПЗЕС – Південно-Західна енергосистема

ТС – телесигналізація

ВСТУП

В умовах розвитку ринкових відносин в електроенергетиці України однією із першочергових задач є забезпечення безперервного точного контролю електроспоживання на рівні диспетчерських служб підприємств електромереж.

Успішне вирішення задачі поточного диспетчерського контролю електроспоживання є необхідною умовою проведення дієвої політики енергозбереження, раціонального керування електроспоживанням, контролю виконання графіків обмежень електроспоживання тощо. Вирішення цієї задачі дозволить виявити вузли мережі з позаобліковим електроспоживанням, що забезпечить зменшення комерційних втрат електроенергії, тобто позаоблікового електроспоживання.

Традиційний шлях вирішення вищезгаданих задач потребує оснащення телеметричними джерелами інформації переважної більшості трансформаторних підстанцій електромережі. Це означає, що на кожній із цих підстанцій кожне приєднання 110-35-10-6 кВ повинно бути обладнано сенсорами телесигналізації, напруги і потужності, кожна підстанція повинна мати апаратуру прийому, обробки та передачі телеметричної інформації, а також надійний канал зв'язку з оперативно-диспетчерською службою підприємства електромереж.

Однак сьогодні у вітчизняних мережах телевимірюваннями охоплено незначну частину підстанцій, тому реалізація апаратного шляху досягнення повного диспетчерського контролю за електроспоживанням вимагатиме багатьох років роботи і значних додаткових капіталовкладень.

В існуючих оперативно-інформаційних комплексах (ОІК), як альтернативу відсутнім телевимірам, часто використовують введені оператором параметри електроспоживання, що базуються на попередніх статистичних даних. Але, зважаючи на те, що принципово неможливо підібрати вручну параметри режиму так, щоб вони в кожний момент часу були сумісні за законами Кірхгофа з параметрами, що безперервно змінюються, отриманими в результаті телевимірів, приходимо до висновку, що застосування ручних введень параметрів електроспоживання не може бути повноцінною альтернативою відсутнім телевимірам.

Очевидно, що найдоцільнішою альтернативою відсутнім телевимірам є відтворення параметрів електроспоживання в усіх вузлах мережі, у яких відсутні телевиміри, у темпі процесів, що протікають у цих вузлах, за допомогою математичних моделей. Дослідженню відо-

мих та розробці нових математичних моделей, які дозволяють розв'язувати подібні задачі, присвячена ця монографія.

В першому розділі наводяться системи відтворення параметрів електроспоживання мережі, що розроблені іншими авторами, і аналізуються їх переваги та недоліки.

В другому розділі розглядається новий авторський підхід в математичному моделюванні, за яким задача відтворення режиму електричної мережі сформульована та розв'язується як загальна задача детермінізації процесів в складних системах. При цьому визначені умови відтворення стану систем з лінійними та лінеаризованими функціональними зв'язками за допомогою теореми, яка дозволяє це зробити за допомогою звичайного топологічного аналізу графу системи без попередніх обчислень.

В третьому розділі представлено новий метод зменшення невизначеності вхідних даних в задачі відтворення параметрів електроспоживання, для чого в просторі комплексних електротехнічних параметрів вводиться лінійна неевклідова метрика.

В четвертому розділі запропоновано новий нетрадиційний клас операцій та принципів узагальнення в теорії нечітких множин та розроблена його аксіоматика.

В п'ятому розділі розглянуті математичні моделі та алгоритми відтворення параметрів електроспоживання.

В шостому розділі дається короткий опис програмного комплексу "Аналітична Система Відтворення Електроспоживання" (АСВЕС), який є програмною реалізацією розроблених математичних моделей та алгоритмів.

Текст монографії написаний С.Ш. Кацевом за матеріалами його кандидатської дисертації, виконаної під керівництвом професора Б.І. Мокіна.

Б.І. Мокіним здійснено також і загальне редагування монографії.

Автори вважають своїм приємним обов'язком висловити слова подяки старшому викладачу ВНТУ В.В.Камінському, в плідних дискусіях з яким викристалізовувалась значна кількість результатів, викладених у монографії.

РОЗДІЛ 1

СИСТЕМИ ВІДТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

Як вже було сказано у вступі, задача поточного диспетчерського контролю електроспоживання є дуже актуальною і важливістю її вирішення для електроенергетики України і більшості інших країн СНД важко переоцінити.

Реалізація традиційного шляху досягнення повного диспетчерського контролю за електроспоживанням вимагає багатьох років роботи і значних додаткових капіталовкладень, тому, цілком зрозуміло, що розробники операційно-інформаційних комплексів (ОІК) завжди намагалися хоча б частково розраховувати відсутні параметри режиму у вузлах мережі без телевимірювань. Спочатку ці розрахунки базувалися на застосуванні жорстко заданих формул, заснованих на законах Кірхгофа. Цей спосіб мав такі основні вади:

- Не було можливості визначення невідомих параметрів режиму в усіх вузлах мережі без телевимірювань.
- При зміні стану комутаційних апаратів мережі жорстко задані формули, прив'язані до конкретної схеми мережі, ставали непридатними.
- Не враховувалися повні схеми заміщення всіх гілок схеми мережі, що теж призводило до істотної похибки розрахунку параметрів електроспоживання.

Паралельно із спрощеними методами контролю електроспоживання в багатьох наукових працях розроблялися математичні моделі і методи відтворення режимів електричних мереж, які вже були вільні від вищезгаданих недоліків [1, 2, 5, 6, 10-13, 15, 27-29, 54].

Є підстави вважати, що вперше задача визначення параметрів режиму за даними телевимірювань була поставлена та у першому наближенні розв'язана у Франції в 1966 р. при створенні системи диспетчерського керування енергосистемою “Електрисите де Франс” [10]. В якості координат у задачі виступають потужності по лініях електропередач і напруги у вузлах мережі. У цій роботі були запропоновані і числові алгоритми розв'язання задачі.

Подальші наукові дослідження значної кількості науковців у різних країнах були спрямовані на розробку методів оцінювання стану енергосистем. Теоретичну базу, на якій розвивалися методи оцінювання стану, склали теорія оптимізації режимів електроенергетичних систем, головним чином методи розрахунку сталих режимів, статистична теорія оцінювання і теорія керування. З методами розрахунку електроенергетичних систем методи оцінювання зв'язує насамперед

спільність математичного опису електроенергетичної системи. Це дозволило в задачах оцінювання використовувати багатий арсенал розроблених раніше методів і прийомів, що враховують специфіку електроенергетичної системи, для збільшення ефективності алгоритмів.

Водночас теорія оцінювання стану електроенергетичних систем мала справу з випадковою вихідною інформацією і тому вимагала застосування специфічного статистичного апарату теорії оцінок. Виникали тут і специфічні задачі (наприклад, дослідження статистичних властивостей оцінок, зв'язок із режимом надходження даних і т.і.), що не досліджувалися при оптимізації режимів.

Зв'язок задачі оцінювання стану електроенергетичної системи із теорією керування особливо проявився при урахуванні динамічних властивостей електроенергетичної системи, коли треба було враховувати взаємозв'язки між інформацією в різні моменти часу. Такі динамічні системи є класичними об'єктами теорії керування, і тому багато отриманих там результатів були використані і при розв'язанні задачі оцінювання з урахуванням, природно, специфіки електроенергетичних систем.

Між задачею оцінювання стану і задачею поточкорозподілення добре проглядається зв'язок. В задачі поточкорозподілення задане рівняння сталого режиму, активні і реактивні вузлові потужності (або комплексні значення струмів) у всіх вузлах, крім базисного. Визначити треба напруги і фази в усіх вузлах, крім базисного, потужності по елементах схем, у тому числі потужності (струм) базисного вузла.

Математичні моделі задачі поточкорозподілення, як правило, базувалися на розв'язанні вузлового рівняння:

$$\mathbf{Y}\mathbf{U}_\Delta = \mathbf{J}, \quad (1.1)$$

де $\mathbf{Y}$ – матриця вузлових провідностей;

$\mathbf{U}_\Delta$ – вектор напруг вузлів відносно базисного вузла;

$\mathbf{J}$ – вектор задаючих струмів вузлів.

В основу цих моделей і методів була покладена ідея, що повна відсутність даних про параметри режиму в одних вузлах компенсується надлишком інформації в інших. Електрична система розбивалася на дві підсистеми: на спостережну (с), в якій існували телевиміри, та відновлювану (в), в якій телевиміри були відсутні. Після цього вузлове рівняння (1.1) розбивалося на відповідні блоки і приймало вигляд:

$$\begin{vmatrix} \mathbf{Y}_{cc} & \mathbf{Y}_{cv} \\ \mathbf{Y}_{vc} & \mathbf{Y}_{vv} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \mathbf{U}_{\Delta c} \\ \mathbf{U}_{\Delta v} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{J}_c \\ \mathbf{J}_v \end{vmatrix}$$

За умови достатньої кількості вимірів це рівняння мало розв'язок.

У задачі оцінювання стану вихідними даними є виміри, а результати розрахунку включають ті, що утворюються при розрахунку сталого режиму. Зокрема, у якості вимірюваних параметрів можуть бути ті значення, що фіксуються при розрахунку сталого режиму в звичайному варіанті.

Ще одна особливість характерна для задачі оцінювання – вихідні дані для неї не детерміновані, а мають випадкові значення, що більше відповідає реальній ситуації розрахунку. Тому і результати розрахунку - також випадкові значення, для яких визначаються оцінки і вказується точність отриманих оцінок.

Отже, оцінювання стану може розглядатися як задача розрахунку сталого режиму при випадковому характері вихідних даних – вимірів параметрів режиму або псевдовимірів (інформації, одержуваної не безпосередньо від сенсорів параметрів режиму, а іншим шляхом).

В межах розроблюваних методів було введено поняття *спостережуваність* [10].

Під *спостережуваністю* розуміється можливість оцінити всі параметри, що описують стани (режим) керованого об'єкта, по безпосередніх вимірах частини параметрів стану або деяких функціях від них.

Розглянемо задачу оцінювання стану.

Нехай змінні пов'язані між собою рівняннями сталого режиму

$$W(\mathbf{Z}, \mathbf{D}) = 0, \quad (1.2)$$

де $\mathbf{Z}$ – вектор параметрів режиму мережі,

$\mathbf{D}$ – вектор параметрів елементів мережі.

В свою чергу, вектор значень телевимірів $\mathbf{V}$, які передаються на диспетчерський пункт, можна представити у вигляді суми дійсних значень контрольованих величин, які є функцією поточного значення параметрів режиму $\mathbf{V}(\mathbf{Z})$, та вектора помилок ξ_v , тобто

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(\mathbf{Z}) + \xi_v, \quad (1.3)$$

Система (1.2) недовизначена, тому що число невідомих у ній більше числа рівнянь. Якщо розглядати виміри як додаткові рівняння, що виконуються в середньому, або вважати виміри точними ($\xi_v = 0$), то об'єднана система (1.2), (1.3) може стати визначеною і навіть перевизначеною. Необхідною умовою того, щоб об'єднана система стала, принаймні, визначеною, є

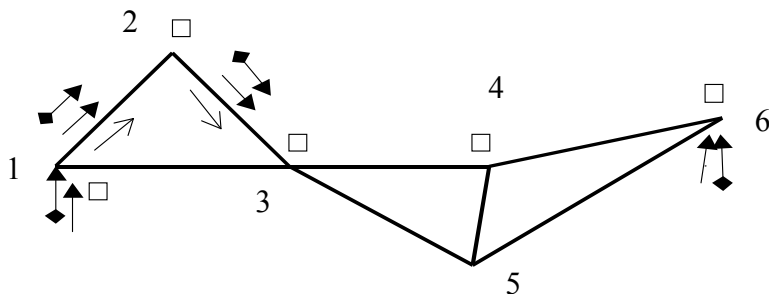
$$r \geq s - m, \quad (1.4)$$

де r – порядок системи (1.2);

s – число компонент вектора $\mathbf{Z}$;

m – порядок системи (1.3).

Ця необхідна умова не є достатньою. Так, наприклад, якщо $r = s - m$ вимірів зосереджені в одному районі мережі і недостатньо вимірів в інших, то ранг об'єднаної системи буде меншим за s .



- – вимір модуля напруги у вузлі
- ↔ – вимір активної потужності в лінії
- – вимір реактивної потужності в лінії
- – вимір струму в лінії

Рис. 1.1. Приклад розміщення вимірів в мережі, що не забезпечують її спостережуваності

На рис. 1.1 наведено приклад розміщення вимірювальних приладів, що не забезпечують необхідний ранг об'єднаної системи, хоча умова (1.4) виконується: число рівнянь дорівнює 12 (по 2 рівняння балансу активної і реактивної потужності в кожному вузлі), число змінних, що описують режим, – 24 (модуль і фаза напруги, а також потужності в кожному вузлі), число вимірів $m = 21$.

Будемо називати детерміновану систему топологічно спостережуваною, якщо число і розміщення вимірів у ній таке, що ранг об'єднаної системи (1.2), (1.3) не менше числа невідомих, що визначають стан системи.

Поняття топологічної спостережуваності має сенс застосовувати до об'єктів типу електроенергетичної системи, де в кожне рівняння входять не всі змінні, а лише невелика їх підмножина.

Перевірка топологічної спостережуваності системи є задачею теорії графів і може бути розв'язана так, як наведено, наприклад, в роботах [10, 11, 13].

Будується біхроматичний граф G , що містить вершини двох типів: вершини першого типу відповідають рівнянням об'єднаної системи

(1.2), (1.3), а вершини другого типу – змінним. Якщо змінна u_j явно входить у рівняння w_j , то цей зв'язок на графі G відображається ребром $(u_j - w_j)$, що з'єднує вершини u_j і w_j (будемо вершини графа позначати тими ж символами, що і відповідні рівняння і змінні). Задача визначення максимального паросполучення полягає в тому, щоб знайти множину, що містить максимально можливе число ребер на графі G , що не мають попарно загальних вершин. На рис. 1.2 поданий деякий граф G і його максимальне паросполучення (ребра, що входять у множину паросполучень виділені). На цьому прикладі очевидно, що розв'язок задачі вибору максимального паросполучення неоднозначне: так, замість ребра $(u_3 - w_3)$ могло ввійти ребро $(u_4 - w_3)$. Якщо існує таке паросполучення, що кожна змінна, що описує режим, інцидентна сильному ребру (тобто такому, що входить в паросполучення), то детермінована система, що описується рівняннями (1.2) і (1.3), топологічно спостережувана.

У топологічно не спостережуваній системі окремі райони (підсистеми) можуть виявитися спостережуваними і для них може бути зроблене оцінювання стану. Наприклад, для схеми рис. 1.1. можна оцінити значення фаз і модулів напруг у вузлах 1, 2 і 3 і, отже, цілком оцінити параметри цих вузлів і віток 1-2, 2-3, 1-3. Можна поставити задачу виділення тих ділянок мережі, параметри режиму яких не можуть бути визначені при заданій системі вимірів. Такі ділянки будемо нижче називати “темними плямами”. Ті ділянки, де параметри режиму визначаються, назвемо “світлими плямами”. Задача виділення “темних плям” еквівалентна виділенню на біхроматичному графі G так званих дефіцитних підмножин, тобто підмножин, де існують вершини типу u_j , що не ввійшли в паросполучення.

На рис. 1.2 наведено приклад біхроматичного графа зі знайденим паросполученням, де вершини 1, 3, 5, 7 відповідають рівнянням, інші вершини – змінним. Вершини 1, 2, 3 і 4 утворюють “світлу пляму” S_L , тому що змінні 2 і 4 визначаються з рівнянь 1 і 3 незалежно від значень інших змінних. Множина S_L , утворена вершинами 5, 6, 7, 8 і 9, являє собою дефіцитну підмножину – “темну пляму”, тому що змінні 6, 8 і 9 не можуть бути однозначно визначені з рівнянь 5 і 7.

На цьому прикладі можна бачити, що “світла пляма” утворюється тоді, коли число змінних усередині “світлої плями” дорівнює числу рівнянь, і вони утворюють повне паросполучення, а вершини, що відповідають рівнянням у “світлій плямі”, не мають суміжних вершин, що належать “темним плямам”.

Наявність “темних плям” у електроенергетичній системі не заважає робити оцінювання параметрів режиму в “світлих плямах”. При

цьому кожна “світла пляма” розглядається як незалежна підсистема з відповідною підсистемою рівнянь сталого режиму, підвекторами параметрів режиму і параметрами, що вимірюються. В окремому випадку “світла пляма” може відповідати підмножині вузлів, що з’єднуються з “темною плямою” лініями електропередач, коли є інформація про потужності у вузлах приєднання цих ліній до “світлої плями” (рис. 1.3,а). Тоді оцінки перетоків у “темну пляму” утворюються при оцінці стану “світлої плями”, а “темна пляма” виключається з розгляду (рис. 1.3,б). Таким чином, вилучення “темних плям” дозволяє розв’язувати задачу оцінювання навіть у тих випадках, коли умови спостережуваності в цілому для системи не виконуються.

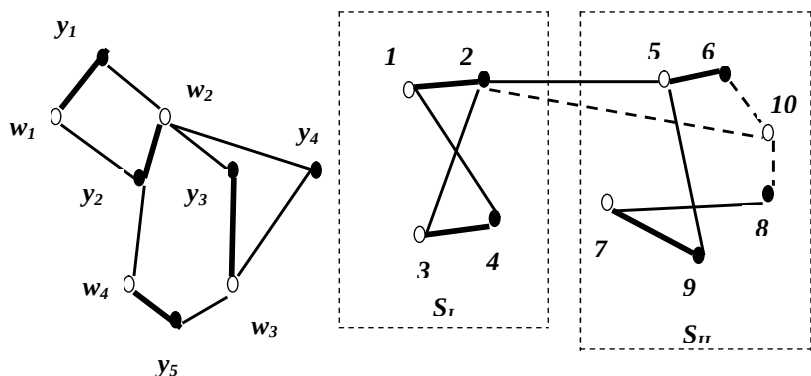


Рис. 1.2. Біхроматичний граф і його максимальне паросполучення (S_I – “світла пляма” і S_{II} – “темна пляма” на біхроматичному графі, вершина 10 – доданий вимір)

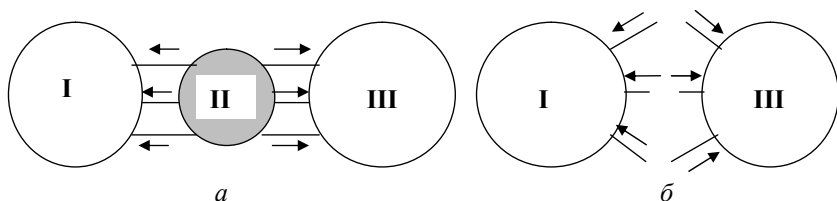


Рис. 1.3. Оцінювання за наявності “темних плям”
 a – I і III – “світлі плями”, II – “темна пляма”;
 b – моделі для оцінювання стану “світлих плям”.

Іноді поділ на “світлі плями” залежить від задання базисного кута $\delta=0$. Наприклад, на рис. 1.4, де вимірюються тільки P_{1-2} , P_{1-3} , P_{5-4} , і P_{5-6} при заданні $\delta_1 = 0$ “світлу пляму” утворять вузли 1, 2, 3, а “темну” – вузли 4, 5, 6. При $\delta_5 = 0$ “світла пляма” стає “темною”, а “темна” – “світлою”.

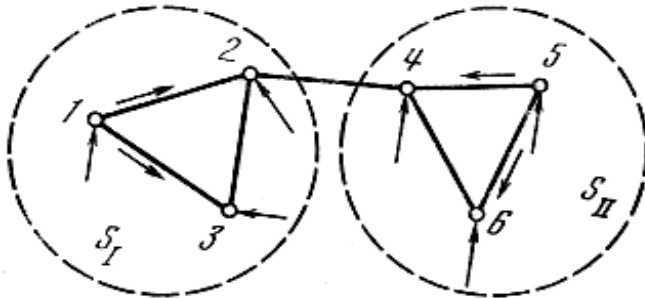


Рис. 1.4. Схема не спостережуваної у цілому системи

При $\delta_1 = \text{const}$: “світла пляма” – вузли 1, 2, 3, “темна” – 4, 5, 6;

при $\delta_5 = \text{const}$: “світла пляма” – вузли 4, 5, 6, “темна” – 1, 2, 3.

Очевидно, що даний підхід легко узагальнити як метод декомпозиції задачі оцінювання стану: якщо деяка підсистема топологічно спостережується, тобто є “світлою плямою”, то для неї проводиться оцінювання стану, включаючи оцінювання граничних параметрів режиму, загальних з іншими підсистемами. Потім при оцінюванні режиму чергової підсистеми отримані раніше оцінки граничних параметрів використовуються як псевдозаміри і т.і. Процес цей може бути ітеративним, тобто після використання псевдозамірів при оцінюванні чергової підсистеми й уточнення оцінок граничних змінних можна повернутися до раніше перелічених підсистем і уточнити оцінки там. В результаті ітераційного процесу можна виділити мінімальні за числом елементів спостережувані підсистеми (які можуть містити в ряді випадків 1 – 2 вузли) і будувати ітеративні алгоритми оцінювання, на кожному кроці яких розв’язується задача малої розмірності. Цей підхід аналогічний ланцюговим схемам при розрахунку сталих режимів.

Отже, топологічна спостережуваність у детермінованих системах є важливим чинником, що дозволяє визначити необхідні умови для локального оцінювання стану і виконувати декомпозицію задачі оцінювання стану всієї електроенергетичної системи.

При розв'язанні задачі оцінювання використовувались алгоритми, побудовані на об'єднанні двох найбільш конкурентоспроможних методів: методі Н'ютона-Рафсона та методі спряжених градієнтів.

Окремим питанням було розміщення необхідного числа вимірів в електроенергетичній системі.

Якщо виділені “темні плями” у схемі мережі, то неважко зазначити число і розміщення вимірів, що необхідно додати для визначення режиму. Оскільки вимір можна розглядати як рівняння, що зв'язує відповідну змінну, то необхідно в дефіцитних підмножинах додати такі рівняння-виміри, для яких вершина, що не увійшла до паросполучення, виступала б як така, що дозволяє визначити режим. На рис. 1.2 штриховими лініями доданий такий вимір до дефіцитної підмножини – вершина 10. Вершини, що відповідають вимірам, можуть мати ребра, інцидентні “світлим плямам”. Додавання нових вимірів не змінює значення “світлих плям”. Справді, паросполучення “світлої плями” збережеться, вершини його будуть суміжні тільки тим вершинам “темної плями”, що відповідають рівнянням.

Розміщення необхідних вимірів в електричній мережі неоднозначне, оскільки неоднозначний і сам вибір паросполучень. Можна накласти певні вимоги, що дозволяють вибрати з можливих варіантів оптимальний за якимось критерієм. Якщо за критерій взяти сумарну довжину телеканалів і вважати, що пропускна спроможність кожного окремого каналу не обмежена, то задача, хоча і не абсолютно строго, розв'язується досить просто.

Вважається, що всі телеканали з'єднують диспетчерський пункт тільки з вузлами, вимір параметрів режиму гілок проводиться на тих їх кінцях, які інцидентні відповідним вузлам. Виміри параметрів режиму всіх гілок, які інцидентні даному вузлу, і параметрів режиму самого вузла передаються по тому ж самому каналу. А тому спочатку добавляється той вимір із можливих варіантів, якому відповідає мінімальна довжина телеканала. Потім добавляються усі виміри, що можуть бути передані по тому ж телеканалу. Після цього процес повторюється, поки не будуть ліквідовані усі “темні плями”. Існуючі телеканали можна вважати такими, що знову вводяться з нульовою довжиною, а тому по них у першу чергу будуть передаватися нові виміри. Очевидно, що припущення про необмежену пропускну спроможність легко знімається: канал, цілком завантажений, виключається з розгляду, а для телевимірювань, що залишилися, у даному вузлі потрібно новий канал.

На основі цих ідей, методів та моделей були побудовані такі програмні продукти, як ППП ТОРОС [54], програмно-обчислювальний

комплекс “Оцінка” [15] та інші. Деякі з них [5, 6] моделювали режим в умовах неповноти інформації з використанням нечітких моделей, що значно підвищувало ефективність роботи.

Разом з тим, при використанні всіх цих моделей залишилися не вирішеними деякі задачі:

- Задача відтворення режимів електричних мереж (задача поточкорозподілення) розглядалася саме як електротехнічна задача, для чого розв’язувалася система вузлових рівнянь (1.1). Але така система рівнянь іноді буває несумісною. Тому, винятково важливо в загальному випадку для довільної системи лінійних рівнянь навчитись визначати умови такої несумісності перед початком її розв’язання, при цьому ці умови повинні бути сформульовані у такому вигляді, який не потребує попередніх обчислень (наприклад, користуючись положеннями теорії графів).

- Не менш важливою є інша задача, а саме: ми маємо можливість вимірювати комплексні значення потужності в лініях (тобто їх активну та реактивну складову), але практично не маємо можливості вимірювати комплексні значення напруги на шинах підстанцій, тому що апаратне визначення зсуву фаз між напругами різних підстанцій вимагає значних капіталовкладень і на практиці не застосовується. Тож ми одержуємо від телеметричних пристроїв тільки модулі напруг у вузлах мережі. Оскільки для моделювання режиму електроспоживання мережі необхідно мати комплексні значення напруги на шинах підстанцій, це призводить до суттєвої невизначеності вхідних даних. Саме внаслідок цього, існуючі моделі відтворення режиму “прив’язані” до базисного вузла і не використовують телеметричні значення напруг у вузлах мережі, які інформаційно “відірвані” від базисного вузла [29]. Тому актуальною є задача створення математичних методів, моделей та алгоритмів, які хоча б частково зменшували рівень цієї невизначеності і давали можливість використовувати телеметричну інформацію про напруги у вузлах мережі для відтворення режиму мережі.

- Використання нечітких множин з жорстко заданою функцією належності в нечітких моделях відтворення режиму (які базуються на традиційному максимінному принципі узагальнення) призводить до високої залежності результатів від суб’єктивних помилок експертів, тому важливо розробити методи для зменшення цієї залежності.

Не вирішені іншими авторами задачі висвітлені в цій роботі. Разом з тим, задача відтворення режиму мережі розглядається у ній ширше, а саме – як загальна задача відтворення стану складної технічної системи в умовах недостатньої кількості вхідних даних.

РОЗДІЛ 2

ВІДТВОРЕННЯ СТАНУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ НЕПОВНОТИ ВХІДНИХ ДАНИХ

2.1. Складні системи – основні положення та ідентифікація

Незважаючи на те, що теорія систем впевнено розвивається протягом останніх 30÷40 років у вітчизняних та закордонних працях [4, 7, 16, 17, 19, 20, 34÷36, 44, 47, 52, 53, 55, 56, 58, 61, 65, 66, 76, 77], і по сьогодні не існує загальноприйнятого строгого визначення поняття “система”, хоч саме це фундаментальне поняття (можливо дещо в іншому вигляді) виходить ще з філософії Аристотеля. Саме він постулював, що *важливість цілого вища за важливість його складових*. Іншими словами, значимість елементів, що складають деяку множину, визначається значимістю самої множини (як цілого).

Погляди Аристотеля панували в науці протягом багатьох століть, доки Галілей не висловив іншу точку зору, яка надалі була обгрунтована Ньютоном: *ціле пояснюється властивостями його елементарних складових частин*. Проявом цієї точки зору в математиці стала класична теорія множин, на основі якої і були формалізовані практично усі сучасні математичні дисципліни.

Але наукові погляди, як і саме суспільство, характеризуються спіральним розвитком і в середині XX сторіччя системний підхід до осмислення природних явищ знову повернувся в науку (звичайно на новому рівні). Він відрізняється від теоретико-множинного підходу такими основними суттєвими положеннями:

- Системний підхід вважає первинною саму систему, а не її елементи.

Як відомо [7, 23], в теорії множин, сам спосіб мислити про множину виходить з того, що елементи, з яких збирається множина, заздалегідь чітко визначені і володіють реальністю, яка не залежить від їх групування в множину.

В свою чергу системний підхід стверджує, що первинною реальністю володіє сама система, як ціле [52, 61]. В той же час компоненти (елементи, частини), з яких вона складається, залежать від вибраного дослідником способу представлення системи. При цьому, спосіб представлення системи, як сукупності її компонентів, визначається характером задачі, яку доводиться розв’язувати досліднику.

- Системний підхід не визнає *принципу нерозбірливості*, на якому базується теоретико-множинний підхід [61].

Цей постулат теорії множин дає можливість об'єднувати в одній множині елементи різної природи, оскільки аксіоматика цієї теорії передбачає операції над самими множинами, не заглиблюючись у відношення між їх елементами. Що ж стосується теорії відношень, то вона хоч і вивчає відношення між елементами множин, але природа елементів її теж не цікавить.

На відміну від цього в теорії систем сукупності виникають як природні класи, що складаються з елементів спільної природи, які мають сенс саме в межах тієї чи іншої системи.

Системи також розподіляються на *внутрішні* та *зовнішні*. Внутрішньою системою прийнято називати деяке цілісне утворення, наприклад, живий організм, до якого можна застосовувати процедуру членування, за допомогою якої система буде представлена у вигляді деякої структури складових частин [17, 61]. Цілком зрозуміло, що така процедура залежить від того, які властивості певної системи цікавлять дослідника.

Зовнішні системи – це клас об'єктів спільної природи, які об'єднані деякою цілісною суттєвістю. До зовнішніх систем відносяться, наприклад, майже усі технічні системи, природні екологічні системи, суспільні системи [17, 61].

Принцип нерозбірливості недійсний ані для внутрішніх, ані для зовнішніх систем.

- На відміну від множини система обов'язково повинна мати внутрішню організацію [61].

В теорії множин об'єднання елементів в множину, а також встановлення відношень між елементами, є зовнішнім актом по відношенню до цієї множини. На відміну від цього будь-яка система, незалежно від бажань дослідника володіє певною внутрішньою організацією (структурою). Крім того, як правило, ця структура багаторівнева та ієрархічна.

Таким чином, на вербальному рівні, *система є цілісність, яка визначається деякою організуючою спільністю*. Таке трактування системи, звичайно, не є формальним визначенням, але на його основі побудовані всі існуючі сьогодні математичні визначення.

Поширеним математичним визначенням системи сьогодні є визначення, яке було введене Калманом [19]. На ньому побудована математична теорія систем, яка впевнено розвивається в працях широкого кола вчених.

Звичайно, незважаючи на вищезгадане протиставлення між теоретико-множинним та системним підходами до вивчення природних явищ, математики не змогли обійтись без поняття множини в побудо-

ві теорії систем, оскільки поняття множини пронизує сьогодні практично всі математичні теорії.

В основі математичної теорії систем лежить принцип причинності, який відображає реально існуючі в природі причинно-наслідкові зв'язки. В теорії систем процес-причина відповідає поняттю “вхід”, а процес-наслідок – поняттю “вихід”. Разом з тим теорія систем вважає, що вихід залежить від входу не безпосередньо, а опосередковано через деякий процес, який протікає в просторі станів системи, тобто вводиться ще поняття “стану” системи.

За Калманом вважається, що система Σ визначена тоді, коли задані:

- Впорядкована множина моментів часу T .
- Множина можливих значень входів U .
- Множина можливих значень виходів Y .
- Множина можливих станів X .
- Множина входів, тобто образів відображення $T \rightarrow U$.
- Множина виходів, тобто образів відображення $T \rightarrow Y$.
- Множина станів, тобто образів відображення $T \rightarrow X$.
- Перехідне відображення $\sigma: T \times T \times X \times U \rightarrow X$, яке повинно задовольняти аксіомам узгодженості, детермінізму та причинності.
- Відображення виходу $\eta: T \times X \rightarrow Y$.

Таким чином система (з точки зору математичної теорії систем) є складною динамічною конструкцією типу “чорної скриньки”.

Як правило, під час побудови будь-якої аксіоматичної теорії, математик конструюють систему її аксіом таким чином, щоб ця теорія розв'язувала певне коло задач. Математична теорія систем не є винятком. Вона призначена для розв'язання широкого кола задач, пов'язаних з прогнозуванням поведінки та оптимальним керуванням різноманітних природних та штучних систем. Звичайно, перед тим, як вирішувати будь-яку з вище названих задач, дослідник повинен спочатку побудувати адекватну поставленій задачі модель досліджуваної системи. Тобто дослідження системи дослідник повинен почати з її ідентифікації.

За класичним визначенням Л.Заде [55] “Ідентифікація є знаходження за вхідними та вихідними сигналами деякої системи еквівалентної їй системи з деякого заданого класу”. Іншими словами ідентифікація – це визначення множини станів X , та відображень σ та η , за відомими множинами входів та виходів.

Протягом останніх десятиліть теорія ідентифікації складних систем успішно розвивалась в працях вітчизняних та закордонних вчених [16, 35, 36, 53, 55, 56, 58, 66, 76, 77].

Слід звернути увагу на те, що в класичній теорії систем система розглядається як “чорна скринька”, для якої невідома внутрішня структура та причинно-наслідкові зв’язки між компонентами системи, але апіорі відомі множини входів та виходів. Разом з тим, існує досить широке коло задач, в яких навпаки, апіорі відома внутрішня структура системи та причинно-наслідкові зв’язки між її компонентами, але в повному обсязі невідомі множини входів та виходів. Це найчастіше відноситься до систем, компоненти яких розміщені на значних відстанях одне від одного, тобто самі системи займають великі території. До таких систем, наприклад, відносяться такі технічні системи, як електроенергетичні, теплоенергетичні, системи водопостачання та каналізації, газорозподільчі системи, транспортні системи тощо.

Отримати в повному обсязі множини вхідних та вихідних сигналів для таких систем іноді технічно неможливо, але найчастіше не вигідно економічно, оскільки потребує дуже великих капіталовкладень. З іншого боку, для таких систем, як правило, апіорі відома їх внутрішня структура та причинно-наслідкові зв’язки між компонентами. Тому в цьому випадку на перший план виступає не задача ідентифікації, а так звана задача *детермінізації*, тобто задача визначення невідомої частини значень вхідних та вихідних сигналів, за відомими внутрішньою структурою системи та причинно-наслідковими зв’язками між її компонентами, а також відомою частиною значень вхідних та вихідних сигналів. Слід зазначити, що класична задача відновлення вхідних сигналів системи по відомих вихідних сигналах є частковим варіантом задачі *детермінізації*.

2.2. Детермінізація процесів в складних системах

Задача детермінізації процесів в системах є в певному розумінні оберненою задачею, по відношенню до задачі ідентифікації.

Як вже згадувалося в попередньому параграфі, математична теорія систем побудована з метою зручного розв’язання задач ідентифікації. Для задач детермінізації, де структура системи апіорі відома, але невідома частина значень вхідних та вихідних сигналів, калманівське означення системи не є зручним. В цьому випадку доцільніше користуватися менш розповсюдженим, але більш придатним для задачі детермінізації, означенням поняття “система”, а саме: “*Система – це довільна множина, на якій визначена деяка структура*” [7]. При цьому структурою S на множині S називають відношення, в якому знаходяться між собою елементи цієї множини. Саме на цій основі і сформована аксіоматика теорії детермінізації процесів в складних системах, яка опублікована в роботі [38].

Вона виходить із постулату:

Для будь-якої технічної системи S існує непустий клас систем K_S^Z , якому вона належить, такий, що:

1. На класі K_S^Z діють закони Z , яким підкоряється кожна система цього класу.

2. Кожна система S_i класу K_S^Z в кожний момент часу може бути представлена у вигляді скінченної множини E_i елементів, $i = 1, 2, \dots, q$, де q – кількість систем в класі K_S^Z .

3. Універсум елементів $U = \bigcup_{i=1}^q E_i$ є відома скінченна множина, потужність якої не змінюється в часі.

Загальновідомо, що декомпозиція будь-якої системи залежить від умов задачі, яка розв'язується, та від дослідника, який її розв'язує. Звичайно, сама декомпозиція, як процедура, в певній мірі суб'єктивна, але після її проведення і формування універсуму U , подальші операції з U носять формальний характер.

Введемо для класу K_S^Z декомпозицію D_K цього класу, як пару виду $D_K = (U, P)$, де U – універсум елементів, $P = \{\|p_{ij}\|, i = 1, \dots, w; j = 1, \dots, n\}$ – простір можливих властивостей всіх елементів універсуму U , а $\|p_{ij}\|$ – матриця властивостей елементів універсуму U , w – кількість елементів універсуму U , n – максимальна кількість властивостей елемента із універсуму U .

Взагалі, матриця $\|p_{ij}\|$ може мати як числову, так і нечислову природу. Оскільки в переважній більшості задач детермінізації має сенс оперувати тільки з числовими властивостями елементів, вони надалі будуть називатися параметрами. Є сенс розрізняти статичні та динамічні параметри. Взагалі, різниця між ними досить умовна, оскільки в реальних системах усі характеристики елементів (параметри) в тих чи інших межах змінюються з часом. Тому статичними вважаються такі параметри, зміною яких в часі можна знехтувати.

Виділимо в класі K_S^Z систему S , для якої необхідно розв'язати задачу детермінізації, тобто відтворити невідомі параметри. На основі декомпозиції D_K цього класу для системи S можна ввести простір мо-

делей M_S^U системи S на декомпозиції D_K класу K_S^Z , як декартів добуток вигляду

$$M_S^U = C \times P, \quad (2.1)$$

де $C = \mathfrak{R}(E^2)$ – простір структур можливих моделей системи S .

Носій цього простору $E \in \wp(U)$ є множиною елементів моделі системи S , де $\wp(U)$ – множина всіх підмножин універсуму U ; $\mathfrak{R}(E^2)$ – множина бінарних відношень на E таких, що їх транзитивне замикавання зв'язне, тобто

$$\mathfrak{R}(E^2) = \left\{ c \mid \left(c \subseteq E^2 \right) \wedge \forall a, b \in E \left((a \neq b) \Rightarrow \left((a, b) \in \hat{c} \vee (b, a) \in \hat{c} \right) \right) \right\}, \quad (2.2)$$

де $\hat{c}$ – транзитивне замикавання бінарного відношення $c \in \mathfrak{R}(E^2)$, яке є можливою структурою моделі системи S .

Заборона використання структур, які не відповідають умові (2.2), пов'язана з необхідністю збереження цілісності системи S .

Слід мати на увазі, що упровадження для системи S простору моделей дає можливість розглядати її як динамічну систему, для якої множина всіх її елементів, структура та матриця властивостей можуть змінюватись.

Природа динамічності множини всіх елементів полягає в тому, що від системи S можуть відділятися окремі підсистеми та елементи, або до неї можуть приєднуватись окремі елементи та цілі системи з класу K_S^Z . Це є однією з причин динамічності структури c . Крім того, структура c може змінюватись в силу зміни зв'язків між елементами навіть при сталій потужності множини елементів E .

Наочно проілюструвати вищенаведені поняття та означення можна на прикладі такої технічної системи, як система електропостачання. За загальною класифікацією, наведеною в попередньому параграфі, вона належить до зовнішніх систем. Структура моделі цієї системи з такими елементами як підстанції та лінії може змінюватись в часі залежно від стану комутаційних пристроїв, а також за рахунок демонтажу існуючих та введенню нових елементів. Що стосується властивостей елементів такої системи, то вони змінюються в часі під впливом старіння, природних умов, які постійно змінюються, а також з інших причин.

Кожен елемент $e \in E$ моделі системи S , крім того, що він має власні параметри та зв'язки з іншими елементами моделі системи, може мати також і канали зв'язку з оточуючим середовищем, які не входять до структури моделі системи S . Через ці канали оточуюче середови-

ще впливає на систему за допомогою вхідних параметрів, а також система впливає на оточуюче середовище за допомогою вихідних параметрів. Таким чином кожний елемент моделі $m_s^u \in M_s^u$ можна записати як трійку $\mathbf{e} = (\mathbf{x}_e, \mathbf{y}_e, \mathbf{p}_e)$, де $\mathbf{x}_e = (x_{e1}, x_{e2}, \dots, x_{ek})$ – вектор входу елементу $\mathbf{e}$, k – максимальна кількість вхідних параметрів елементу із E , $\mathbf{y}_e = (y_{e1}, y_{e2}, \dots, y_{eg})$ – вектор виходу елементу $\mathbf{e}$, g – максимальна кількість вихідних параметрів елементу із E ; $\mathbf{p}_e$ – e -тий рядок матриці $\|\mathbf{p}_{ij}\|$.

Законом Z , що діє на просторі моделей M_s^u , називається відображення вигляду

$$Z: X \times M_s^u \rightarrow Y, \quad (2.3)$$

де $X = \{\mathbf{x} \mid \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_e, \dots, x_h)\}$ – простір можливих вхідних параметрів, $Y = \{\mathbf{y} \mid \mathbf{y} = (y_1, \dots, y_e, \dots, y_h)\}$ – простір можливих вихідних параметрів, h – кількість елементів множини E .

Вектори $\mathbf{x}, \mathbf{y}$, матриця $\|\mathbf{p}_{ij}\|$ та відображення Z залежно від природи причинно-наслідкових зв'язків можуть бути представлені в детермінованій, стохастичній або нечіткій формах.

Якщо відображення Z представлено в стохастичній формі, то незалежно від форми представлення вхідного вектора $\mathbf{x}$ та матриці властивостей $\|\mathbf{p}_{ij}\|$, вихідний вектор буде мати стохастичний характер. У випадку, якщо вектор $\mathbf{x}$ або матриця $\|\mathbf{p}_{ij}\|$ представлені в нечіткій формі, то на виході відображення Z будемо мати нечіткий вектор $\mathbf{y}$. Акцентуємо увагу на тому, що навіть для фіксованого детермінованого числового аргументу $\mathbf{x}$, його образ при стохастичному відображенні Z буде випадковою величиною, а при нечіткому відображенні – нечіткою величиною.

Нечітке відображення Z незалежно від форми представлення вхідного вектора $\mathbf{x}$ та матриці властивостей $\|\mathbf{p}_{ij}\|$ призведе до нечіткого характеру вихідного вектора. В окремому випадку, якщо вектор $\mathbf{x}$ або матриця $\|\mathbf{p}_{ij}\|$ представлені в стохастичній формі, то на виході відображення Z будемо мати нечіткий випадковий вектор $\mathbf{y}$.

У випадку детермінованих апіорі відомих законів Z незалежно від форми представлення векторів $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ та матриці $\|\mathbf{p}_{ij}\|$ (детермінованій, стохастичній, нечіткій) задача відтворення невідомих координат

векторів $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$ та невідомих елементів матриці $\|\mathbf{p}_{ij}\|$ називається **детермінізацією** системи S . Очевидно, що в просторі детермінованих параметрів детермінований закон Z є бієктивним відображенням або бієктивним звуженням деякого довільного відображення, в просторі стохастичних параметрів характеризуватиме тренд, а в просторі нечітких параметрів буде функцією нечітких аргументів, яка задає “розмитий тренд”.

2.3. Визначення загальних умов, за якими можливе відтворення стану складних технічних систем

Згідно вищенаведених означень, кожна модель $m_s^u \in M_s^u$ системи S є пара вигляду $m_s^u = \left(c, \|\mathbf{p}_{ij}\| \right)$, для якої має місце співвідношення

$$\mathbf{y} = Z\left(\mathbf{x}, m_s^u\right) = Z\left(\mathbf{x}, \left(c, \|\mathbf{p}_{ij}\|\right)\right), \quad (2.4)$$

де $\mathbf{y} \in \mathbf{Y}$ – вектор вихідних параметрів, $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ – вектор вхідних параметрів.

Нехай для деяких комбінацій відомих координат векторів $\mathbf{x}$ та $\mathbf{y}$, частково відомих елементів матриці властивостей $\|\mathbf{p}_{ij}\|$ при заданій структурі C існує алгоритм відтворення всіх невідомих координат векторів $\mathbf{x}$ та $\mathbf{y}$, а також невідомих елементів матриці властивостей $\|\mathbf{p}_{ij}\|$. Такі комбінації параметрів $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}$ ми будемо називати **детермінізуючими**.

Будемо вважати, що кожен елемент $e \in E$ моделі системи S може бути чи не бути зв'язаним з об'єктом, який називається джерелом інформації. У першому випадку вхід, вихід, власні параметри та зв'язки такого елемента з іншими елементами стають визначеними.

Для кожного елемента $e \in E$ введемо адитивну функцію інформаційних витрат $\omega(e, c)$ з від'ємним інгредієнтом. Якщо елемент e , не зв'язаний з джерелом інформації, то $\omega(e, c) = 0$.

Цілком зрозуміло, що може існувати велика кількість варіантів розташування джерел інформації на елементах множини E , які дають детермінізуючу комбінацію параметрів для заданої моделі m_s^u системи S .

Нехай існує v таких варіантів. Кожен з цих варіантів характеризується множиною елементів $E_i^+ \subseteq E$, зв'язаних з джерелом інформації, та функцією інформаційних витрат

$$\Omega(E_i^+) = \sum_{E_i^+} \omega(e, c) \quad (2.5)$$

Очевидно, що серед цих варіантів можливо вибрати оптимальний E_{opt}^+ , виходячи з критерію

$$E_{opt}^+ \stackrel{def}{\Leftrightarrow} \Omega(E_{opt}^+) = \min_{i=1}^v \Omega(E_i^+) \quad (2.6)$$

В загальному випадку оптимальний варіант розташування джерел інформації буде залежати від структури моделі m_s^u системи S . Для реальних технічних систем їх моделі можуть змінюватись в часі так, що структура цих моделей буде коливатись навколо деякої визначеної базової структури. В цьому випадку доцільно оптимальний варіант розташування джерел інформації знаходити саме для базової структури системи S , що часто буде відповідати мінімуму середніх інформаційних витрат або використовувати інші критерії оптимальності, особливо за відсутністю базової структури.

Якщо функція інформаційних витрат обмежена значенням Ω_{lim} , то може так статись, що $\forall i \in \{1, 2, \dots, v\} \left(\Omega(E_i^+) > \Omega_{lim} \right)$, тобто кожний варіант розташування джерел інформації в m_s^u , який дає детермінізуючу комбінацію параметрів, не відповідає обмеженню. Це буде означати, що однозначне відтворення всіх невідомих координат векторів $\mathbf{x}$ та $\mathbf{y}$, а також невідомих елементів матриці властивостей $\|\mathbf{p}_{ij}\|$ неможливе.

У цьому випадку можлива **квазідетермінізація**, тобто відтворення невідомих параметрів з прийнятною похибкою. Розглянемо цю проблему детальніше.

Рівняння (2.4) можна переписати у вигляді

$$(\mathbf{y}_b, \mathbf{y}_n) = Z((\mathbf{x}_b, \mathbf{x}_n), (c, \|\mathbf{p}_{ij}\|)), \quad (2.7)$$

де $\mathbf{y}_b$ – відомі компоненти вектора вихідних параметрів, $\mathbf{y}_n$ – невідомі компоненти вектора вихідних параметрів, $\mathbf{x}_b$ – відомі компоненти вектора вхідних параметрів, $\mathbf{x}_n$ – невідомі компоненти вектора вхідних параметрів.

У випадку відсутності детермінізуючої сукупності відомих параметрів $\mathbf{y}_b, \mathbf{x}_b$, кожен з векторів $\mathbf{y}_n, \mathbf{x}_n$ невідомих параметрів можна розкласти на дві частини – на параметри, які можна однозначно відтворити (позначимо їх $\mathbf{y}_{n+}, \mathbf{x}_{n+}$) та на параметри, які неможливо однозначно

чно відтворити (позначимо їх y_n, x_n). З урахуванням цього вираз (2.7) можна записати у вигляді

$$(y_n, y_{n+}, y_n) = Z((x_n, x_{n+}, x_n), (c, \|p_{ij}\|)). \quad (2.8)$$

Таким чином задача квазідетермінізації полягає в тому, щоб якимось чином визначити саме параметри y_n, x_n з прийнятною в межах задачі похибкою.

Із загальних міркувань випливають три можливі види квазідетермінізації:

- Евристична квазідетермінізація.

Вона полягає в тому, що дослідник, враховуючи свій власний досвід, інтуїцію та думку експертів, задає деякі евристичні припущення у вигляді детермінованих функціональних співвідношень між параметрами y_n, x_n , які так доповнюють реально діючі закони Z , що деякі доступні при обмеженні Ω_{lim} комбінації параметрів стають детермінуючими. Ці припущення в процесі дослідження реальної системи можуть надалі уточнюватись, а можлива похибка відтворення зменшуватись. Оскільки алгоритми, що побудовані на рівняннях з детермінованими величинами, найбільш ефективні, то цей вид квазідетермінізації доцільно використовувати в першу чергу, звичайно, якщо забезпечується припустимий рівень похибки.

- Стохастична квазідетермінізація.

Цей тип квазідетермінізації характеризується тим, що параметри y_n, x_n (тобто параметри, які неможливо однозначно відтворити при заданому обмеженні Ω_{lim}) представляються у вигляді статистичних оцінок випадкових величин, і вираз (2.8) є звичайним детермінованим відображенням випадкових та детермінованих величин. Цей вид квазідетермінізації доцільно використовувати при наявності статистики та статистичної стійкості, якщо евристична квазідетермінізація не забезпечує припустимий рівень похибки.

- Нечітка квазідетермінізація.

Вона полягає в тому, що координати векторів y_n та x_n представляються у вигляді нечітких множин (наприклад, регулярних нечітких чисел). В результаті, замість звичайної системи рівнянь (2.8) може бути отримана система нечітких рівнянь, розв'язок якої, наприклад, можна одержати за допомогою квазіобернених функцій [14]. Цей вид квазідетермінізації доцільно використовувати за відсутності статистики або статистичної стійкості, якщо евристична квазідетермінізація не забезпечує припустимий рівень похибки.

Таким чином, в найбільш загальному випадку умови, за якими можливе відтворення стану складної технічної системи, можна сформулювати у вигляді схеми (рис. 2.1).

Розглянемо умови *однозначної* детермінізації для випадку повністю відомих елементів матриці властивостей $\|\mathbf{p}_{ij}\|$, тобто невідомими можуть бути лише координати векторів $\mathbf{x}$ та $\mathbf{y}$.

Оскільки структуру C та матрицю властивостей $\|\mathbf{p}_{ij}\|$ ми будемо вважати відовими, то вираз (2.7) можна записати у вигляді

$$(\mathbf{y}_v, \mathbf{y}_n) = F(\mathbf{x}_v, \mathbf{x}_n), \quad (2.9)$$

де F – функціональна залежність між векторами вхідних та вихідних даних, яка враховує структуру системи та матрицю властивостей її елементів.

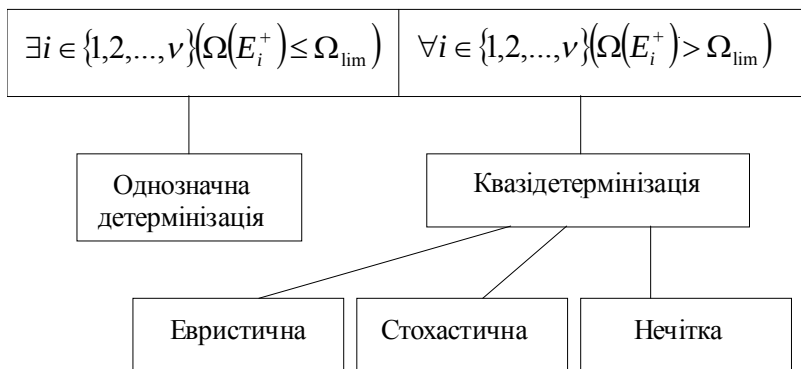


Рис. 2.1. Умови відтворення стану складної технічної системи

В загальному випадку функція F може бути якою завгодно, а тому в залежності від її характеру вираз (2.9) може бути представлений як система рівнянь (лінійних, квадратних, поліноміальних, тригонометричних тощо).

Надалі ми будемо розглядати випадок лінійної функції F .

2.4. Дослідження умов відтворення стану систем з лінійними та лінеаризованими функціональними зв'язками

Розглянемо довільну систему, що складається з $\mathbf{n}$ елементів $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n$ з вхідними параметрами $x_1, x_2, \dots, x_n$ та вихідними – $y_1, y_2, \dots, y_n$. Оскільки кожен елемент $\mathbf{e}_i$ характеризується двома параметрами x_i, y_i , то загальна кількість параметрів системи дорівнює $2\mathbf{n}$.

Будемо вважати, що система задовольняє лінійному закону, а її матриця властивостей та структура нам відомі. У цьому випадку ви-

хунок того, що в деяких рівняннях буде відсутній вільний член і з'явиться нова змінна, а в деяких – навпаки, зникнуть деякі змінні.

Очевидно, що умовою однозначної розв'язуваності такої системи є ненульовий визначник її матриці коефіцієнтів, або (що тотожно) якщо перетворення її за методом Гаусса приведуть до трикутного вигляду [24, 26].

Для систем з великою кількістю елементів вищеназвані процедури перевірки умов однозначної розв'язуваності системи лінійних рівнянь – досить трудомісткий процес, тому розробка *необчислювальних* методів визначення розв'язуваності такої системи рівнянь має велике прикладне значення. Один з таких методів розглядається далі.

2.5. Визначення умов відтворення стану систем з лінійними та лінеаризованими функціональними зв'язками без попередніх обчислень на мові теорії графів

Оскільки структуру системи (топологічні відношення між її елементами) найзручніше зображувати у вигляді *графу*, то всі подальші викладки ми будемо проводити на мові *теорії графів* [48, 57].

Практично будь-яка система може бути представлена графом, у якого елементи системи є *вершинами*, а функціональні зв'язки між ними – *ребрами*. Послідовність ребер графа, що з'єднує будь-які дві вершини, називається *ланцюгом*. Два ланцюги *перетинаються*, якщо вони мають хоча б одну спільну вершину.

Розглянемо невелику систему S , що містить 6 елементів (a, b, c, d, e, f) і граф якої можна зобразити у вигляді, представленому на рис. 2.2.

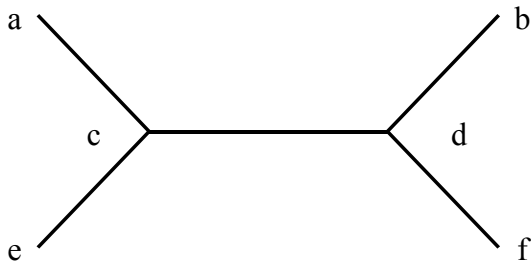


Рис. 2.2. Граф системи S

Нехай ця система має дві *фіксовані* та дві *вільні* вершини (позначимо їх відповідно Φ та Ψ). Це означає, що для *фіксованих* вершин відомі параметри x_i та y_i , для вільних – обидва параметри невідомі, для решти вершин відомий тільки параметр y_i .

Розглянемо два варіанти розташування вершин **ф** та **в** на графі системи. Вершини графу пронумеровані для зручності проведення перетворень за методом Гаусса.

Перший варіант

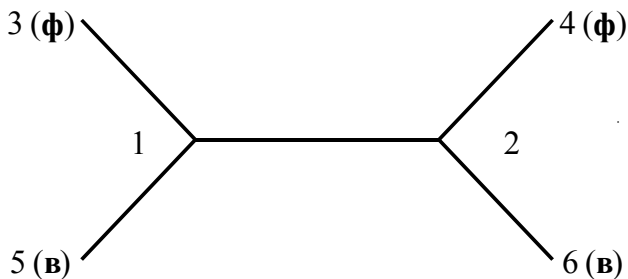


Рис. 2.3. Варіант розташування вершин **ф** та **в** на графі системи S , при якому система рівнянь (2.10) має однозначний розв'язок

Система рівнянь для цього випадку має вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{15}x_5 = y_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{24}x_4 + a_{26}x_6 = y_2; \\ a_{31}x_1 + a_{33}x_3 = y_3; \\ a_{42}x_2 + a_{44}x_4 = y_4; \\ a_{51}x_1 + a_{55}x_5 = y_5; \\ a_{62}x_2 + a_{66}x_6 = y_6 \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Оскільки в цьому варіанті параметри y_1, y_2, y_3, y_4, x_3 та x_4 нам відомі, а параметри x_1, x_2, x_5, x_6, y_5 та y_6 – невідомі, доцільно виконати такі підстановки:

$$\begin{aligned} y_1^* &= y_1 - a_{13}x_3; & y_2^* &= y_2 - a_{24}x_4; \\ y_3^* &= y_3 - a_{33}x_3; & y_4^* &= y_4 - a_{44}x_4 \end{aligned}$$

Після цього система (2.13) набуде вигляду

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{15}x_5 = y_1^*; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{26}x_6 = y_2^*; \\ a_{31}x_1 = y_3^*; \\ a_{42}x_2 = y_4^*; \\ a_{51}x_1 + a_{55}x_5 = y_5; \\ a_{62}x_2 + a_{66}x_6 = y_6 \end{array} \right. \quad (2.14)$$

З третього та четвертого рівнянь системи (2.14) випливає:

$$x_1 = \frac{y_3^*}{a_{31}} = \frac{y_3 - a_{33}x_3}{a_{31}};$$

$$x_2 = \frac{y_4^*}{a_{42}} = \frac{y_4 - a_{44}x_4}{a_{42}}$$

Підставивши одержані значення x_1 , x_2 в перше та друге рівняння системи (2.14), в свою чергу отримаємо:

$$x_5 = \frac{y_1^* - a_{11}x_1 - a_{12}x_2}{a_{15}} = \frac{y_1 - a_{13}x_3 - a_{11}\frac{y_3 - a_{33}x_3}{a_{31}} - a_{12}\frac{y_4 - a_{44}x_4}{a_{42}}}{a_{15}};$$

$$x_6 = \frac{y_2^* - a_{21}x_1 - a_{22}x_2}{a_{26}} = \frac{y_2 - a_{24}x_4 - a_{21}\frac{y_3 - a_{33}x_3}{a_{31}} - a_{22}\frac{y_4 - a_{44}x_4}{a_{42}}}{a_{26}}$$

Підставивши усі отримані значення x_1 , x_2 , x_5 , x_6 в п'яте та шосте рівняння системи (2.14), знайдемо також значення y_5 , y_6 :

$$y_5 = a_{51}\frac{y_3 - a_{33}x_3}{a_{31}} + a_{55}\frac{y_1 - a_{13}x_3 - a_{11}\frac{y_3 - a_{33}x_3}{a_{31}} - a_{12}\frac{y_4 - a_{44}x_4}{a_{42}}}{a_{15}};$$

$$y_6 = a_{62}\frac{y_4 - a_{44}x_4}{a_{42}} + a_{66}\frac{y_2 - a_{24}x_4 - a_{21}\frac{y_3 - a_{33}x_3}{a_{31}} - a_{22}\frac{y_4 - a_{44}x_4}{a_{42}}}{a_{26}}$$

Таким чином, при першому варіанті розташування вершин **ф** та **в**, система рівнянь (2.13) має однозначний розв'язок.

Другий варіант

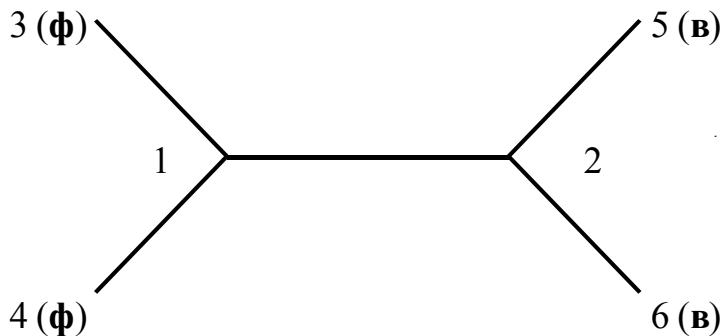


Рис. 2.4. Варіант розташування вершин **ф** та **в** на графі системи S, при якому система рівнянь (2.10) не має однозначного розв'язку

Система рівнянь для цього випадку має вигляд

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 = y_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{25}x_5 + a_{26}x_6 = y_2; \\ a_{31}x_1 + a_{33}x_3 = y_3; \\ a_{41}x_1 + a_{44}x_4 = y_4; \\ a_{52}x_2 + a_{55}x_5 = y_5; \\ a_{62}x_2 + a_{66}x_6 = y_6 \end{cases} \quad (2.15)$$

Оскільки в цьому варіанті параметри y_1, y_2, y_3, y_4, x_3 та x_4 нам відомі, а параметри x_1, x_2, x_5, x_6, y_5 та y_6 – невідомі, доцільно виконати такі підстановки:

$$y_1^* = y_1 - a_{13}x_3 - a_{14}x_4; \quad y_3^* = y_3 - a_{33}x_3; \quad y_4^* = y_4 - a_{44}x_4$$

Після цього система (2.15) набуде вигляду:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = y_1^*; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{25}x_5 + a_{26}x_6 = y_2; \\ a_{31}x_1 = y_3^*; \\ a_{41}x_1 = y_4^*; \\ a_{52}x_2 + a_{55}x_5 = y_5; \\ a_{62}x_2 + a_{66}x_6 = y_6 \end{cases} \quad (2.16)$$

Аналізуючи третє та четверте рівняння цієї системи, легко бачити, що в загальному випадку (якщо, звичайно, $\frac{y_3^*}{a_{31}} \neq \frac{y_4^*}{a_{41}}$) система рівнянь несутимісна. З топологічної точки зору причина цієї несутимісності полягає в тому, що ланцюги, які з'єднують пари вершин **ф-в** графу системи перетинаються.

Для загального випадку в роботі [22] була сформульована та доведена відповідна теорема, яка значно полегшила розв'язання прикладних задач, а саме:

ТЕОРЕМА 2.1.

*Нехай існує система S, яка має фіксовані та вільні елементи. Нехай також кількість фіксованих та вільних елементів співпадає та більша за 1. В цьому випадку, якщо на графі цієї системи фіксовані та вільні вершини розташовані таким чином, що їх неможливо поділити на пари **ф-в**, ланцюги між якими попарно не перетинаються, то система рівнянь, що побудована для цього графа несутимісна.*

ДОВЕДЕННЯ.

Розглянемо граф довільної системи S, який має по 2 фіксованих та вільних вершини, які розташовані таким чином, що їх неможливо поділити на пари **ф-в**, ланцюги між якими попарно не перетинаються.

Такий граф неважко побудувати на основі графа, що зображений на рис. 2.4, якщо додати між вершинами (наприклад, 1-3, 1-2, 2-5 тощо) цього графа ще деяку кількість вершин, що належать тим самим ланцюгам, що і в графі (рис. 2.4).

Додамо спочатку вершину **q** в ребро 1-2, як це представлено на рис. 2.5.

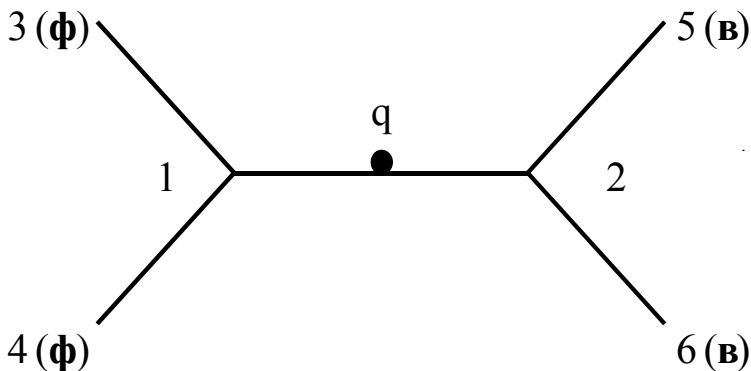


Рис. 2.5. Варіант додаткової вершини в ребрі 1-2

В результаті в систему (2.13) додається ще одне рівняння, і вона набуде вигляду

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{1q}x_q + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 = y_1; \\ a_{2q}x_q + a_{22}x_2 + a_{25}x_5 + a_{26}x_6 = y_2; \\ a_{31}x_1 + a_{33}x_3 = y_3; \\ a_{41}x_1 + a_{44}x_4 = y_4; \\ a_{52}x_2 + a_{55}x_5 = y_5; \\ a_{62}x_2 + a_{66}x_6 = y_6; \\ a_{q1}x_1 + a_{q2}x_2 + a_{qq}x_q = y_q \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Якщо для цієї системи рівнянь виконати підстановки $y_1^* = y_1 - a_{13}x_3 - a_{14}x_4$, $y_3^* = y_3 - a_{33}x_3$, $y_4^* = y_4 - a_{44}x_4$, то система (2.17) набуде вигляду

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{1q}x_q = y_1^*; \\ a_{2q}x_q + a_{22}x_2 + a_{25}x_5 + a_{26}x_6 = y_2; \\ a_{31}x_1 = y_3^*; \\ a_{41}x_1 = y_4^*; \\ a_{52}x_2 + a_{55}x_5 = y_5; \\ a_{62}x_2 + a_{66}x_6 = y_6; \\ a_{q1}x_1 + a_{q2}x_2 + a_{qq}x_q = y_q \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Очевидно, у випадку, якщо $\frac{y_3^*}{a_{31}} \neq \frac{y_4^*}{a_{41}}$, система рівнянь (2.18)

несумісна.

Це означає, що додавання вершин у ребра, які розташовані після точки перетину ланцюгів ф-в, не робить систему рівнянь сумісною, якщо виконуються умови вищенаведеної теореми.

Інакше кажучи, з точки зору однозначної розв'язуваності, система, яка зображена на рис. 2.4, еквівалентна системі, що зображена на рис. 2.5.

Розглянемо тепер випадок, коли вершина q додається в ребро, яке розташоване до точки перетину ланцюгів Φ - Ψ , наприклад, ребро 1-3, як це представлено на рис. 2.6.

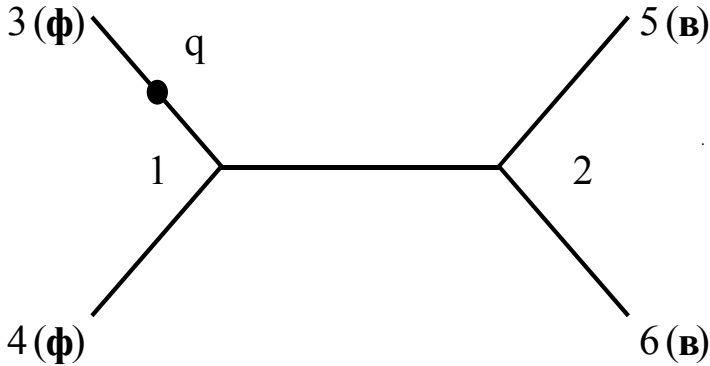


Рис. 2.6 Варіант додаткової вершини в ребрі 1-3

Цій системі буде відповідати така система рівнянь:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{1q}x_q + a_{12}x_2 + a_{14}x_4 = y_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{25}x_5 + a_{26}x_6 = y_2; \\ a_{3q}x_q + a_{33}x_3 = y_3; \\ a_{41}x_1 + a_{44}x_4 = y_4; \\ a_{52}x_2 + a_{55}x_5 = y_5; \\ a_{62}x_2 + a_{66}x_6 = y_6; \\ a_{q1}x_1 + a_{q3}x_3 + a_{qq}x_q = y_q \end{cases} \quad (2.19)$$

З третього рівняння легко знайти x_q .

$$x_q = \frac{y_3 - a_{33}x_3}{a_{3q}}$$

Підставивши це значення у сьоме рівняння, отримаємо

$$a_{q1}x_1 + a_{q3}x_3 + a_{qq} \frac{y_3 - a_{33}x_3}{a_{3q}} = y_q;$$

З цього рівняння легко знайти x_1 .

$$x_1 = \frac{y_q - a_{q3}x_3 - a_{qq} \frac{y_3 - a_{33}x_3}{a_{3q}}}{a_{q1}}$$

Одночасно, з четвертого рівняння випливає, що $x_1 = \frac{y_4 - a_{44}x_4}{a_{41}}$, а

це означає, що в загальному випадку система рівнянь (2.19) теж несумісна, тобто системи, які представлені на рис. 2.4 та рис. 2.6, з точки зору однозначної розв'язуваності еквівалентні.

Очевидно, що при додаванні певної кількості вершин у ребра, які розташовані до точки перетину ланцюгів **Ф-В**, завжди можна виконати певний ланцюг підстановок змінних, який покаже несумісність системи рівнянь.

Таким чином можна стверджувати, що при виконанні умов теореми 2.1, будь-яка система з точки зору однозначної розв'язуваності еквівалентна системі, граф якої зображений на рис. 2.4, тобто її система рівнянь несумісна, що і треба було довести.

Ця теорема дає можливість визначити сумісність лінійної системи рівнянь, що описує функціональні зв'язки між елементами системи S, в залежності від розташування в ній *вільних* та *фіксованих* елементів. Застосування цієї теореми *не вимагає попередніх обчислень*, оскільки вона базується на положеннях теорії графів. Для використання теореми цілком достатньо провести топологічний аналіз графу системи S.

РОЗДІЛ 3

ДЕТЕРМІНІЗАЦІЯ ПРОСТОРУ КОМПЛЕКСНИХ ЕЛЕКТРО-ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА РАХУНОК ЧАСТКОВОГО ВИКОРИСТАННЯ ЛІНІЙНОЇ НЕЕВКЛІДОВОЇ МЕТРИКИ

3.1. Особливості проблеми неповноти вхідних даних при детермінізації режимів електричних мереж

В попередньому розділі досліджувалися умови однозначної детермінізації процесів для широкого кола складних технічних систем в загальному вигляді.

Нагадаємо, що, якщо функція інформаційних витрат обмежена значенням Ω_{lim} , то може так статись, що $\forall i \in \{1, 2, \dots, v\} \{ \Omega(E_i^+) > \Omega_{\text{lim}} \}$, тобто кожний варіант розташування джерел інформації в системі, який дає детермінізуючу комбінацію параметрів, не відповідає обмеженню. Це буде означати, що однозначне відтворення всіх невідомих координат векторів $\mathbf{x}$ та $\mathbf{y}$ неможливе. У цьому випадку можлива квазідетермінізація, тобто відтворення невідомих параметрів з прийнятною похибкою.

Розглянемо деякі суттєві особливості забезпечення телевимірами такого класу технічних систем як системи електропостачання.

Ця проблема має два аспекти. По-перше, розміщення телеметричних пристроїв лише на одній підстанції потребує приблизно 13 тис. у.о. на придбання цих пристроїв та забезпечення надійних каналів зв'язку, а для забезпечення детермінізуючої сукупності параметрів в електропідприємстві середнього розміру (до 200 ТП 110-35 кВ) потрібно витратити до 550 тис. у.о. [37]. Зрозуміло, це дуже великі кошти для вітчизняної енергетики, але вони цілком можливі.

Набагато важливішим є інший аспект цієї проблеми.

Пристрої для виміру комплексних значень потужності в лініях (тобто її активної та реактивної складової) відносно прості за принципом дії та недорого, оскільки кут зсуву фаз визначається між струмом та напругою, що вимірюються на *одній і тій же* лінії.

Що стосується пристроїв для виміру комплексних значень напруги на шинах підстанцій, то в цьому випадку складність полягає в тому, що кут зсуву фаз необхідно визначати між напругами *різних* підстанцій. Це потребує таких великих капіталовкладень, що сьогодні ставить під сумнів доцільність таких вимірів.

Отже сьогодні ми маємо можливість одержувати від телеметричних пристроїв лише модулі напруг у вузлах мережі. А це в свою чергу означає, що при застосуванні теорії детермінізації процесів в склад-

них системах для відтворення режимів електричних мереж ми будемо мати справу не з однозначною детермінізацією, а з квазидетермінізацією.

Тому дуже важливою є розробка математичних моделей та методів, які дозволяють знизити рівень невизначеності вимірів напруг на шинах підстанцій.

3.2. Спосіб детермінізації рівня невизначеності вхідних даних

В цьому розділі запропоновано новий спосіб детермінізації невизначеності вхідних даних, яка пов'язана з практичною неможливістю вимірювання кута зсуву фаз між напругами *різних* підстанцій.

Для того, щоб чіткіше сформулювати мету нашого дослідження, розглянемо простір комплексних електротехнічних параметрів. Його можна представити як двовимірний лінійний метричний простір із евклідовою метрикою. Модуль вектора напруги в будь-якому вузлі мережі в цьому просторі має вигляд: $U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}$, де U_a – активна складова вектора напруги, U_p – реактивна складова вектора напруги.

Для того, щоб підкреслити залежність цієї величини від вибраної метрики простору, назвемо її **евклідовим модулем вектора напруги**. Цей модуль в будь-якому вузлі мережі досить суттєво залежить від параметрів самої мережі, напруги джерела живлення та струмів у гілках мережі.

Але в такому двовимірному лінійному метричному просторі метрика не обов'язково повинна бути евклідовою – вона повинна лише відповідати так званим *аксіомам метрики* [23]:

1. $\rho(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$
2. $\rho(x, y) = \rho(y, x)$
3. $\rho(x, z) \leq \rho(x, y) + \rho(y, z)$,

де $\rho(x, y)$ – відстань в цьому просторі між точками x та y .

Спробуємо знайти деякий певним чином узагальнюючий параметр, який характеризує напругу в будь-якому вузлі мережі, і одночасно набагато менше, ніж евклідовий модуль вектора напруги залежить від параметрів самої мережі, напруги джерела живлення та струмів у гілках мережі.

Одним з напрямів пошуку такого узагальнюючого параметра є використання в просторі комплексних електротехнічних параметрів метрики, відмінної від евклідової.

Відомо, що математики досить часто для вирішення окремих задач використовують різноманітні "неевклідові" метрики [23]. Це можуть

бути лінійні "неєвклідові" метрики, для яких $\rho(x, y)$ – лінійна функція, квадратичні "неєвклідові" метрики, для яких $\rho(x, y)$ – квадратична функція тощо. Детальний порівняльний аналіз цих метрик – це тема окремого дослідження і виходить за межі цього розділу. Відзначимо лише, що для досягнення нашої локальної мети цілком достатньо використати лінійну неєвклідову метрику, для якої

$$\rho(x, y) = \beta |y_1 - x_1| + |y_2 - x_2|, \quad (3.1)$$

де β – коефіцієнт приведення, що є позитивним дійсним числом.

Перевіримо, чи відповідає вираз (3.1) аксіомам метрики.

Для першої аксіоми можна записати:

$$x = y \Rightarrow \rho(x, y) = \beta |x_1 - x_1| + |x_2 - x_2| = 0 \quad (3.2)$$

Друга аксіома буде виглядати так:

$$\beta |y_1 - x_1| + |y_2 - x_2| = \beta |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2| \quad (3.3)$$

Справедливість виразів (3.2) та (3.3) не викликає сумнівів.

Відповідність (3.1) третій аксіомі метрики не так очевидна, тому доведемо, що

$$\beta |x_1 - z_1| + |x_2 - z_2| \leq \beta |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2| + \beta |y_1 - z_1| + |y_2 - z_2| \quad (3.4)$$

Доведення.

Якщо координати векторів x, y, z задовільняють умові $(x_1 \geq y_1 \geq z_1) \wedge (x_2 \geq y_2 \geq z_2)$, то вираз (3.4) набуде вигляду

$$\beta(x_1 - z_1) + (x_2 - z_2) \leq \beta(x_1 - y_1) + (x_2 - y_2) + \beta(y_1 - z_1) + (y_2 - z_2) \quad (3.5)$$

Розкривши у виразі (3.5) дужки, одержимо

$$\beta x_1 - \beta z_1 + x_2 - z_2 \leq \beta x_1 - \beta y_1 + x_2 - y_2 + \beta y_1 - \beta z_1 + y_2 - z_2 \quad (3.6)$$

Після скорочення однакових членів виразу (3.6), отримаємо

$$\beta x_1 - \beta z_1 + x_2 - z_2 = \beta x_1 - \beta z_1 + x_2 - z_2, \quad (3.7)$$

що і треба було довести.

У випадку, якщо координати векторів x, y, z задовільняють умові $(x_1 \leq y_1 \leq z_1) \wedge (x_2 \leq y_2 \leq z_2)$, вираз (3.4) набуде вигляду

$$\begin{aligned} & \beta(-x_1 + z_1) + (-x_2 + z_2) \leq \\ & \beta(-x_1 + y_1) + (-x_2 + y_2) + \beta(-y_1 + z_1) + (-y_2 + z_2) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Після розкриття дужок та скорочення однакових членів, отримаємо

$$-\beta x_1 + \beta z_1 - x_2 + z_2 = -\beta x_1 + \beta z_1 - x_2 + z_2, \quad (3.9)$$

що і треба було довести.

Аналогічно доводиться відповідність виразу (3.1) третій аксіомі метрики і для інших співвідношень координат векторів $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$.

Розглянемо тепер, як з використанням такої метрики буде виглядати модуль вектора напруги в будь-якому вузлі мережі та які властивості він буде мати.

За аналогією зі звичайним евклідовим модулем вектора напруги можна записати

$$U = \beta |U_a| + |U_p| \quad (3.10)$$

Назвемо цю величину **лінійним неевклідовим модулем вектора напруги**. Для визначення властивостей цієї величини розглянемо схему заміщення окремої ділянки електричної мережі (рис. 3.1).

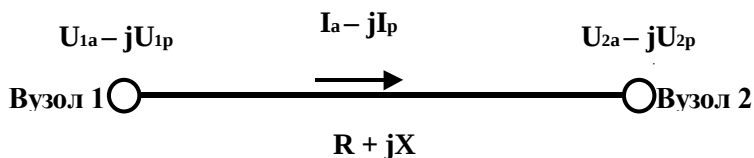


Рис. 3.1. Схема заміщення ділянки електричної мережі.

Позначення на схемі:

$U_{1a} - jU_{1p}$ – комплексна напруга джерела живлення (U_{1a}, U_{1p} – відповідно активна та реактивна складові);

$U_{2a} - jU_{2p}$ – комплексна напруга вузла навантаження (U_{2a}, U_{2p} – відповідно активна та реактивна складові);

$I_a - jI_p$ – комплексний струм лінії (I_a, I_p – відповідно активна та реактивна складові);

$R + jX$ – комплексний опір лінії.

Позначимо лінійні неевклідові модулі векторів напруги першого та другого вузлів відповідно $U_1^\# = \beta |U_{1a}| + |U_{1p}|$ та $U_2^\# = \beta |U_{2a}| + |U_{2p}|$. Знайдемо, як вони залежать від параметрів мережі та струмів.

За законом Ома можна записати

$$U_{2a} - jU_{2p} = U_{1a} - jU_{1p} - \sqrt{3} (I_a - jI_p) (R + jX) =$$

$$U_{1a} - \sqrt{3}I_a R - \sqrt{3}I_p X - jU_{1p} - j\sqrt{3}I_a X + j\sqrt{3}I_p R = \\ U_{1a} - \sqrt{3}(I_a R + I_p X) - j(U_{1p} + \sqrt{3}(I_a X - I_p R)) \quad (3.11)$$

З (3.11) випливає

$$U_{2a} = U_{1a} - \sqrt{3}(I_a R + I_p X), \quad (3.12)$$

$$U_{2p} = U_{1p} + \sqrt{3}(I_a X - I_p R). \quad (3.13)$$

Таким чином

$$U_1^\# = \beta |U_{1a}| + |U_{1p}|, \quad (3.14)$$

$$U_2^\# = \beta |U_{2a}| + |U_{2p}| = \beta |U_{1a} - \sqrt{3}(I_a R + I_p X)| \\ + |U_{1p} + \sqrt{3}(I_a X - I_p R)| \quad (3.15)$$

За аналогією з загальноприйнятою втратою напруги в лінії (рис. 1), яка визначається як

$$\Delta U = \sqrt{U_{1a}^2 + U_{1p}^2} - \sqrt{U_{2a}^2 + U_{2p}^2} \quad (3.16)$$

введемо **лінійну нескладову втрату напруги**, яку визначимо як

$$\Delta U^\# = U_1^\# - U_2^\# = \beta |U_{1a}| + |U_{1p}| - \beta |U_{2a}| - |U_{2p}| = \\ \beta |U_{1a}| + |U_{1p}| - \beta |U_{1a} - \sqrt{3}(I_a R + I_p X)| - |U_{1p} + \sqrt{3}(I_a X - I_p R)| \quad (3.17)$$

У виразі (3.17) розкриємо знак абсолютної величини, враховуючи те, що для мереж 110-35 кВ при індуктивному характері навантаження $U_{1a}, U_{1p}, U_{2a}, U_{2p}, I_a, I_p$ – позитивні дійсні числа.

Крім того, для тих же умов мають місце співвідношення

$$U_{1a} \gg \sqrt{3}(I_a R + I_p X), \quad (3.18)$$

$$I_a X > I_p R \quad (3.19)$$

В результаті отримаємо

$$\Delta U^\# = \beta |U_{1a}| + |U_{1p}| - \beta |U_{1a} - \sqrt{3}(I_a R + I_p X)| \\ - |U_{1p} + \sqrt{3}(I_a X - I_p R)| = \\ \beta U_{1a} + U_{1p} - \beta U_{1a} + \sqrt{3}\beta I_a R + \sqrt{3}\beta I_p X - U_{1p} - \sqrt{3}I_a X + \sqrt{3}I_p R = \\ \sqrt{3}(\beta I_a R + \beta I_p X + I_p R - I_a X) \quad (3.20)$$

Очевидно, що в залежності від параметрів мережі, параметрів режиму та коефіцієнта приведення β , лінійна неевклідова втрата напруги $\Delta U^\#$ (на відміну від звичайної втрати напруги) може дорівнювати 0, а також приймати додатне або від'ємне значення.

Цілком зрозуміло, що для розв'язання квазідетермінізації нас будуть в першу чергу цікавити випадки, нульової лінійної неевклідової втрати напруги, тобто умова $U_1^\# = U_2^\#$, тому сформулюємо і доведемо відповідну теорему, а саме:

ТЕОРЕМА 3.1.

Для мереж 110-35 кВ при індуктивному характері навантаження лінійна неевклідова втрата напруги в лінії дорівнює 0 тоді та лише тоді, коли виконується умова $\frac{R_0}{X_0} = \frac{1 - \beta \tan \varphi}{\beta + \tan \varphi}$, де R_0 – питомий активний опір лінії, X_0 – питомий індуктивний опір лінії, φ – кут зсуву фаз між напругою і струмом, β – коефіцієнт приведення.

ДОВЕДЕННЯ.

Розв'яжемо рівняння

$$\Delta U^\# = \sqrt{3} \left(\beta I_a R + \beta I_p X + I_p R - I_a X \right) = 0. \quad (3.21)$$

Якщо I – модуль струму, то $I_a = I \cos \varphi$; $I_p = I \sin \varphi$.

Крім того, $R = R_0 L$, $X = X_0 L$, де L – довжина лінії.

З урахуванням цих співвідношень рівняння (3.21) можна записати у вигляді

$$\sqrt{3} I \left(\beta R_0 L \cos \varphi + \beta X_0 L \sin \varphi + R_0 L \sin \varphi - X_0 L \cos \varphi \right) = 0 \quad (3.22)$$

Розділивши ліву та праву частину рівняння (3.22) на $\sqrt{3} I L \cos \varphi$, отримаємо

$$\beta R_0 + \beta X_0 \tan \varphi + R_0 \tan \varphi - X_0 = R_0 (\beta + \tan \varphi) - X_0 (1 - \beta \tan \varphi) = 0 \quad (3.23)$$

З рівняння (3.23) випливає $R_0 (\beta + \tan \varphi) = X_0 (1 - \beta \tan \varphi)$ та

$\frac{R_0}{X_0} = \frac{1 - \beta \tan \varphi}{\beta + \tan \varphi}$, що і доводить теорему для усіх випадків, окрім тих, для яких $I = 0$, або $\cos \varphi = 0$, які ми виключаємо з розгляду, як такі, що в практиці не мають місця.

Умова $\frac{R_0}{X_0} = \frac{1 - \beta \tan \varphi}{\beta + \tan \varphi}$ може бути записана і в інших формах.

Очевидно, що мають місце тотожності:

$$\frac{R_0}{X_0} = \frac{1 - \beta \tan \varphi}{\beta + \tan \varphi} \Leftrightarrow \tan \varphi = \frac{X_0 - \beta R_0}{\beta X_0 + R_0} \Leftrightarrow \beta = \frac{X_0 - R_0 \tan \varphi}{X_0 \tan \varphi + R_0} \quad (3.24)$$

Отже за виконання однієї з умов (3.24) для будь-якої лінії 110-35 кВ при індуктивному характері навантаження має місце рівняння $U_1^\# = U_2^\#$, тобто лінійний неевклідовий модуль напруги на початку лінії дорівнює лінійному неевклідовому модулю напруги в кінці лінії.

3.3. Оцінка меж використання отриманого способу детермінації

Проаналізуємо умови (3.24) теореми 3.1 з точки зору її використання для моделей квазидетермінації.

Очевидно, що питомий активний опір лінії R_0 та питомий індуктивний опір лінії X_0 є сталими величинами і від нас не залежать.

Кут зсуву фаз між напругою та струмом φ хоч і постійно змінюється (правда в досить вузьких межах), але теж є незалежною величиною.

Тож єдиною величиною, на яку може впливати дослідник для забезпечення умови $U_1^\# = U_2^\#$, є коефіцієнт приведення β .

В таблиці 3.1 наведені значення β , які забезпечують справедливості теореми в залежності від значень R_0 , X_0 та $\cos \varphi$.

Вони розраховані для повітряних ліній для діапазону перерізів від 50 до 240 мм² та значень $\cos \varphi$ від 0.85 до 0.99.

Як видно з таблиці, в цих діапазонах β може приймати значення від 0.887 до 2.141.

Із викладеного вище бачимо, що вибираючи для кожної лінії певного перерізу та з деяким значенням коефіцієнта потужності відповідне значення β , ми можемо забезпечити виконання умови $U_1^\# = U_2^\#$.

Розглянемо випадки, коли умови (3.24) не виконуються.

Із рівнянь (3.21), (3.24) маємо нерівності

$$\beta > \frac{X_0 - R_0 \tan \varphi}{X_0 \tan \varphi + R_0} \Rightarrow \Delta U^\# > 0, \quad (3.25)$$

$$\beta < \frac{X_0 - R_0 \tan \varphi}{X_0 \tan \varphi + R_0} \Rightarrow \Delta U^\# < 0 \quad (3.26)$$

Таблиця 3.1

Залежність коефіцієнта приведення β від конструктивних параметрів лінії та коефіцієнта потужності $\cos \varphi$

Переріз, мм ²	50	70	95	120	150	185	240
R_0 , Ом/км	0.603	0.428	0.31	0.25	0.199	0.158	0.122
X_0 , Ом/км	0.452	0.441	0.43	0.423	0.417	0.41	0.401
$\cos \varphi$							
0.85	0.089	0.251	0.413	0.523	0.642	0.757	0.878
0.86	0.108	0.271	0.435	0.548	0.67	0.788	0.913
0.87	0.128	0.293	0.459	0.574	0.699	0.821	0.95
0.88	0.149	0.315	0.485	0.602	0.73	0.856	0.99
0.89	0.171	0.339	0.511	0.632	0.764	0.894	1.034
0.90	0.195	0.364	0.54	0.664	0.8	0.935	1.081
0.91	0.219	0.391	0.571	0.698	0.839	0.98	1.134
0.92	0.245	0.42	0.604	0.736	0.882	1.03	1.192
0.93	0.273	0.451	0.641	0.777	0.93	1.086	1.258
0.94	0.304	0.486	0.681	0.823	0.984	1.149	1.333
0.95	0.338	0.524	0.727	0.876	1.046	1.223	1.422
0.96	0.376	0.568	0.78	0.938	1.12	1.311	1.529
0.97	0.42	0.62	0.843	1.012	1.21	1.42	1.665
0.98	0.474	0.684	0.924	1.108	1.328	1.566	1.849
0.99	0.549	0.774	1.039	1.248	1.504	1.79	2.141

Виконаємо порівняльний аналіз відносних звичайної та неевклідової втрат напруги для одного з розповсюджених перерізів 120 мм^2 при досить характерному для мережі 110 кВ значенню $\cos \varphi = 0.92$. Втрати напруги будемо визначати при значенні модуля струму 100 А та довжині лінії $L = 30 \text{ км}$. Неевклідову втрату напруги будемо розраховувати при різних значеннях коефіцієнта приведення β . Для спрощення приймемо $U_1 = U_{1a} = 115 \text{ кВ}$, $U_{1p} = 0$.

Розрахунок відносних втрат будемо вести за формулами

$$\frac{\Delta U}{U_1} = 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{\sqrt{3}IL(R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi)}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}IL(X_0 \cos \varphi - R_0 \sin \varphi)}{U_1}\right)^2}, \quad (3.27)$$

$$\frac{\Delta U^\#}{U_1^\#} = \frac{\sqrt{3}IL(\beta R_0 \cos \varphi + \beta X_0 \sin \varphi + R_0 \sin \varphi - X_0 \cos \varphi)}{U_1^\#} \quad (3.28)$$

Результати розрахунків зведемо в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2

Звичайна та неевклідова втрати напруги в лінії АС-120 при $\cos\varphi=0.92$, $I=100$ А, $L=30$ км і різних коефіцієнтах приведення.

ΔU %	$\Delta U^\#$ %	
1.78	$\beta = 0.6$	- 0.24
	$\beta = 0.7$	- 0.06
	$\beta = 0.736$	0
	$\beta = 0.8$	0.11
	$\beta = 0.9$	0.29

Проаналізуємо результати, які наведено в таблицях 3.1 та 3.2.

Очевидно, що, навіть, якщо дослідник неточно спрогнозує $\cos\varphi$ в лінії та відповідно неточно визначить коефіцієнт приведення β , то значення $\Delta U^\#$ і в цьому випадку буде у 6 – 15 разів менше за значення ΔU .

Це робить доцільним використання лінійного неевклідового модуля вектора напруги $U^\#$ в моделях евристичної квазідетермінізації при відтворенні режимів електричних мереж. Для цього треба провести розрахунок режиму мережі при середньостатистичних навантаженнях, визначити такі значення коефіцієнта приведення β , які забезпечують для кожної лінії $\Delta U^\#=0$, і після цього визначити значення $U^\#$ в кожному вузлі. Якщо припустити, що значення $\cos\varphi$ в лініях при поточних навантаженнях залишаються незмінними, то можна вважати, що і значення $U^\#$ в кожному вузлі при поточних навантаженнях теж не зміняться, і отримавши від телеметричних пристроїв значення модулів напруг в вузлах, можна буде розрахувати активну та реактивну складові напруги вузла.

Оскільки в мережах 110-35 кВ значення $\cos\varphi$ коливаються в досить вузьких межах, похибка визначення активної та реактивної складових напруги вузла буде цілком прийнятною для задачі відтворення режимів електричних мереж.

РОЗДІЛ 4

НЕТРАДИЦІЙНІ ОПЕРАЦІЇ ТА ПРИНЦИПИ УЗАГАЛЬНЕННЯ В МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЯХ НЕЧІТКОЇ КВАЗІДЕТЕРМІНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

4.1. Межі використання принципу узагальнення Заде. Про доцільність введення в теорію нечітких множин слабких операцій та слабких принципів узагальнення

Як показано в розділі 2, у випадку відсутності детермінуючої сукупності відомих параметрів системи (незалежно від причин цієї відсутності: внаслідок обмежених коштів чи з технічних причин) однозначна детермінізація процесів в системі неможлива. В цьому випадку має місце так звана квазидетермінізація, яка полягає в тому, щоб якимось чином визначити невідомі параметри системи з прийнятною в межах задачі похибкою.

Нагадаємо, що під параметрами системи ми будемо розуміти найбільш загальну множину параметрів, що включає і параметри режиму.

Одним з видів квазидетермінізації, як ми уже відзначали раніше, є *нечітка* квазидетермінізація.

Вона полягає в тому, що невідомі параметри системи представляються у вигляді нечітких регулярних чисел і далі застосовуються ідеї та методи теорії нечітких множин.

Розглянемо детальніше це питання.

Загальновідомо, що поняття нечіткої множини, яке було запропоновано в 1965р. Л.Заде [79], одразу викликало велику зацікавленість у математиків і у науковців інших галузей та стимулювало появу великої кількості робіт в цьому напрямку. Вже через 2 роки Гоген розширив це поняття до L-нечітких множин [72], далі були введені інтервальна нечітка пряма, регулярні нечіткі числа та нечіткі метричні простори [64, 73], нечіткі топологічні простори [60], нечіткі відношення та відображення [25], поняття та теореми нечіткої алгебри [67÷71, 74, 78].

Були виконані численні розробки в напрямку розв'язання прикладних задач [3, 8, 9, 14, 18, 30, 32 – 34, 46, 50].

Всі ці доробки з незначними варіаціями базувались на відомому максимінному принципі узагальнення Заде (ММПУ) [79], який цілком задовольняв дослідників.

Але існує досить багато прикладних задач, для яких використання максимінного принципу узагальнення стримує їх розв'язання. Справа

в тому, що застосування ММПУ потребує повної інформації про функції належності нечітко визначених параметрів задачі, а це, на жаль, часто буває практично нездійсненною процедурою. Однією з таких задач є нечітка квазидетермінізація процесів в системах електропостачання.

Для такої системи навіть найдосвідченіший експерт може визначити для невідомих нечітких параметрів системи лише їх носії або окремі множини α -рівня. Побудова на цій основі повних функцій належності невідомих нечітких параметрів є справою ризикованою та ненадійною.

Таким чином видається доцільним розширити аксіоматику теорії нечітких множин з метою введення нетрадиційних (менш вимогливих до повноти даних про функції належності) принципів узагальнення та операцій над нечіткими множинами.

В роботі [41] вперше пропонується нетрадиційний клас таких операцій – так звані **слабкі операції** над нечіткими множинами – далі, вводячи нові поняття, ми будемо слідувати саме цій роботі.

Загальновідомо, що кожній операції над класичними канторовськими множинами можна поставити у відповідність безліч аналогічних операцій над нечіткими множинами. Існує лише одна обов'язкова умова, якій повинні відповідати кожна з цих операцій, а саме – вона повинна зводитись до відповідної класичної операції у випадку виродження нечітких множин до класичних канторівських множин.

Розглянемо це на прикладі відношення **нестрогого включення**.

Л.Заде означив це відношення, як

$$\tilde{A} \supseteq \tilde{B} \stackrel{def}{\Leftrightarrow} \forall x \in X (\mu_A(x) \geq \mu_B(x)), \quad (4.1)$$

де $\tilde{A}, \tilde{B}$ – довільні нечіткі множини; X – універсум, на якому вони визначені; $\mu_A(x), \mu_B(x)$ – функції належності цих нечітких множин.

З точки зору теорії нечітких множин, функція належності класичної канторовської множини A в X має вигляд $\mu_A: X \rightarrow \{0, 1\}$, а для самої множини A можна записати

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | \forall x \in X (x \in A \Leftrightarrow \mu_A(x) = 1)\} \quad (4.2)$$

Означення відношення **включення** для класичних множин A і B , виражене через їх функції належності має вигляд

$$A \supseteq B \stackrel{def}{\Leftrightarrow} \forall x \in X (\mu_B(x) = 1 \Rightarrow \mu_A(x) = 1) \quad (4.3)$$

Означення, яке послабляє вимоги до функцій належності $\mu_A(x), \mu_B(x)$ в порівнянні з (4.1), не вимагає, щоб виконувалась умова $\mu_A(x) \geq$

$\mu_B(x)$ та базується на множинах α -рівня нечітких множин $\tilde{A}, \tilde{B}$, пропонується називати **нестрогим α -слабким включенням** (позначається $\overset{\alpha}{\supseteq}$) та записувати у вигляді

$$\overset{\alpha}{\supseteq} \overset{def}{\tilde{B}} \Leftrightarrow \forall x \in X (\mu_B(x) \geq \alpha \Rightarrow \mu_A(x) \geq \alpha), \alpha \in (0, 1] \quad (4.4)$$

В граничному випадку, відношення, що базується на носіях нечітких множин $\tilde{A}, \tilde{B}$ пропонується називати просто **нестрогим слабким включенням** або **нестрогим 0 -слабким включенням** (позначається $\overset{0}{\supseteq}$). Його означення можна записати у вигляді

$$\overset{0}{\supseteq} \overset{def}{\tilde{B}} \Leftrightarrow \forall x \in X (\mu_B(x) > 0 \Rightarrow \mu_A(x) > 0) \quad (4.5)$$

Означення для відношення **α -слабкої рівності** між нечіткими множинами $\tilde{A}, \tilde{B}$ в X запропоновано у вигляді

$$\overset{\alpha}{=} \overset{def}{\tilde{B}} \Leftrightarrow \forall x \in X (\mu_B(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha), \alpha \in (0, 1] \quad (4.6)$$

Для **слабкої рівності** можна записати

$$\overset{0}{=} \overset{def}{\tilde{B}} \Leftrightarrow \forall x \in X (\mu_B(x) > 0 \Leftrightarrow \mu_A(x) > 0) \quad (4.7)$$

Розглянемо означення для інших основних відношень між нечіткими множинами та операцій над ними.

Прийнято, що **α -слабке об'єднання** нечітких множин $\tilde{A}$ та $\tilde{B}$ в X за визначенням є нечіткою множиною $\tilde{C} = \overset{\alpha}{\tilde{A}} \overset{\alpha}{\cup} \tilde{B}$ в X такою, що

$$\forall x \in X (\mu_C(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha \vee \mu_B(x) \geq \alpha), \alpha \in (0, 1] \quad (4.8)$$

Слабке об'єднання нечітких множин $\tilde{A}$ та $\tilde{B}$ в X – це нечітка множина $\tilde{C} = \overset{0}{\tilde{A}} \overset{0}{\cup} \tilde{B}$ в X така, що

$$\forall x \in X (\mu_C(x) > 0 \Leftrightarrow \mu_A(x) > 0 \vee \mu_B(x) > 0) \quad (4.9)$$

Нарешті, **α -слабким перетином** нечітких множин $\tilde{A}$ та $\tilde{B}$ в X будемо називати нечітку множину $\tilde{C} = \overset{\alpha}{\tilde{A}} \overset{\alpha}{\cap} \tilde{B}$ в X таку, що

$$\forall x \in X (\mu_C(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha \wedge \mu_B(x) \geq \alpha), \alpha \in (0, 1] \quad (4.10)$$

і, відповідно, **слабким перетином** нечітких множин $\tilde{A}$ та $\tilde{B}$ в X є нечітка множина $\tilde{C} = \overset{0}{\tilde{A}} \overset{0}{\cap} \tilde{B}$ в X така, що

$$\forall x \in X (\mu_C(x) > 0 \Leftrightarrow \mu_A(x) > 0 \wedge \mu_B(x) > 0) \quad (4.11)$$

Означення більш складної операції декартового добутку нечітких множин пропонується таким:

α -слабкий декартів добуток нечітких множин $\tilde{A}_i$ в X_i , $i=1, \dots, n$ – це нечітка множина $\tilde{A} = \tilde{A}_1^{\alpha} \times \tilde{A}_2^{\alpha} \times \dots \times \tilde{A}_n^{\alpha}$ в $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ така, що

$$\forall x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X (\mu_A(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{A_1}(x_1) \geq \alpha \wedge \mu_{A_2}(x_2) \geq \alpha \wedge \dots \wedge \mu_{A_n}(x_n) \geq \alpha), \quad (4.12)$$

де $\alpha \in (0, 1]$

Відповідно **слабким декартовим добутком** нечітких множин $\tilde{A}_i$ в X_i , $i=1, \dots, n$ називається нечітка множина $\tilde{A} = \tilde{A}_1^0 \times \tilde{A}_2^0 \times \dots \times \tilde{A}_n^0$ в $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ така, що

$$\forall x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X (\mu_A(x) > 0 \Leftrightarrow \mu_{A_1}(x_1) > 0 \wedge \mu_{A_2}(x_2) > 0 \wedge \dots \wedge \mu_{A_n}(x_n) > 0) \quad (4.13)$$

4.2. Аксиоматика слабких операцій та слабких принципів узагальнення в теорії нечітких множин

Зберігаючи основні ідеї та принципи, на яких базується клас слабких відношень та операцій над нечіткими множинами, побудуємо цілісну та несуперечну аксіоматичну теорію таких операцій, що дозволяє її подальший розвиток.

Введемо означення операції **α -слабкого доповнення**.

Традиційним доповненням нечіткої множини $\tilde{A}$ в X прийнята нечітка множина $\bar{\tilde{A}}$ в X , для якої виконується умова

$$\forall x \in X (\mu_{\bar{\tilde{A}}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x)) \quad (4.14)$$

Нагадаємо, що для класичних канторівських множин доповненням множини A вважається множина $\bar{A}$, така що

$$\forall x \in X (\mu_A(x) = 1 \Leftrightarrow \mu_{\bar{A}}(x) = 0) \quad (4.15)$$

За аналогією з (4.15), означення операції α -слабкого доповнення пропонується сформулювати так:

Нечітка множина $\tilde{A}$ в X є **α -слабким доповненням** нечіткої множини $\tilde{A}$ в X тоді та лише тоді, коли

$$\forall x \in X (\mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\bar{\tilde{A}}}(x) < \alpha) \quad (4.16)$$

З (4.16) випливає, що

$$\forall x \in X (\mu_{\tilde{A}}(x) < \alpha \Leftrightarrow \mu_{\bar{\tilde{A}}}(x) \geq \alpha) \quad (4.17)$$

Аналогічно означенню (4.16) для операції слабкого доповнення можна записати:

Нечітка множина $\tilde{A}$ в X є **слабким доповненням** нечіткої множини $\tilde{A}$ в X тоді та лише тоді, коли

$$\forall x \in X (\mu_A(x) > 0 \Leftrightarrow \mu_{\bar{A}}(x) = 0) \quad (4.18)$$

З (4.18) випливає, що

$$\forall x \in X (\mu_A(x) = 0 \Leftrightarrow \mu_{\bar{A}}(x) > 0) \quad (4.19)$$

Якщо проаналізувати усі вищенаведені означення α -слабких операцій, то можна прийти до висновку, що результати α -слабких операцій неоднозначні. На відміну від традиційних операцій над нечіткими множинами, результатом будь-якої α -слабкої операції є не певна нечітка множина, а сукупність нечітких множин, кожна з яких задовольняє заданим умовам. Ця неоднозначність дає можливість оперувати з нечіткими множинами, функції належності яких не повністю задані або задані неточно. Саме такі функції найчастіше отримуються за допомогою експертних процедур.

Очевидно, що α -слабкі операції над нечіткими множинами повинні мати такі ж властивості, як і аналогічні операції над класичними канторівськими множинами, тобто для них мають бути справедливими такі ж теореми, як і для класичних множин.

Сформулюємо і доведемо аналогічні теореми для α -слабких операцій.

Теореми ідемпотентності.

Теорема 4.1.

Операція α -слабкого об'єднання ідемпотентна, тобто

$$\tilde{A} \overset{\alpha}{\cup} \tilde{A} = \tilde{A} \quad (4.20)$$

Доведення.

Розглянемо нечітку множину $\tilde{C} = \tilde{A} \overset{\alpha}{\cup} \tilde{A}$ в X . Згідно з означенням операції α -слабкого об'єднання, для довільного елемента $x \in X$ можна записати $\mu_C(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha \vee \mu_A(x) \geq \alpha$. Оскільки логічна операція $\vee$ ідемпотентна, тобто $\mu_A(x) \geq \alpha \vee \mu_A(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha$, то для довільного елемента $x \in X$ буде справедливим $\mu_C(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha$, що і потрібно було довести.

З теореми 4.1 випливає, що операція слабкого об'єднання нечітких множин також ідемпотентна, тобто

$$\tilde{A} \overset{0}{\cup} \tilde{A} = \tilde{A} \quad (4.21)$$

За допомогою аналогічних міркувань можна довести, що операції α -слабкого та слабкого перетину теж ідемпотентні тобто

$$\tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} \tilde{A} = \tilde{A}, \quad (4.22)$$

$$\overset{0}{\tilde{A}} \overset{0}{\cap} \tilde{A} = \tilde{A} \quad (4.23)$$

Теорема дистрибутивності.

Теорема 4.2.

Операція α -слабкого перетину нечітких множин дистрибутивна, тобто

$$\tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} (\tilde{B} \overset{\alpha}{\cup} \tilde{C}) = (\tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} \tilde{B}) \overset{\alpha}{\cup} (\tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} \tilde{C}) \quad (4.24)$$

Доведення.

Розглянемо нечіткі множини $\tilde{C}_1 = \tilde{B} \overset{\alpha}{\cup} \tilde{C}$, $\tilde{D}_1 = \tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} \tilde{C}_1$, $\tilde{C}_2 = \tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} \tilde{B}$, $\tilde{C}_3 = \tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} \tilde{C}$, $\tilde{D}_2 = \tilde{C}_2 \overset{\alpha}{\cup} \tilde{C}_3$. Згідно з означеннями операцій α -слабкого об'єднання та перетину для довільного елемента $x \in X$ можна записати

$$\mu_{C_1}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_B(x) \geq \alpha \vee \mu_C(x) \geq \alpha, \quad (4.25)$$

$$\mu_{D_1}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha \wedge \mu_{C_1}(x) \geq \alpha, \quad (4.26)$$

$$\mu_{C_2}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha \wedge \mu_B(x) \geq \alpha, \quad (4.27)$$

$$\mu_{C_3}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha \wedge \mu_C(x) \geq \alpha, \quad (4.28)$$

$$\mu_{D_2}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{C_2}(x) \geq \alpha \vee \mu_{C_3}(x) \geq \alpha \quad (4.29)$$

Виконавши підстановку еквівалентних виразів для логічних змінних $\mu_{C_1}(x) \geq \alpha$, $\mu_{C_2}(x) \geq \alpha$ та $\mu_{C_3}(x) \geq \alpha$ з логічних рівнянь (4.25, 4.27, 4.28) в логічні рівняння (4.26, 4.29) отримаємо

$$\mu_{D_1}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha \wedge (\mu_B(x) \geq \alpha \vee \mu_C(x) \geq \alpha), \quad (4.30)$$

$$\mu_{D_2}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow (\mu_A(x) \geq \alpha \wedge \mu_B(x) \geq \alpha) \vee (\mu_A(x) \geq \alpha \wedge \mu_C(x) \geq \alpha) \quad (4.31)$$

Оскільки логічна операція $\wedge$ дистрибутивна, то для довільного елемента $x \in X$ можна стверджувати, що $\mu_{D_1}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{D_2}(x) \geq \alpha$, що і потрібно було довести.

З теореми 4.2 випливає, що операція слабкого перетину нечітких множин також дистрибутивна, тобто

$$\overset{0}{\tilde{A}} \overset{0}{\cap} (\overset{0}{\tilde{B}} \overset{0}{\cup} \overset{0}{\tilde{C}}) = (\overset{0}{\tilde{A}} \overset{0}{\cap} \overset{0}{\tilde{B}}) \overset{0}{\cup} (\overset{0}{\tilde{A}} \overset{0}{\cap} \overset{0}{\tilde{C}}) \quad (4.32)$$

За допомогою аналогічних міркувань можна довести, що операції α -слабкого та слабкого об'єднання теж дистрибутивні, тобто

$$\tilde{A} \overset{\alpha}{\cup} (\tilde{B} \overset{\alpha}{\cap} \tilde{C}) = (\tilde{A} \overset{\alpha}{\cup} \tilde{B}) \overset{\alpha}{\cap} (\tilde{A} \overset{\alpha}{\cup} \tilde{C}), \quad (4.33)$$

$$\overset{0}{\tilde{A}} \overset{0}{\cup} (\overset{0}{\tilde{B}} \overset{0}{\cap} \overset{0}{\tilde{C}}) = (\overset{0}{\tilde{A}} \overset{0}{\cup} \overset{0}{\tilde{B}}) \overset{0}{\cap} (\overset{0}{\tilde{A}} \overset{0}{\cup} \overset{0}{\tilde{C}}) \quad (4.34)$$

Теореми інволюції.

Теорема 4.3.

Для будь-якої нечіткої множин $\tilde{A}$ в X , α -слабке доповнення її α -слабкого доповнення α -слабко дорівнює самій нечіткій множині $\tilde{A}$, тобто

$$\frac{\alpha}{\frac{\alpha}{(\tilde{A})}} = \tilde{A} \quad (4.35)$$

Доведення.

Розглянемо нечіткі множини $\tilde{B} = \frac{\alpha}{\tilde{A}}$ та $\tilde{C} = \frac{\alpha}{\tilde{B}}$ в X . Згідно з (4.16, 4.17), для довільного елемента $x \in X$ можна записати $\mu_{\tilde{B}}(x) < \alpha \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha$ та $\mu_{\tilde{C}}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\tilde{B}}(x) < \alpha$. Таким чином, для довільного елемента $x \in X$ буде справедливою еквівалентність $\mu_{\tilde{C}}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha$, що і потрібно було довести.

З теореми 4.3 випливає, що для будь-якої нечіткої множин $\tilde{A}$ в X , слабке доповнення її слабкого доповнення слабко дорівнює самій нечіткій множині $\tilde{A}$, тобто

$$\frac{0}{\frac{0}{(\tilde{A})}} = \tilde{A} \quad (4.36)$$

Теореми де Моргана.

Теорема 4.4.

α -слабке доповнення α -слабкого об'єднання нечітких множин $\tilde{A}$ та $\tilde{B}$ в X α -слабко дорівнює α -слабкому перетину α -слабких доповнень цих нечітких множин, тобто

$$\frac{\alpha}{(\tilde{A} \cup \tilde{B})} = \frac{\alpha}{\tilde{A}} \cap \frac{\alpha}{\tilde{B}} \quad (4.37)$$

Доведення.

Розглянемо нечіткі множини $\tilde{C}_1 = \frac{\alpha}{\tilde{A} \cup \tilde{B}}$, $\tilde{C}_2 = \frac{\alpha}{\tilde{A}} \cap \frac{\alpha}{\tilde{B}}$ та $\tilde{C}_3 = \frac{\alpha}{\tilde{C}_1}$ в X . Згідно з означеннями відповідних операцій, для довільного елемента $x \in X$ можна записати

$$\mu_{\tilde{C}_1}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha \vee \mu_{\tilde{B}}(x) \geq \alpha, \quad (4.38)$$

$$\mu_{\tilde{C}_2}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) < \alpha \wedge \mu_{\tilde{B}}(x) < \alpha, \quad (4.39)$$

$$\mu_{\tilde{C}_3}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\tilde{C}_1}(x) < \alpha \quad (4.40)$$

Враховуючи те, що $\mu_{\tilde{C}_1}(x) < \alpha \Leftrightarrow \neg(\mu_{\tilde{C}_1}(x) \geq \alpha)$, виконаємо підстановку еквівалентного виразу для логічної змінної $\mu_{\tilde{C}_1}(x) \geq \alpha$ з

логічного рівняння (4.38) в логічне рівняння (4.40) та в результаті отримаємо

$$\mu_{C3}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \neg(\mu_A(x) \geq \alpha \vee \mu_B(x) \geq \alpha) \quad (4.41)$$

Оскільки $\mu_A(x) < \alpha \Leftrightarrow \neg(\mu_A(x) \geq \alpha)$ та $\mu_B(x) < \alpha \Leftrightarrow \neg(\mu_B(x) \geq \alpha)$ вираз (4.39) можна записати у вигляді

$$\mu_{C2}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \neg(\mu_A(x) \geq \alpha) \wedge \neg(\mu_B(x) \geq \alpha) \quad (4.42)$$

Виходячи з аналогічного логічного закону де Моргана

$$\neg(\mu_A(x) \geq \alpha \vee \mu_B(x) \geq \alpha) \Leftrightarrow \neg(\mu_A(x) \geq \alpha) \wedge \neg(\mu_B(x) \geq \alpha) \quad (4.43)$$

та з виразів (4.41, 4.42) можна записати $\mu_{C3}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{C2}(x) \geq \alpha$, що і потрібно було довести.

З теореми 4.4 випливає, що слабке доповнення слабого об'єднання нечітких множин $\tilde{A}$ та $\tilde{B}$ в X слабко дорівнює слабкому перетину слабких доповнень цих нечітких множин, тобто

$$\frac{0}{0} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ (\tilde{A} \cup \tilde{B}) = \tilde{\tilde{A}} \cap \tilde{\tilde{B}} \quad (4.44)$$

За допомогою аналогічних міркувань можна довести справедливості і другої теореми де Моргана для α -слабких та слабких операцій, а саме

$$\frac{\alpha}{\alpha} \quad \alpha \quad \alpha \quad \alpha \quad \alpha \\ (\tilde{A} \cap \tilde{B}) = \tilde{\tilde{A}} \cup \tilde{\tilde{B}}, \quad (4.45)$$

$$\frac{0}{0} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ (\tilde{A} \cap \tilde{B}) = \tilde{\tilde{A}} \cup \tilde{\tilde{B}} \quad (4.46)$$

Окрім вищезгаданих теорем, в класичній теорії множин мають також місце теореми, що характеризують операції між нечіткими множинами та універсумом чи пустою множиною.

Перевіримо дійсність аналогічних теорем для класу α -слабких операцій.

Теорема 4.5.

α -слабке об'єднання нечіткої множини $\tilde{A}$ в X та пустої множини $\emptyset$ α -слабко дорівнює самій нечіткій множині $\tilde{A}$ в X , тобто

$$\tilde{\tilde{A}} \cup \emptyset = \tilde{A} \quad (4.47)$$

Доведення.

Розглянемо нечітку множину $\tilde{B} = \tilde{\tilde{A}} \cup \emptyset$ в X . Згідно з означенням операції α -слабкого об'єднання, для довільного елемента $x \in X$ можна записати $\mu_B(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha \vee \mu_{\emptyset}(x) \geq \alpha$. Оскільки за означенням

пустої множини $\emptyset$ $\mu_{\emptyset}(x)=0$, то $\mu_A(x) \geq \alpha \vee \mu_{\emptyset}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha$. Отже, $\mu_B(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha$, що і потрібно було довести.

Аналогічно, слабе об'єднання нечіткої множини $\tilde{A}$ в X та пустої множини $\emptyset$ слабко дорівнює самій нечіткій множині $\tilde{A}$ в X , тобто

$$\tilde{A} \overset{0}{\cup} \overset{0}{\emptyset} = \tilde{A} \quad (4.48)$$

Теорема 4.6.

α -слабкий перетин нечіткої множини $\tilde{A}$ в X та пустої множини $\emptyset$ α -слабко дорівнює пустій множині $\emptyset$, тобто

$$\tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} \overset{\alpha}{\emptyset} = \emptyset \quad (4.49)$$

Доведення.

Розглянемо нечітку множину $\tilde{B} = \tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} \overset{\alpha}{\emptyset}$ в X . Згідно з означенням операції α -слабкого перетину, для довільного елемента $x \in X$ можна записати $\mu_B(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha \wedge \mu_{\emptyset}(x) \geq \alpha$. Оскільки за означенням пустої множини $\emptyset$ $\mu_{\emptyset}(x)=0$, то $\mu_A(x) \geq \alpha \wedge \mu_{\emptyset}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\emptyset}(x) \geq \alpha$. Отже, $\mu_B(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\emptyset}(x) \geq \alpha$, що і потрібно було довести.

Аналогічно, слабкий перетин нечіткої множини $\tilde{A}$ в X та пустої множини $\emptyset$ слабко дорівнює пустій множині $\emptyset$, тобто

$$\tilde{A} \overset{0}{\cap} \overset{0}{\emptyset} = \emptyset \quad (4.50)$$

Теорема 4.7.

α -слабке об'єднання нечіткої множини $\tilde{A}$ в X з універсумом X α -слабко дорівнює універсуму X , тобто

$$\tilde{A} \overset{\alpha}{\cup} \overset{\alpha}{X} = X \quad (4.51)$$

Доведення.

Розглянемо нечітку множину $\tilde{B} = \tilde{A} \overset{\alpha}{\cup} \overset{\alpha}{X}$ в X . Згідно з означенням операції α -слабкого об'єднання, для довільного елемента $x \in X$ можна записати $\mu_B(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \alpha \vee \mu_X(x) \geq \alpha$. Оскільки за означенням універсуму для усіх $x \in X$ $\mu_X(x)=1$, то $\mu_A(x) \geq \alpha \vee \mu_X(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_X(x) \geq \alpha$. Отже, $\mu_B(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_X(x) \geq \alpha$, що і потрібно було довести.

Аналогічно, слабе об'єднання нечіткої множини $\tilde{A}$ в X з універсумом X слабко дорівнює універсуму X , тобто

$$\tilde{A} \overset{0}{\cup} \overset{0}{X} = X \quad (4.52)$$

Теорема 4.8.

α -слабкий перетин нечіткої множини $\tilde{A}$ в X з універсумом X α -слабо дорівнює самій нечіткій множині $\tilde{A}$ в X , тобто

$$\tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} X = \tilde{A} \quad (4.53)$$

Доведення.

Розглянемо нечітку множину $\tilde{B} = \tilde{A} \overset{\alpha}{\cap} X$ в X . Згідно з означенням операції α -слабкого перетину, для довільного елемента $x \in X$ можна записати $\mu_{\tilde{B}}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha \wedge \mu_X(x) \geq \alpha$. Оскільки за означенням універсуму для усіх $x \in X$ $\mu_X(x) = 1$, то $\mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha \wedge \mu_X(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha$. Отже, $\mu_{\tilde{B}}(x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha$, що і потрібно було довести.

Аналогічно, слабкий перетин нечіткої множини $\tilde{A}$ в X з універсумом X слабо дорівнює самій нечіткій множині $\tilde{A}$ в X , тобто

$$\tilde{A} \overset{0}{\cap} X = \tilde{A} \quad (4.54)$$

Окремо розглянемо теореми, що характеризують α -слабкі операції між нечіткими множинами та їх α -слабкими доповненнями.

Для канторівських множин існують теореми

$$A \cup \bar{A} = X, \quad (4.55)$$

$$A \cap \bar{A} = \emptyset \quad (4.56)$$

В традиційній теорії нечітких множин аналогічні теореми відсутні.

Що стосується слабких операцій між нечіткими множинами, то має місце така теорема:

Теорема 4.9.

Слабкий перетин нечіткої множини $\tilde{A}$ в X з її слабким доповненням $\overset{0}{\tilde{A}}$ в X слабо дорівнює пустій множині $\emptyset$, тобто

$$\tilde{A} \overset{0}{\cap} \overset{0}{\tilde{A}} = \emptyset \quad (4.57)$$

Доведення.

Розглянемо нечіткі множини $\tilde{B} = \tilde{A}$ та $\tilde{C} = \overset{0}{\tilde{A}} \overset{0}{\cap} \tilde{B}$ в X . Згідно з означенням операції слабкого перетину та з (4.18, 4.19), для довільного елемента $x \in X$ можна записати

$$\mu_{\tilde{B}}(x) > 0 \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) = 0, \quad (4.58)$$

$$\mu_{\tilde{C}}(x) > 0 \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) > 0 \wedge \mu_{\tilde{B}}(x) > 0 \quad (4.59)$$

Виконавши підстановку еквівалентного виразу для логічної змінної $\mu_{\tilde{B}}(x) > 0$ з логічного рівняння (4.58) в логічне рівняння (4.59) отримаємо $\mu_{\tilde{C}}(x) > 0 \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) > 0 \wedge \mu_{\tilde{A}}(x) = 0$. Оскільки $\mu_{\tilde{A}}(x) > 0 \wedge \mu_{\tilde{A}}(x) = 0 \Leftrightarrow \text{False}$, то $\mu_{\tilde{C}}(x) = 0$, що і потрібно було довести.

Розглянемо тепер α -слабкі операції над бінарними нечіткими відношеннями (БНВ).

Нагадаємо, що бінарне нечітке відношення $(\tilde{A}, X)$ – це нечітка множина, яка визначена на декартовому квадраті $X \times X$ і для якої справедливо:

$$\forall x, y \in X (\mu_{\tilde{A}}(x, y) \in [0, 1]) \quad (4.60)$$

Оскільки БНВ є звичайною нечіткою множиною з тією лише різницею, що її елементи – впорядковані пари декартового квадрату універсуму X , то для БНВ мають місце усі введені перед цим α -слабкі операції (об'єднання, перетину, доповнення, різниці тощо).

Разом з тим, для БНВ додатково можна ввести операції, яких немає для звичайних нечітких множин.

Так, для БНВ існує обернене відношення, означення якого в традиційній теорії записується, як:

$(\tilde{A}^{-1}, X)$ є оберненим відношенням до $(\tilde{A}, X)$ тоді та лише тоді, коли

$$\forall x, y \in X \left(\mu_{\tilde{A}^{-1}}(y, x) = \mu_{\tilde{A}}(x, y) \right) \quad (4.61)$$

Дотримуючись принципів побудови класу слабких операцій, для α -слабого оберненого відношення можна записати:

$(\tilde{A}^{\alpha^{-1}}, X)$ є **α -слабким оберненим відношенням** до $(\tilde{A}, X)$ тоді та лише тоді, коли

$$\forall x, y \in X \left(\mu_{\tilde{A}^{\alpha^{-1}}}(y, x) \geq \alpha \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x, y) \geq \alpha \right) \quad (4.62)$$

Відповідно,

$(\tilde{A}^{0^{-1}}, X)$ є **слабким оберненим відношенням** до $(\tilde{A}, X)$ тоді та лише тоді, коли

$$\forall x, y \in X \left(\mu_{\tilde{A}^{0^{-1}}}(y, x) > 0 \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x, y) > 0 \right) \quad (4.63)$$

Сформулюємо тепер означення для слабкої композиції нечітких відношень.

Нагадаємо, що традиційна максимінна композиція нечітких відношень формулюється так:

Нечітке відношення $(\tilde{A}_1 \circ \tilde{A}_2, X)$ є максимінною композицією нечітких відношень $(\tilde{A}_1, X)$ та $(\tilde{A}_2, X)$ за визначенням тоді та лише тоді, коли

$$\forall x, y \in X (\mu_{\tilde{A}_1 \circ \tilde{A}_2}(x, y) = \max_{z \in X} \min (\mu_{\tilde{A}_1}(x, z), \mu_{\tilde{A}_2}(z, y))) \quad (4.64)$$

Означення для α -слабкої композиції може бути записане так:

Нечітке відношення $\left(\tilde{A}_1 \overset{\alpha}{\approx} \tilde{A}_2, X \right)$ є **α -слабкою композицією**

нечітких відношень $(\tilde{A}_1, X)$ та $(\tilde{A}_2, X)$ за визначенням тоді та лише тоді, коли

$$\forall x, y \in X (\mu_{A_1 \circ A_2}(x, y) \geq \alpha \Leftrightarrow \exists z \in X (\mu_{A_1}(x, z) \geq \alpha \wedge \mu_{A_2}(z, y) \geq \alpha)), \alpha \in (0, 1] \quad (4.65)$$

Із (4.65) випливає, що нечітке відношення $\left(\tilde{A}_1 \overset{0}{\approx} \tilde{A}_2, X \right)$ є **0-слабкою композицією** нечітких відношень $(\tilde{A}_1, X)$ та $(\tilde{A}_2, X)$ тоді та лише тоді, коли

$$\forall x, y \in X (\mu_{A_1 \circ A_2}(x, y) > 0 \Leftrightarrow \exists z \in X (\mu_{A_1}(x, z) > 0 \wedge \mu_{A_2}(z, y) > 0)) \quad (4.66)$$

Тепер перейдемо до відображень нечітких множин та принципів узагальнення.

Як відомо, принцип узагальнення – це спосіб визначення образу нечіткої множини при чіткому або нечіткому відображенні.

Таких способів може бути безліч, але всі вони повинні задовольняти двом умовам:

1. Образ будь-якої нечіткої множини незалежно від характеру відображення є теж нечітка множина.

2. Будь-який принцип узагальнення не повинен суперечити означенню чіткого відображення класичних канторівських множин.

Означення найбільш розповсюдженого в традиційній теорії нечітких множин максимінного принципу узагальнення для чіткого відображення нечітких множин можна сформулювати так:

Нечітка множина $f(\tilde{A})$ в Y є образом нечіткої множини $\tilde{A}$ в X при чіткому відображенні $f: X \rightarrow Y$ за означенням тоді та лише тоді, коли

$$\forall y \in Y \left(\mu_{f(\tilde{A})}(y) = \max_{x \in f^{-1}(y)} \mu_{\tilde{A}}(x) \right), \quad (4.67)$$

де $f^{-1}(y)$ – прообраз елемента $y \in Y$ при чіткому відображенні $f: X \rightarrow Y$.

Максимінний принцип узагальнення для нечіткого відображення нечітких множин можна записати так:

Нечітка множина $\tilde{f}(\tilde{A})$ в Y є образом нечіткої множини $\tilde{A}$ в X при нечіткому відображенні $\tilde{f}: X \rightarrow Y$ за означенням тоді та лише тоді, коли

$$\forall y \in Y \left(\mu_{\tilde{f}(\tilde{A})}(y) = \max_{x \in X} \min \left(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{f}}(x, y) \right) \right) \quad (4.68)$$

Сформулюємо тепер більш загальні ніж (4.67, 4.68) та менш вимогливі до повноти даних про функції належності принципи узагальнення для чітких та нечітких відображень нечітких множин.

Принципи α -слабкого узагальнення для чітких відображень нечітких множин

Означення принципу *α -слабкого узагальнення* для чітких відображень нечітких множин формулюється так:

Нечітка множина $f(\tilde{A})$ в Y є *α -слабким образом* нечіткої множини $\tilde{A}$ в X при чіткому відображенні $f: X \rightarrow Y$ за означенням тоді та лише тоді, коли

$$\forall y \in Y (\mu_{f(\tilde{A})}(y) \geq \alpha \Leftrightarrow \exists x \in f^{-1}(y) (\mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha)), \quad (4.69)$$

де $f^{-1}(y)$ – прообраз елемента $y \in Y$ при чіткому відображенні $f: X \rightarrow Y$.

Відповідно, для принципу *слабкого узагальнення* для чітких відображень нечітких множин можна записати:

Нечітка множина $f(\tilde{A})$ в Y є *слабким образом* нечіткої множини $\tilde{A}$ в X при чіткому відображенні $f: X \rightarrow Y$ за означенням тоді та лише тоді, коли

$$\forall y \in Y (\mu_{f(\tilde{A})}(y) > 0 \Leftrightarrow \exists x \in f^{-1}(y) (\mu_{\tilde{A}}(x) > 0)) \quad (4.70)$$

Принципи α -слабкого узагальнення для нечітких відображень нечітких множин

Означення принципу *α -слабкого узагальнення* для нечітких відображень нечітких множин можна записати як:

Нечітка множина $\tilde{f}(\tilde{A})$ в Y є *α -слабким образом* нечіткої множини $\tilde{A}$ в X при нечіткому відображенні $\tilde{f}: X \rightarrow Y$ за означенням тоді та лише тоді, коли

$$\forall y \in Y (\mu_{\tilde{f}(\tilde{A})}(y) \geq \alpha \Leftrightarrow \exists x \in X (\mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha \wedge \mu_{\tilde{f}}(x, y) \geq \alpha)), \quad (4.71)$$

де $\mu_{\tilde{f}}: X \times Y \rightarrow [0, 1]$ – функція належності нечіткого відображення $\tilde{f}: X \rightarrow Y$.

Відповідно, для принципу *слабкого узагальнення* для нечітких відображень нечітких множин можна записати:

Нечітка множина $\tilde{f}(\tilde{A})$ в Y є *слабким образом* нечіткої множини $\tilde{A}$ в X при нечіткому відображенні $\tilde{f}: X \rightarrow Y$ за означенням тоді та лише тоді, коли

$$\forall y \in Y (\mu_{\tilde{f}(\tilde{A})}(y) > 0 \Leftrightarrow \exists x \in X (\mu_{\tilde{A}}(x) > 0 \wedge \mu_{\tilde{f}}(x, y) > 0)) \quad (4.72)$$

4.3. Основні принципи побудови моделей нечіткої квазідетермінізації процесів в складних системах з використанням слабких принципів узагальнення

Аналізуючи запропоновані принципи α -слабкого узагальнення (4.69 – 4.72), легко побачити, що вони визначають не один образ нечіткої множини, а ціле сімейство можливих образів, серед яких утримуються і образи, одержані за допомогою традиційних принципів узагальнення (наприклад, ММПУ). Принципи слабкого узагальнення дозволяють сформувати образ нечіткого параметра в умовах неповності заданої функції належності цього параметра.

Розглянемо питання про побудову моделей нечіткої квазідетермінізації процесів в складних системах в умовах неповно заданих функцій належності вхідних параметрів, базуючись на принципах слабкого узагальнення.

Нагадаємо (див. розділ 2), що в загальному випадку модель нечіткої квазідетермінізації можна записати у вигляді

$$(y_v, y_{n+}, y_{n-}) = Z\left(x_v, x_{n+}, x_{n-}\right)\left(C, \|p_{ij}\|\right), \quad (4.73)$$

де y_v, x_v – відомі параметри; y_{n+}, x_{n+} – невідомі параметри, які можна однозначно відтворити; y_{n-}, x_{n-} – невідомі параметри, які неможливо однозначно відтворити.

Будемо вважати апіорі відомими структуру C та матрицю властивостей $\|p_{ij}\|$. В цьому випадку вираз (4.73) можна записати у вигляді

$$(y_v, y_{n+}, y_{n-}) = F(x_v, x_{n+}, x_{n-}), \quad (4.74)$$

де F – функціональна залежність між векторами вхідних та вихідних даних, яка враховує структуру системи та матрицю властивостей її елементів.

Зрозуміло, що в залежності від характеру функції F вираз (4.74) може бути представлений як система рівнянь (лінійних, квадратних, кубічних, поліноміальних, тригонометричних, логарифмічних тощо) і конкретні алгоритми розв'язання такої системи будуть значно відрізнятися один від одного.

Тому сформулюємо хоча б основні принципи побудови моделей нечіткої квазідетермінізації.

Очевидно, що відомі параметри (y_v, x_v) та невідомі параметри (y_{n+}, x_{n+}) , які можна однозначно відтворити, немає ніякого сенсу

представляти у вигляді нечітких множин. Це викликало б значне ускладнення системи рівнянь.

Нечіткими множинами слід представляти лише невідомі параметри (y_{n-}, x_{n-}) , які неможливо однозначно відтворити.

Для того, щоб була можливість застосувати принципи α -слабкого узагальнення, необхідно отримати від експертів деякий спектр множин α -рівнів $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n)$ для всіх координат одного з векторів невідомих параметрів (наприклад, вихідного y_{n-}).

Далі для кожного з α -рівнів складається система нечітких рівнянь. При цьому, якщо задані нечіткі множини будуть визначені на числовій прямій R , то це будуть інтервальні рівняння, які розв'язуються набагато легше.

В результаті буде отримано аналогічний спектр множин α -рівнів $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n)$ для всіх координат вхідного (x_{n-}) вектора невідомих параметрів.

Дуже важливим є те, що досить часто експерт не може визначитись з формами функцій належності нечітких координат одного вектора, але може значно легше це зробити за отриманим спектром множин α -рівнів іншого вектора. Саме в цих випадках принципи α -слабкого узагальнення практично не мають альтернативи.

РОЗДІЛ 5

РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАДАЧ НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ ДЕТЕРМІНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

5.1. Синтез алгоритмів розташування джерел інформації у вузлах електричної мережі з урахуванням умов неможливості відтворення режиму

В розділі 2 були розглянуті умови однозначної детермінізації процесів для довільних складних систем.

В цьому розділі ми будемо застосовувати ідеї та методи детермінізації процесів в складних системах для розв'язання задачі відтворення режимів електричної мережі.

Почнемо з принципів розташування джерел телеметричної інформації у вузлах електричної мережі. Оскільки ми будемо при цьому користуватися положеннями теорії графів, нагадаємо, що *ступінь вершини* графа – це кількість ребер, що відходять від цієї вершини.

Для прикладу розглянемо невелику електричну мережу, граф якої зображено на рис.5.1.

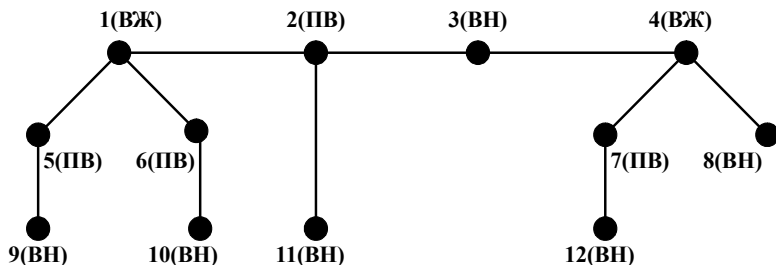


Рис. 5.1. Граф електричної мережі

Всі вузли електричної мережі (тобто вершини її графа) зручно поділити на:

- вузли живлення (ВЖ) – вузли, через які в електричну мережу надходить електроенергія від енергосистеми;
- вузли навантаження (ВН) – вузли, через які споживачі отримують електроенергію з електричної мережі;
- проміжні вузли (ПЖ) – вузли, які не мають безпосереднього зв'язку ані з енергосистемою, ані зі споживачами.

Очевидно, що мережа (рис.5.1) має 12 вузлів, з них 2 вузли живлення (№№ 1, 4), 4 проміжних вузлів (№№ 2, 5 – 7) та 6 вузлів навантаження (№№ 3, 8 – 12).

В свою чергу джерела інформації (телеметричні пристрої) поділяються на:

- телеметричні пристрої, що вимірюють параметри вершин графа електричної мережі (сенсори напруги, встановлені на шинах трансформаторних підстанцій);
- телеметричні пристрої, що вимірюють параметри ребер графа електричної мережі (сенсори активної та реактивної потужності, встановлені на лініях, які відходять від шин трансформаторних підстанцій).

Ці сенсори ми будемо позначати на схемах літерами U, P, Q.

Очевидно, що, якщо у якомусь вузлі (назвемо його *телеметричним* вузлом) встановити сенсор напруги, а на всіх лініях, які відходять від цього вузла, встановити сенсори активної та реактивної потужності, то за законом Ома легко знайти напругу в кожному із суміжних з ним вузлів.

При цьому можливі три випадки:

1. Якщо вузол, суміжний з *телеметричним* вузлом, є вузлом живлення або вузлом навантаження і його *ступінь вершини* більша за **1**, то для нього виявляється відомою лише напруга, а вузловий струм є невідомим.

2. Якщо вузол, суміжний з *телеметричним* вузлом, є вузлом живлення або вузлом навантаження і його *ступінь вершини* дорівнює **1**, то для нього виявляється відомою як напруга, так і вузловий струм (який визначається показами сенсорів активної та реактивної потужності на цій лінії). Користуючись введеною в розділі 2 термінологією, такий вузол будемо називати *фіксованим* (**Φ**).

3. Якщо вузол, суміжний з *телеметричним* вузлом є проміжним вузлом, то, незалежно від *ступеня* його *вершини*, для нього є відомою як напруга, так і вузловий струм (який дорівнює **0**). Такий вузол теж буде *фіксованим* (**Φ**).

Нагадаємо, що серед всіх можливих варіантів розташування телеметричних пристроїв в мережі, які забезпечують детермінізуючу сукупність відомих параметрів, можна вибрати оптимальний за умовою (2.3).

Функцію інформаційних витрат (2.2) для електричної мережі S можна представити у вигляді

$$\Omega(S) = \sum_{i=1}^k \sigma_i(g), \quad (5.1)$$

де $\Omega(S)$ – загальна вартість джерел інформації, якими обладнані підстанції електричної мережі; k – кількість підстанцій електричної мережі, які обладнані джерелами інформації; $\varpi_i(g)$ – вартість обладнання i -ої підстанції джерелами інформації.

Вартість джерела інформації складається з двох основних складових – з вартості засобів зв'язку та вартості телеметричних пристроїв, тому (5.1) можна записати у вигляді

$$\Omega(S) = \sum_{i=1}^k (\varpi_i(z) + \varpi_i(d)), \quad (5.2)$$

де $\varpi_i(z)$ – вартість обладнання i -ої підстанції засобами зв'язку; $\varpi_i(d)$ – вартість обладнання i -ої підстанції телеметричними пристроями.

Особливістю електричних мереж є те, що для них має місце співвідношення

$$\forall i \in \{1, \dots, k\} (\varpi_i(z) > \varpi_i(d)) \quad (5.3)$$

Перед тим, як сформулювати основні топологічні принципи оптимального розташування джерел інформації в електричній мережі, для забезпечення однозначної детермінізації, введемо деякі означення.

Нехай множина M – це множина усіх вузлів довільної мережі.

Після обладнання деякої кількості вузлів (та ліній, що від них відходять) джерелами інформації, множину M можна розбити на дві підмножини, а саме:

- Підмножину Y , параметри режиму якої повністю відомі завдяки телеметричним вимірам.
- Підмножину N , параметри режиму якої або зовсім невідомі, або відомі лише частково.

Оскільки підмножини Y та N за визначенням взаємно не перетинаються, то для них має місце $Y \cap N = \emptyset$.

З вищевведених означень випливає

$$M = Y \cup N \quad (5.4)$$

В свою чергу, підмножину Y теж можна представити як

$$Y = \Theta \cup F, \quad (5.5)$$

де Θ – підмножина *телеметричних* вузлів мережі, F – підмножина *фіксованих* вузлів мережі.

При цьому, підмножини *телеметричних* та *фіксованих* вузлів теж взаємно не перетинаються, тобто $\Theta \cap F = \emptyset$.

Аналогічно, для підмножини N можна записати

$$N = V \cup P, \quad (5.6)$$

де V – підмножина *вільних* вузлів мережі, P – підмножина вузлів мережі, для яких відома тільки напруга.

Для підмножин V та P теж має місце $V \cap P = \emptyset$.

Очевидно, що підмножини Y та N з'єднані між собою деякою кількістю ліній зв'язку, тому виділимо в Y підмножину $G \subseteq Y$ всіх вузлів, кожен з яких з'єднаний хоча б з одним із вузлів з підмножини N . Підмножину G ми надалі будемо називати *границею* підмножини Y .

По суті, підмножина G буде складатися з вузлів живлення підмножини N .

Розглянемо нову підмножину $D = G \cup N$. Саме для неї необхідно проводити відтворення режиму мережі (однозначну детермінізацію), оскільки решта вузлів мережі ($M \setminus D$), по-перше, не з'єднані з вузлами підмножини N , а, по-друге, мають повністю відомі параметри режиму.

З урахуванням (5.6) для підмножини D можна записати

$$D = G \cup V \cup P \quad (5.7)$$

Оскільки підмножини G , V , P взаємно не перетинаються, то має місце співвідношення

$$\text{Card}(D) = \text{Card}(G) + \text{Card}(V) + \text{Card}(P), \quad (5.8)$$

де $\text{Card}(D)$, $\text{Card}(G)$, $\text{Card}(V)$, $\text{Card}(P)$ – відповідно потужності множин D , G , V , P .

В розділі 2 було доведено, що однією з умов однозначної детермінізації процесів в системі є однакова кількість *вільних* та *фіксованих* елементів.

Оскільки підмножина V складається з *вільних* вузлів, а підмножина G – з *фіксованих* або *телеметричних* вузлів (з точки зору забезпеченості параметрами ці вузли еквівалентні), то для підмножини D ця умова однозначної детермінізації може бути записана як

$$\text{Card}(G) = \text{Card}(V) \quad (5.9)$$

З виразів (5.8) та (5.9) випливає, що для довільної мережі джерела інформації повинні бути розташовані таким чином, щоб виконувалася умова

$$\text{Card}(D) = 2\text{Card}(G) + \text{Card}(P) \quad (5.10)$$

або

$$\text{Card}(D) = 2\text{Card}(V) + \text{Card}(P) \quad (5.11)$$

Розглянемо можливе розміщення джерела інформації на прикладі мережі, яка була наведена на рис. 5.1.

Покажемо це розташування на рис. 5.2.

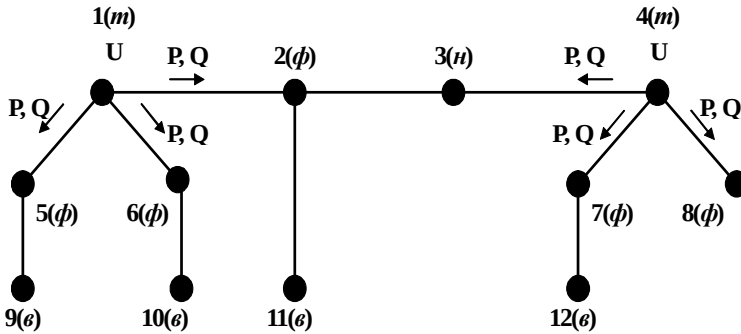


Рис. 5.2. Розташування джерел інформації на графі мережі

Оскільки має місце співвідношення (5.3), то джерела інформації доцільно у першу чергу встановлювати у тих вузлах мережі (вершинах графу), які мають найбільшу *ступінь вершини*, а також на всіх лініях, що відходять від цих вузлів. Як правило, в реальних електричних мережах найбільшу *ступінь вершини* мають вузли живлення (тобто шини живильних підстанцій), тому вони і є першочерговими кандидатами на встановлення джерел інформації.

В схемі рис. 5.2 джерелами живлення є вузли №№ 1, 4, тому встановимо в кожному з них по одному сенсору **U**, та по три пари сенсорів **P** та **Q**, в результаті чого вузли №№ 1, 4 стануть *телеметричними* вузлами (вони отримають статус **m**).

Звідси випливає, що для цієї мережі підмножина $\Theta = \{1, 4\}$.

Оскільки вузол № 3 є вузлом навантаження та його *ступінь вершини* більша за **1**, для нього буде відомою тільки напруга (тобто, він отримує статус **η**).

Таким чином визначиться підмножина $P = \{3\}$.

Вузол № 8 (вузол навантаження, *ступінь вершини* якого дорівнює **1**) та проміжні вузли №№ 2, 5, 6, 7 стануть *фіксованими* (отримають статус **φ**). Таким чином визначиться підмножина $F = \{2, 5, 6, 7, 8\}$.

Згідно (5.5) для мережі (рис. 5.2) можна знайти підмножину **Y**:

$$Y = \{1, 2, 4, 5, 6, 7, 8\} \quad (5.12)$$

З (5.4) випливає, що

$$N = M \setminus Y = \{3, 9, 10, 11, 12\} \quad (5.13)$$

Нарешті, згідно (5.6) визначимо підмножину **V** (тобто підмножину *вільних* вузлів, які отримають статус **ε**).

$$V = N \setminus P = \{9, 10, 11, 12\} \quad (5.14)$$

Легко бачити, що вузлами живлення підмножини N є вузли №№ 2, 5, 6, 7, які і утворюють підмножину G (тобто $G = \{2, 5, 6, 7\}$).

Таким чином, згідно (5.7) отримаємо

$$D = G \cup V \cup P = \{2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12\} \quad (5.15)$$

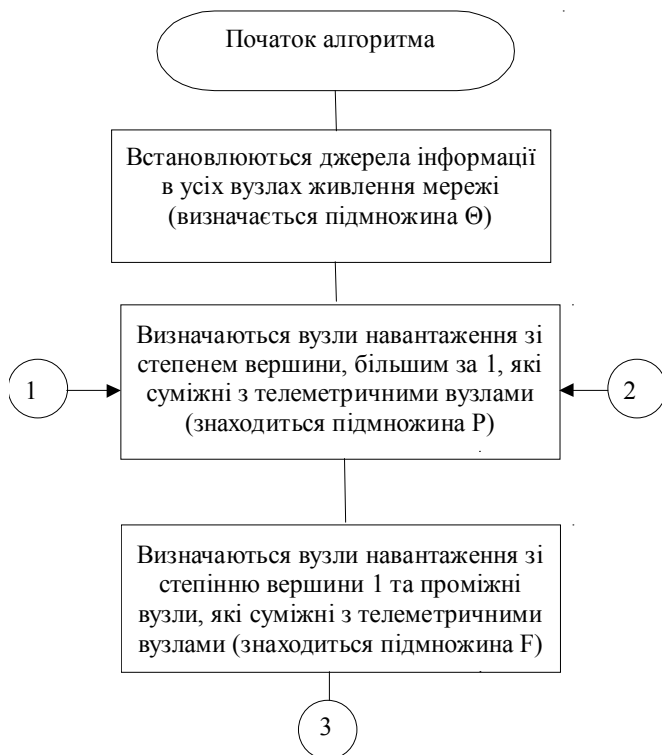
Перевіримо, тепер, чи виконується умова (5.10) однозначної детермінізації. $Card(D) = 9$, $Card(G) = 4$, $Card(P) = 1$.

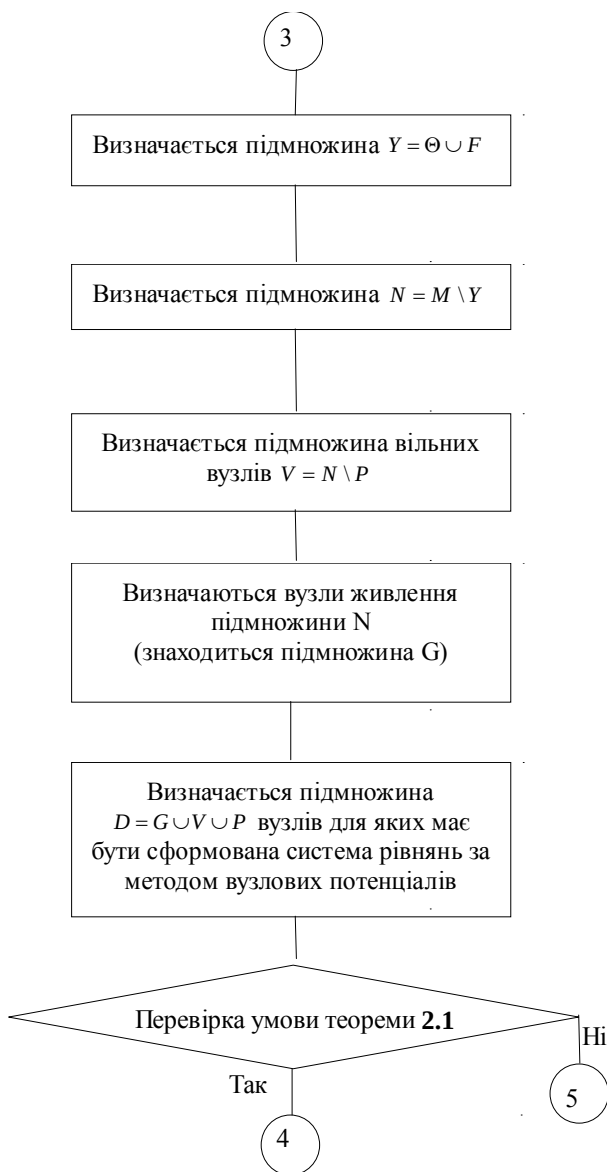
Отже дійсно $Card(D) = 2Card(G) + Card(P)$, а це означає, що обладнання джерелами інформації додаткових вузлів непотрібне.

Очевидно, також, що в цій мережі при вибраному розташуванні джерелами інформації виконується умова теореми 2.1, тобто цю мережу можна поділити на пари вузлів Φ -в так, що ланцюги, які з'єднують ці вузли взаємно не перетинаються.

Тепер ми маємо все для того, щоб побудувати алгоритм оптимального розташування джерел інформації в електричній мережі, для забезпечення однозначної детермінізації.

Цей алгоритм представлено на рис. 5.3.





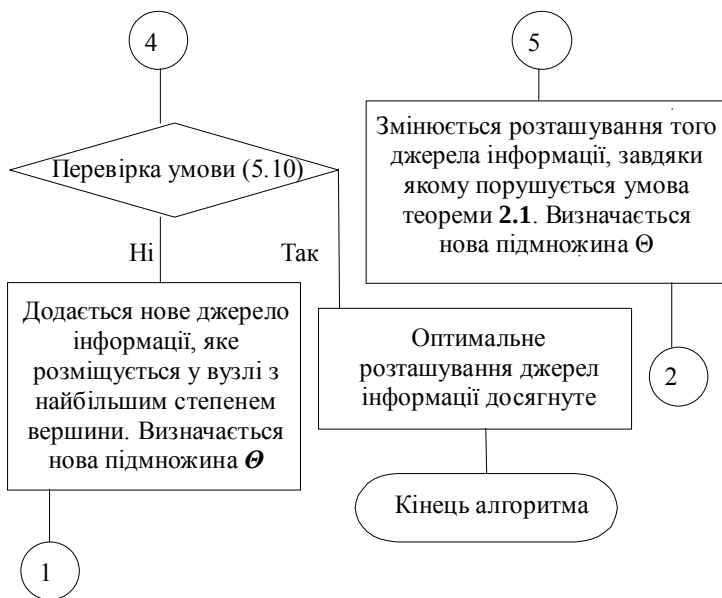
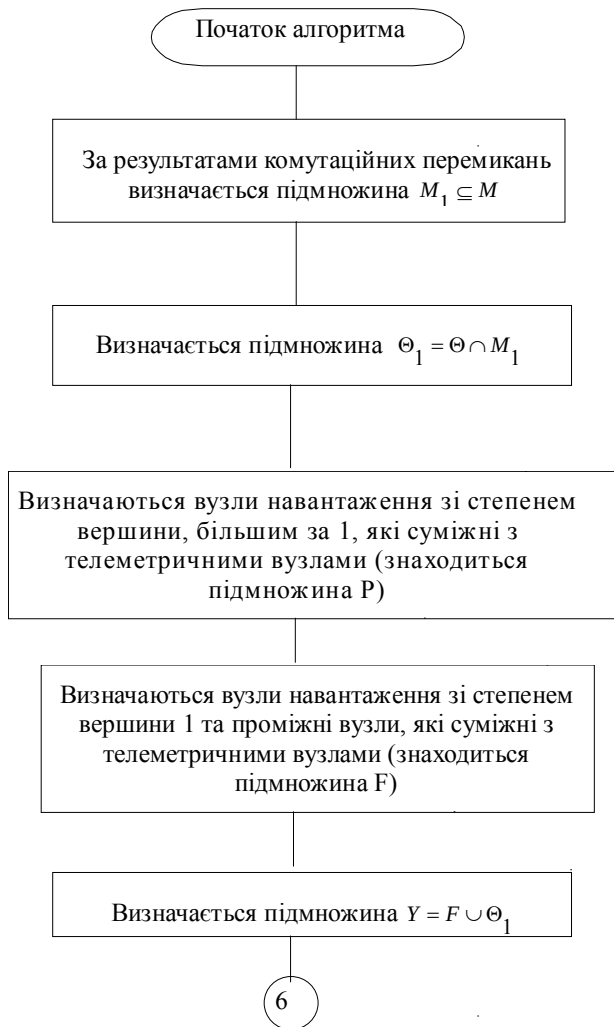


Рис. 5.3. Алгоритм визначення оптимального розташування джерел інформації в електричній

Припустимо, що оптимальне розміщення джерел інформації в електричній мережі, яке забезпечує однозначну детермінізацію, досягнуте.

Разом з тим, електрична мережа характеризується частими комутаційними перемиканнями (тобто, зміною структури). Це призводить до того, що деякі вузли мережі час від часу від'єднуються від джерел живлення, тобто множина M зменшується. Тому, зрозуміло, в процесі відтворення режиму мережі повинна існувати процедура, яка буде при будь-якому комутаційному перемиканні в мережі визначати *вільні* та *фіксовані* вузли, тобто автоматично формувати систему рівнянь за методом вузлових напруг.

Алгоритм такої процедури наведено на рис. 5.4.



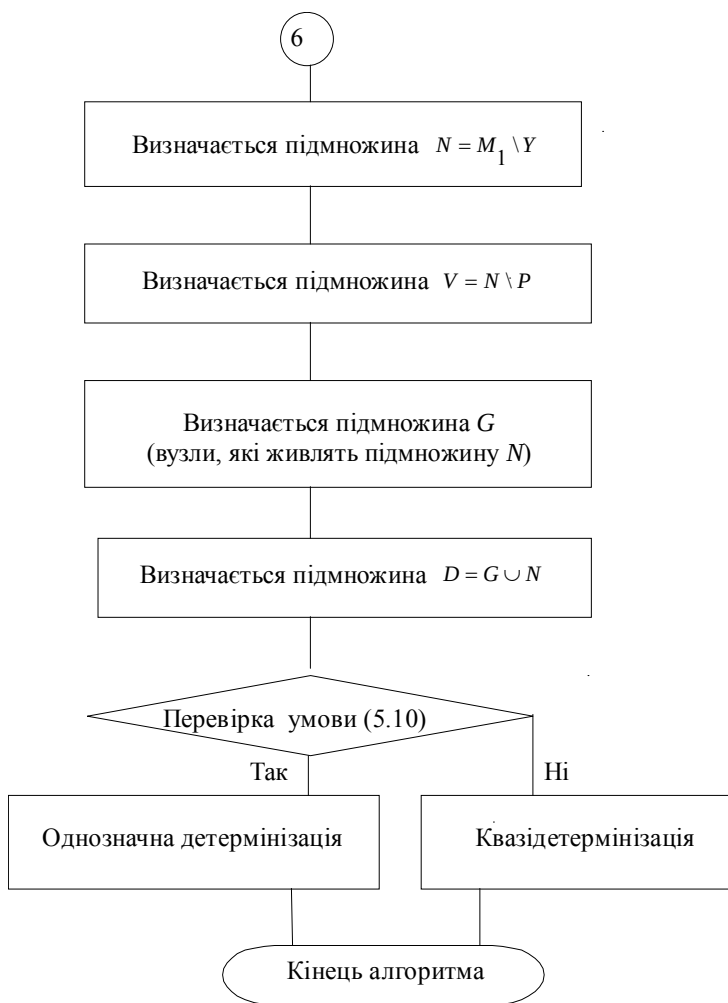


Рис. 5.4. Алгоритм визначення фіксованих та вільних вузлів з урахуванням комутаційних перемикачів

Неважко помітити, що алгоритм, представлений на рис. 5.4, на відміну від алгоритму, представленого на рис. 5.3, має такі особливості:

1. В результаті комутаційних перемикачів деякі *телеметричні* вузли можуть не увійти до множини M_1 і до підмножини Θ_1 . Звід-

сила впливає, що не буде забезпечена детермінізуюча сукупність параметрів, тобто не буде виконана умова (5.10). В цьому випадку ми маємо справу із задачею квазидетермінізації, моделі та алгоритми якої будуть розглянуті в п.п. 5.2, 5.3.

2. Оскільки при розміщенні джерел інформації вже було забезпечено виконання умови теореми 2.1, алгоритмом, представленим на рис. 5.4, ця умова не перевіряється.

5.2. Розробка математичної моделі евристичної квазидетермінізації для розв'язання задачі відтворення режиму електричної мережі та її алгоритмізація

В попередньому параграфі ми з'ясували, що навіть у випадку наявності в мережі достатньої кількості джерел інформації, які забезпечують детермінізуючу сукупність параметрів, в результаті комутаційних перемикачів можуть виникати ситуації, коли деякі джерела інформації не будуть з'єднані з мережею, що призведе до порушення умови (5.10). Це буде означати неможливість однозначного відтворення режиму мережі (однозначної детермінізації).

На жаль, в реальних мережах ситуація виявляється набагато гіршою. Як вже було показано в розділі 3, без дуже значних капіталовкладень ми маємо можливість одержувати від телеметричних пристроїв лише модулі напруг у вузлах мережі. А це в свою чергу означає, що при відтворенні режимів електричних мереж, незалежно від виконання умови (5.10), ми будемо мати справу не з однозначною детермінізацією, а з квазидетермінізацією. Нагадаємо (див. розділ 2), що із загальних міркувань напрошуються три можливі види квазидетермінізації – евристична, стохастична та нечітка.

В цьому параграфі розглянемо евристичну квазидетермінізацію.

Для задачі відтворення режиму електричної мережі евристична квазидетермінізація полягає в тому, що дослідник задає деякі евристичні припущення у вигляді детермінованих функціональних співвідношень між невідомими параметрами, що не можуть бути однозначно відтворені (y_{n-}, x_{n-}), які так доповнюють систему лінійних рівнянь за методом вузлових напруг, що вона стає розв'язуваною. Цілковито зрозуміло, що в цьому випадку відтворені параметри y_{n-}, x_{n-} будуть мати певну похибку, яка залежить від адекватності евристичних припущень.

Таким чином, наше завдання – сформулювати необхідні евристичні припущення для розв'язання задачі відтворення режиму електричної мережі, які дадуть можливість усунути два види невизначеності:

- Перший вид невизначеності виникає тоді, коли в системі кількість *вільних* вузлів перевищує кількість *фіксованих*, тобто має місце співвідношення:

$$Card(V) > Card(G) \quad (5.16)$$

- Другий вид невизначеності пов'язаний з неповнотою вимірювання напруги у вузлах (вимірюються лише модулі напруги).

Евристичні припущення для першого виду невизначеності.

Це евристичне припущення полягає в тому, що для всієї підмножини *вільних* вузлів мережі, параметри яких не можуть бути однозначно відтворені, в кожному момент часу співвідношення між фактичними значеннями повних навантажень цих вузлів повинні дорівнювати співвідношенням між типовими значеннями повних навантажень цих вузлів.

Типові значення повних навантажень вузлів визначаються з типових графіків навантажень всіх вузлів мережі, які формуються на основі вимірів навантажень для характерних діб кожного сезону.

Розглянемо це питання детальніше. Нехай має місце співвідношення (5.16), тобто існує підмножина $V_n \subset V$ *вільних* вузлів мережі, параметри яких не можуть бути однозначно відтворені.

Очевидно, що

$$Card(V_n) = Card(V) - Card(G) \quad (5.17)$$

Розглянемо два довільних вузла e_i та e_j з підмножини V_n .

Евристичне припущення для першого виду невизначеності може бути сформульоване так:

Для довільної пари вузлів $\forall e_i, e_j \in V_n$ в будь-який момент часу t має місце співвідношення

$$\frac{S_{\phi i}^*(t)}{S_{mi}^*(t)} = \frac{S_{\phi j}^*(t)}{S_{mj}^*(t)}, \quad (5.18)$$

де $S_{\phi i}^*(t)$ – фактичне значення повного навантаження вузла e_i для

моменту часу t ; $S_{\phi j}^*(t)$ – фактичне значення повного навантаження

вузла e_j для моменту часу t ; $S_{mi}^*(t)$ – типове значення повного наван-

таження вузла e_i для моменту часу t ; $S_{mj}(t)^*$ – типове значення повного навантаження вузла e_j для моменту часу t .

Таким чином, система лінійних рівнянь за методом вузових напруг для підмножини D (кількість рівнянь – $Card(D)-1$) буде доповнена $Card(V_H)-1$ рівняннями типу (5.18), що дасть можливість з деякою похибкою відтворити режим мережі.

Евристичні припущення для другого виду невизначеності.

Це евристичне припущення базується на використанні введеного в розділі 3 лінійного неевклідового модуля вектора напруги та доведеної там же теореми 3.1.

Нагадаємо, що якщо комплексна напруга довільного вузла записана як

$$U = U_a - jU_p, \quad (5.19)$$

то традиційний евклідовий модуль вектора напруги має вигляд

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}, \quad (5.20)$$

а лінійний неевклідовий модуль вектора напруги може бути записаний як

$$U^\# = \beta |U_a| + |U_p|. \quad (5.21)$$

З теореми 3.1 випливає, що у випадку виконання для довільного вузла умови

$$\beta = \frac{X_0 - R_0 \operatorname{tg} \varphi}{X_0 \operatorname{tg} \varphi + R_0}, \quad (5.22)$$

де R_0 – питомий активний опір лінії живлення, X_0 – питомий індуктивний опір лінії живлення, φ – кут зсуву фаз між напругою та струмом в цій лінії,

лінійний неевклідовий модуль напруги $U^\#$ цього вузла не залежить від модуля струму в лінії живлення, а залежить лише від φ та від параметрів цієї лінії.

Евристичне припущення буде полягати в тому, що для довільного вузла мережі лінійний неевклідовий модуль вектора напруги, розрахований при середньостатистичних навантаженнях в мережі, буде дорівнювати лінійному неевклідовому модулю напруги цього ж вузла, розрахованому при фактичних навантаженнях. Звичайно при цьому ми будемо вважати, що $\operatorname{Cos} \varphi$ в мережі майже не змінюються.

Поступаючи таким чином, ми будемо мати для кожного вузла лінійний неевклідовий модуль вектора напруги $U^\#$, розрахований при середньостатистичних навантаженнях, а також традиційний евклідовий модуль вектора напруги U , отриманий від телеметричних пристроїв.

В результаті одержимо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = U, \\ \beta |U_a| + |U_p| = U^\#. \end{cases} \quad (5.23)$$

Розв'яжемо її відносно U_a, U_p . Для цього перепишемо цю систему спочатку у вигляді

$$\begin{cases} |U_a|^2 + |U_p|^2 = U^2, \\ \beta |U_a| + |U_p| = U^\#. \end{cases} \quad (5.24)$$

Визначивши з другого рівняння $|U_p| = U^\# - \beta |U_a|$ та підставивши цей вираз в перше рівняння, отримаємо

$$\begin{aligned} |U_a|^2 + (U^\# - \beta |U_a|)^2 &= U^2 \Leftrightarrow \\ |U_a|^2 + (U^\#)^2 + \beta^2 |U_a|^2 - 2\beta U^\# |U_a| &= U^2 \Leftrightarrow \\ (1 + \beta^2) |U_a|^2 - 2\beta U^\# |U_a| + (U^\#)^2 - U^2 &= 0 \end{aligned} \quad (5.25)$$

Корені цього рівняння:

$$\begin{aligned} |U_a|_{1,2} &= \frac{2\beta U^\# \pm \sqrt{(2\beta U^\#)^2 - 4(1 + \beta^2)[(U^\#)^2 - U^2]}}{2(1 + \beta^2)} = \\ &= \frac{2\beta U^\# \pm \sqrt{4\beta^2 (U^\#)^2 - 4(1 + \beta^2)[(U^\#)^2 - U^2]}}{2(1 + \beta^2)} = \\ &= \frac{\beta U^\# \pm \sqrt{(1 + \beta^2)U^2 - (U^\#)^2}}{(1 + \beta^2)} \end{aligned} \quad (5.26)$$

В реальних мережах $U_a \gg U_p$, тому потрібне нам значення кореня є

$$|U_a| = \frac{\beta U^\# + \sqrt{(1 + \beta^2)U^2 - (U^\#)^2}}{(1 + \beta^2)} \quad (5.27)$$

З другого рівняння системи (5.24), використовуючи (5.27), знаходимо

$$\begin{aligned} |U_p| &= U^\# - \beta \frac{\beta U^\# + \sqrt{(1 + \beta^2)U^2 - (U^\#)^2}}{(1 + \beta^2)} = \\ &= \frac{U^\#(1 + \beta^2) - \beta^2 U^\# - \beta \sqrt{(1 + \beta^2)U^2 - (U^\#)^2}}{(1 + \beta^2)} = \\ &= \frac{U^\# - \beta \sqrt{(1 + \beta^2)U^2 - (U^\#)^2}}{(1 + \beta^2)} \end{aligned} \quad (5.28)$$

Тепер ми маємо можливість за визначеними $U^\#$ та U знайти
 $U = U_a - jU_p$.

Алгоритм евристичної квазідетермінізації.

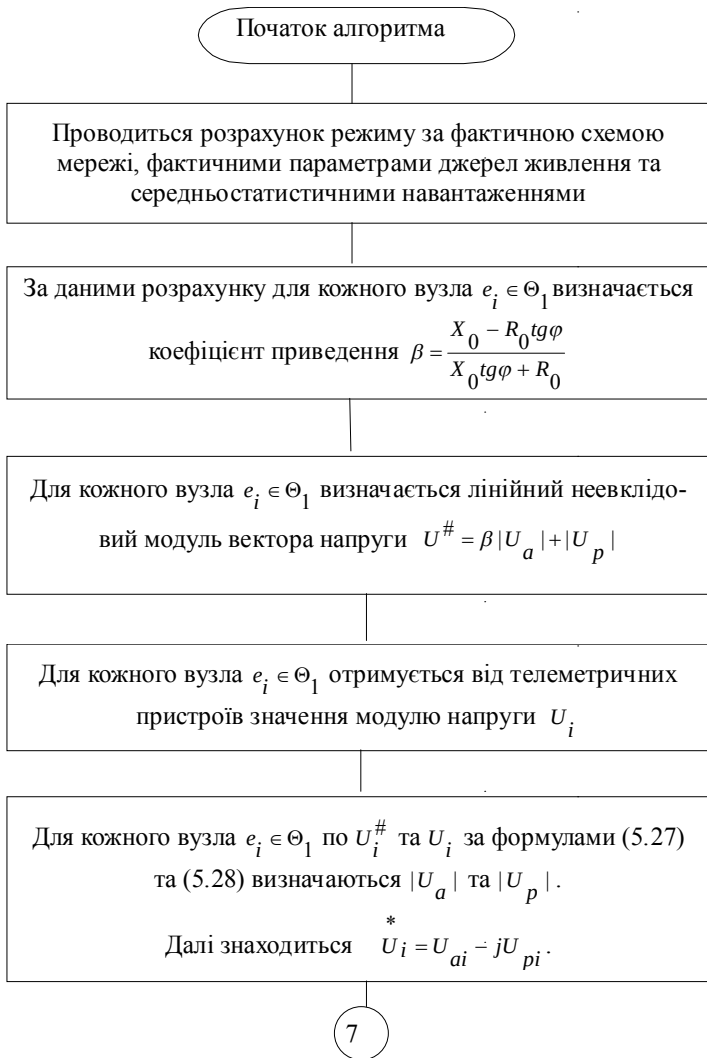
Базуючись на висунутих вище евристичних припущеннях, синтезуємо алгоритм евристичної квазідетермінізації для задачі відтворення режиму електричної мережі.

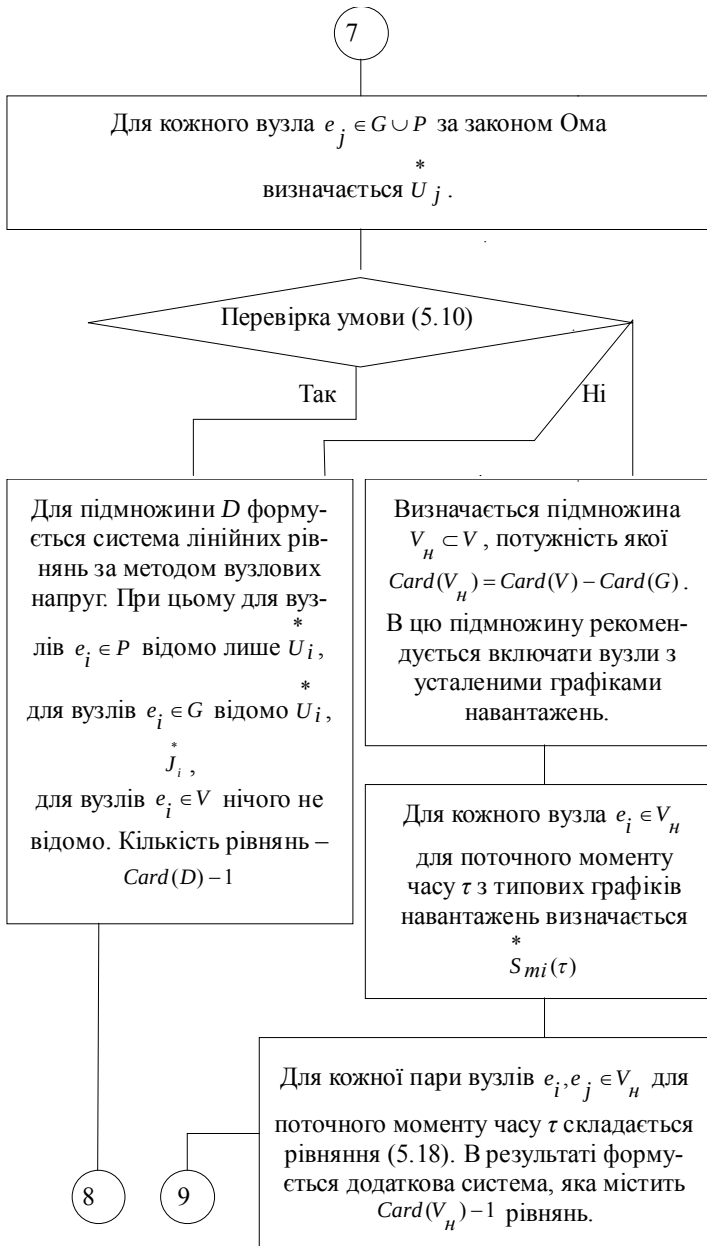
При цьому матимемо на увазі, що евристична квазідетермінізація за самою своєю суттю обов'язково дає похибку при відтворенні режиму. Ця похибка виникає з двох причин:

1. Припущення (5.18) добре відповідає стану вузлів з усталеними графіками навантажень, але часто порушується для вузлів з різко змінним навантаженням (наприклад, для шин 27 кВ тягових підстанцій).

2. Припущення, що базується на теоремі (3.1) добре працює, коли $\cos\varphi$ потоків потужності в лініях змінюється у вузьких межах і дає відчутну похибку у випадках помітної зміни $\cos\varphi$. Попередня оцінка такої похибки наводилась в п. 3.3. Але слід відмітити, що ця похибка практично завжди є меншою за похибку телеметричних пристроїв, що вимірюють модуль напруги у вузлах.

Алгоритм, який реалізовує вищезгадані евристичні припущення, зображено на рис.5.5.





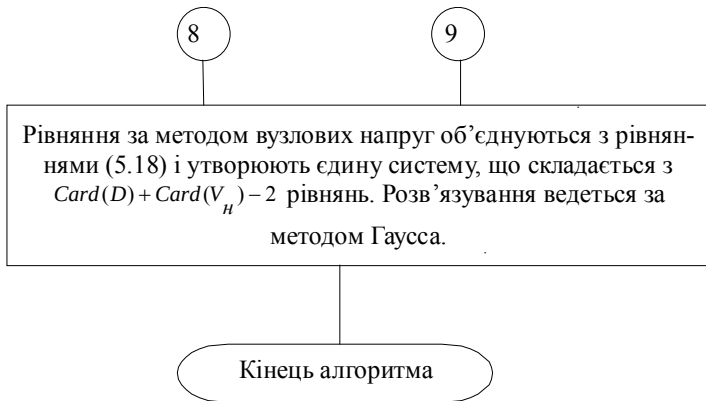


Рис 5.5. Алгоритм евристичної квазідетермінізації

Цей алгоритм є невід'ємною складовою частиною загального алгоритму відтворення режиму електроспоживання електричної мережі, який програмно реалізований в “Аналітичній Системі Відтворення Електроспоживання (АСВЕС)”.

Зауважимо, що починається реалізація цього алгоритму за умови, що вже реалізувався алгоритм, зображений на рис. 5.4, і визначені всі необхідні підмножини $(\Theta_1, P, F, Y, N, V, G, D)$.

5.3. Розробка математичної моделі нечіткої квазідетермінізації для розв'язання задачі відтворення режиму електричної мережі

Виходячи з умови, що тривалість процесу відтворення режиму електричної мережі не повинна перевищувати кількох десятків секунд (інакше диспетчер не зможе ефективно керувати режимом мережі), найбільш придатними для розв'язання задачі відтворення електроспоживання слід вважати моделі евристичної квазідетермінізації, оскільки складність обчислювальних алгоритмів в цих моделях, в порівнянні з моделями стохастичної або нечіткої квазідетермінізації, є найменшою.

Разом з тим, якщо вузли з різко змінним навантаженням (наприклад, шини 27 кВ тягових підстанцій) не вдається обладнати телеметричними пристроями, то в цьому випадку (якщо похибка моделі евристичної квазідетермінізації диспетчера не влаштовує) може бути доцільним використання моделей стохастичної або нечіткої квазідетермінізації. Оскільки моделі стохастичної квазідетермінізації вимагають

не лише розвиненої статистичної бази, а й наявності статистичної стійкості, такі моделі практично неможливо застосувати. Тому розглянемо можливу модель нечіткої квазідетермінізації.

В п. 4.3 були сформульовані основні принципи побудови моделей нечіткої квазідетермінізації для довільних систем. Застосуємо їх для задачі відтворення режиму електричної мережі.

Модель нечіткої квазідетермінізації для задачі відтворення режиму електричної мережі має деякі особливості, а саме:

1. Методи теорії нечітких множин має сенс використати переважно для першого типу невизначеності (див. п. 5.2). Що стосується другого типу невизначеності, то для нього доцільно як і раніше застосовувати евристичне припущення, що базується на теоремі 3.1. Таким чином, ми будемо мати модель комбінованої евристично-нечіткої квазідетермінізації.

2. Нечіткими множинами ми будемо представляти навантаження *
 S_i тих вузлів $e_i \in V_n$, які мають різко змінне навантаження (шини 27 кВ тягових підстанцій). Носії цих нечітких множин лежать на комплексній площині, тому їх функції належності мають вигляд $\mu_{\tilde{S}_i}(P_i, jQ_i)$, а їх графіки лежать у тривимірному просторі (див. рис. 5.6). Для решти вузлів $e_i \in V_n$ використовують перше евристичне припущення, тобто для них складають додаткову систему рівнянь (5.18).

3. Експерт, під час формування множин α -рівнів $(\tilde{S}_i)_{\alpha_1}, (\tilde{S}_i)_{\alpha_2}, \dots, (\tilde{S}_i)_{\alpha_m}, \dots, (\tilde{S}_i)_{\alpha_k}, \dots, (\tilde{S}_i)_{\alpha_n}$ та носія $(\tilde{S}_i)_0$ нечіткої множини $\tilde{S}_i$, може користуватися типовими графіками навантаження вузла *
 $S_{mi}(t) = P_{mi}(t) + jQ_{mi}(t)$. Інакше кажучи, експерт може задавати множину α -рівня або носій у вигляді:

$$(\tilde{S}_i)_{\alpha_k} = \left\{ P_{mi}(t) \pm \left(\delta P_{i\alpha_k} \% \right) \frac{P_{mi}(t)}{100} \right\} \left[Q_{mi}(t) \pm \left(\delta Q_{i\alpha_k} \% \right) \frac{Q_{mi}(t)}{100} \right]_{\alpha_k}, \quad (5.29)$$

де $\delta P_{i\alpha_k} \%$, $\delta Q_{i\alpha_k} \%$ – відносні, прогнозовані експертом, максимальні відхилення P_i від P_{mi} та Q_i від Q_{mi} на довільний момент часу для множини α_k -го рівня вузла $e_i \in V_n$. Цілком зрозуміло, що така форма завдання множин α -рівня значно спрощує роботу експерта.

4. Кількість множин α -рівня, які експерт задає для кожної нечіткої множини $\tilde{S}_i$, повинна визначатися, виходячи з характеру навантажень вузлів $e_i \in V_H$, вимог диспетчерів до точності відтворення режиму мережі та досвіду дослідника. Зрозуміло, що збільшення цієї кількості приводить до збільшення часу розрахункового процесу і негативно впливає на можливість контролю електроспоживання в режимі реального часу.

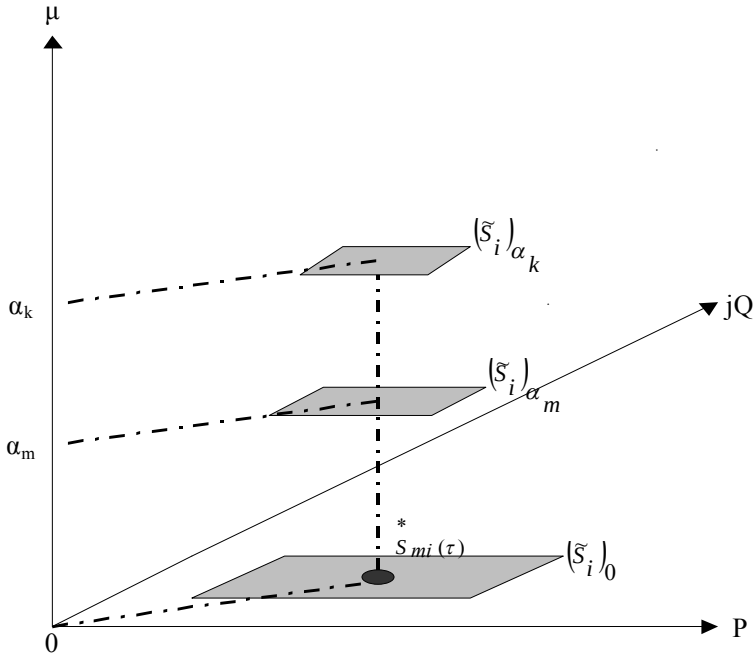


Рис 5.6. α -рівні та носій нечіткої множини $\tilde{S}_i$

5. Отримані в результаті нечіткої квазідетермінізації потужності *вільних* вузлів, які мають різко змінне навантаження, теж будуть нечіткими множинами і будуть представлені у вигляді $(\tilde{S}_i)_{\alpha_1}, (\tilde{S}_i)_{\alpha_2}, \dots, (\tilde{S}_i)_{\alpha_m}, \dots, (\tilde{S}_i)_{\alpha_k}, \dots, (\tilde{S}_i)_{\alpha_n}, (\tilde{S}_i)_0$.

РОЗДІЛ 6

АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА ВІДТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ (АСВЕС)

6.1. Програмна реалізація задачі відтворення режиму електричної мережі

Алгоритми, наведені в п'ятому розділі, лягли в основу аналітичної системи відтворення електроспоживання (АСВЕС), дослідна версія якої була введена в експлуатацію в листопаді 1997 року в оперативно-диспетчерській службі Вінницьких центральних високовольтних електромереж (ВЦВЕМ). Промислова версія системи поступово впроваджується в інших підрозділах ВАТ “АК Вінницяобленерго”.

АСВЕС реалізована для операційного середовища Windows 98, 2000 в системі програмування Visual C++.

Структурна схема АСВЕС зображена на рис. 6.1.

АСВЕС складається з таких підсистем:

1. Підсистема відтворення режиму мережі.
2. Архів інтегральних показників електроспоживання та параметрів режиму підстанцій.
3. База статичних даних зі спеціально розробленим редактором.
4. База відповідностей зі спеціально розробленим редактором.
5. База динамічних даних.
6. Інтерфейс головного робочого місця (диспетчера).
7. Інтерфейс віддаленого робочого місця.

Опис вищеназаних підсистем буде наведено далі.

Вхідна інформація до АСВЕС надходить від інформаційно-вимірювальної системи (ІВС). Робота АСВЕС не залежить від типу та структури ІВС.

В межах ВАТ “АК Вінницяобленерго” використовується ІВС, що розроблена ВАТ “Укравтоматика”, м. Житомир. Ця ІВС базується на устаткуванні “Траніт”, апаратурі високочастотного зв'язку по високовольтних лініях електропередач, сенсорах телесигналізації, струму, напруги, потужності. В окремих випадках використовуються лічильники активної електроенергії з імпульсним виходом.

Інформація з телеметричних пристроїв надходить на спеціальний АРМ телеметрії, де відбувається її первинна обробка та фільтрація. Оброблена та відфільтрована інформація передається в базу динамічних даних АСВЕС безпосередньо за допомогою WINSOCKET.

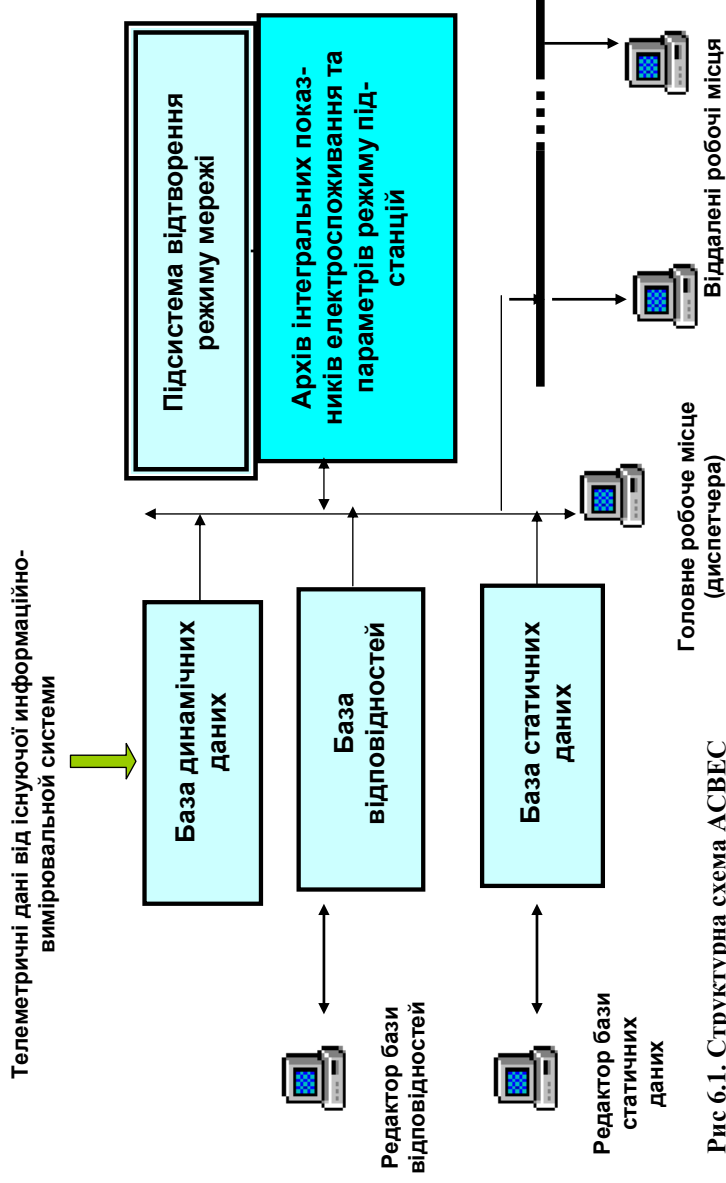
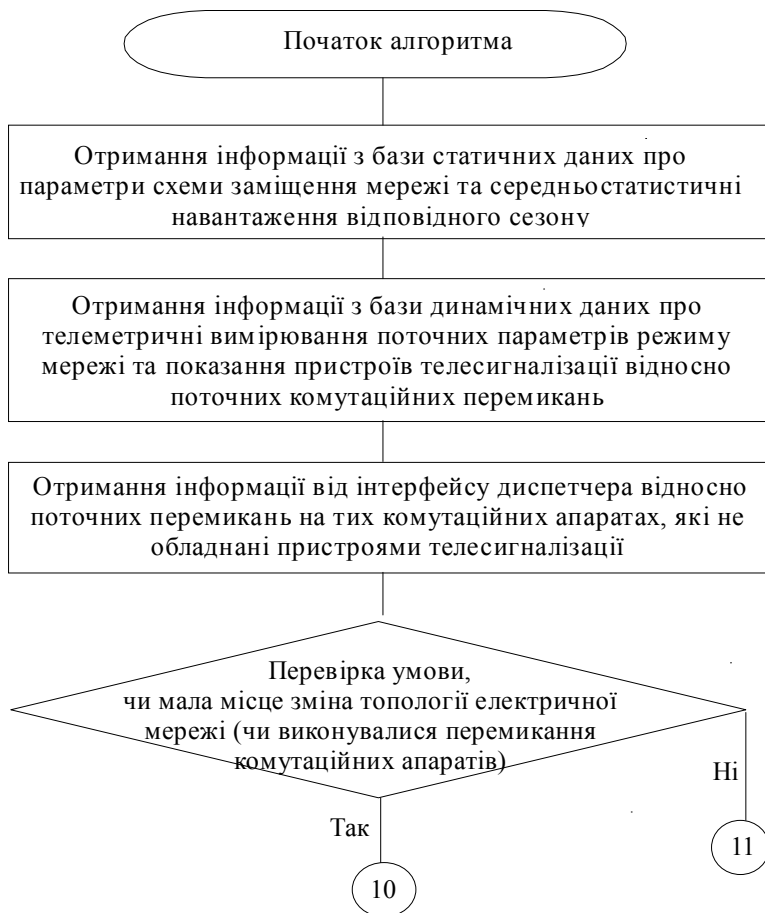


Рис 6.1. Структурна схема АСВЕС

6.2. Підсистеми АСВЕС

6.2.1. Підсистема відтворення режиму мережі

Ця підсистема є головною підсистемою АСВЕС. Вона реалізує як алгоритми, що наведені в п'ятому розділі, так і деякі інші алгоритми, пов'язані з обробкою статичних та динамічних даних, що надходять до АСВЕС. Блок-схема алгоритма підсистеми наведена на рис. 6.2.



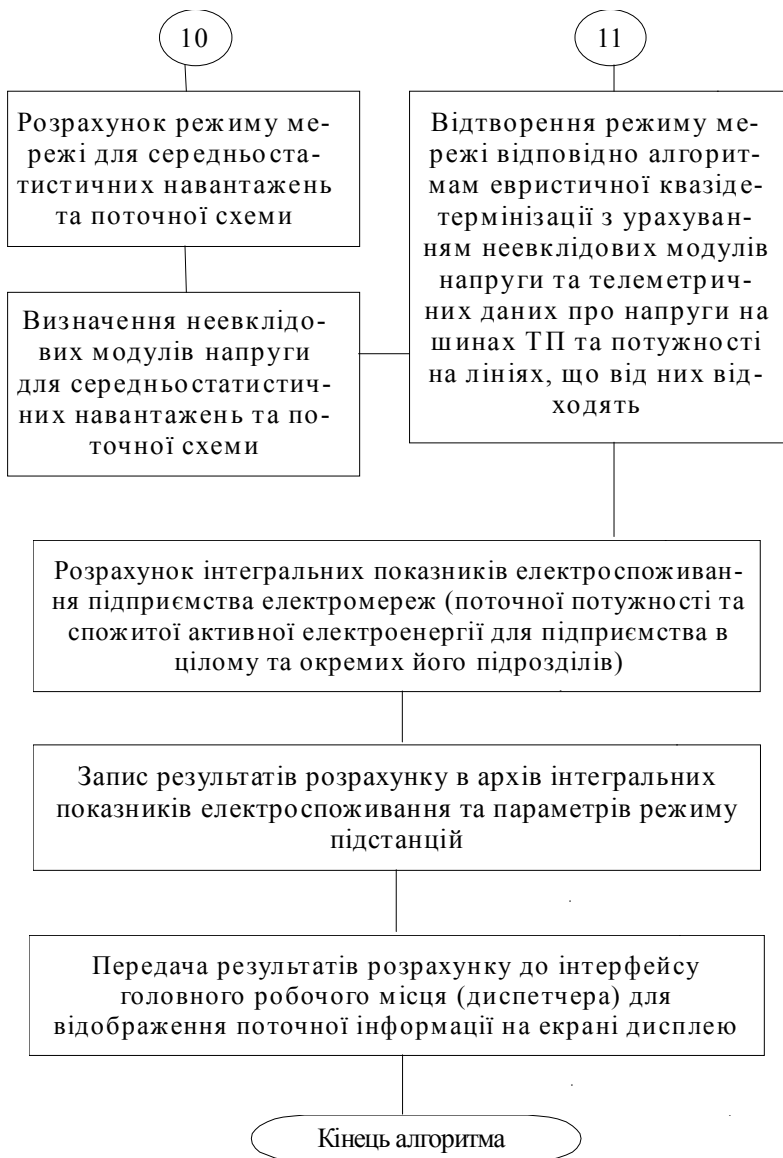


Рис. 6.2. Алгоритм підсистеми відтворення режиму мережі

6.2.2. Архів інтегральних показників електроспоживання та параметрів режиму підстанцій

Архів зберігається на сервері ORACLE та складається з двох частин: з архіву інтегральних показників електроспоживання та архіву електроспоживання підстанцій.

Архів інтегральних показників електроспоживання містить в собі:

- Коди підприємств, підстанцій та їх елементів згідно з Базою Відповідностей.
- Значення обмежень споживання потужності та електроенергії для підрозділів підприємства електромереж.
- Значення споживання потужності, добового та місячного споживання електроенергії для кожного підрозділу.
- Значення споживання потужності, добового та місячного споживання електроенергії для кожної підстанції.
- Значення споживання потужності на кожну хвилину та годину доби, добового та місячного споживання електроенергії для окремих елементів підстанцій.
- Значення часу розрахунку для кожного циклу відтворення електроспоживання.

Архів електроспоживання підстанцій містить в собі:

- Узгоджені з Базою Відповідностей коди елементів підстанцій.
- Дані про тип комутаційних апаратів на лініях та уводах трансформаторів, узгоджені з Базою Відповідностей.
- Дані про та стан комутаційних апаратів (ввімкнено – вимкнено).
- Отримані від датчиків значення напруг на шинах 110-35-10 кВ підстанцій.
- Відтворені значення напруг на шинах 110-35-10 кВ підстанцій.
- Отримані від датчиків значення потужностей та струмів на лініях та уводах трансформаторів, які охоплені телевимірами.
- Відтворені значення потужностей та струмів **на всіх** лініях та уводах трансформаторів, як охоплених телевимірами, так і не охопленіх.
- Значення часу розрахунку для кожного циклу відтворення електроспоживання.

6.2.3. База статичних даних зі спеціально розробленим редактором

База статичних даних призначена для зберігання різноманітної інформації про узагальнені дані мережі в цілому, питомі електротех-

нічні параметри всіх силових елементів мережі та фактичні параметри цих елементів. Ці дані використовуються для автоматичної побудови повних схем заміщення кожного силового елемента електромережі та схеми заміщення мережі в цілому.

Одержана повна схема заміщення мережі використовується АС-ВЕС в процесі відтворення картини електроспоживання.

У відповідності до вищевикладеного *база статичних даних*, структурна схема якої наведена на рис. 6.3, складається з *бази загальних даних*, *бази питомих характеристик* та *бази існуючої мережі*.

База загальних даних

Ця база містить дані, які не відносяться до конкретних елементів електричної мережі (ліній, підстанцій), а залежать виключно від рівня ієрархії мережі (наприклад: узагальнені технічні та економічні параметри мереж різних рівнів напруги тощо).

База питомих характеристик

Ця база містить:

- питомі технічні параметри для повітряних ліній (ПЛ) 6-10-35-110кВ всіх стандартних марок та перерізів у відповідності з ГОСТ 839-80 для існуючого сортаменту неізолюваних проводів, окрім мідних, бронзових, порожнистих та контактних проводів;
- питомі технічні параметри для повітряних ліній 6-10-35-110кВ застарілих марок АСУ, АСКУ, АСО, АСКО, ПС, ПМС, які ще знаходяться в експлуатації;
- питомі технічні параметри для кабельних ліній загального призначення (КЛ) одно- і трижильних з паперовою, пластмасовою та гумовою ізоляцією, а також маслонаповнених, які використовуються в лініях електропередач 10-35-110кВ окремо для алюмінієвих та мідних кабелів в залежності від перерізів (без врахування спеціалізованих кабелів – гірничих, геофізичних, корабельних, для електротехнічного устаткування тощо);
- узагальнені паспортні характеристики трифазних трансформаторів та узагальнені параметри Г-подібної схеми заміщення трансформаторів 6-10-35-110 кВ окремо для двообмоткових, триобмоткових трансформаторів та трансформаторів з розщепленою обмоткою низької напруги всіх стандартних потужностей у відповідності з ГОСТ 9680-77 в залежності від потужності трансформаторів;
- узагальнені паспортні характеристики та узагальнені параметри Г-подібної схеми заміщення трифазних трансформаторів 6-10-35-110кВ нестандартної потужності, які ще знаходяться в експлуатації.

Існуючі марки проводів ПЛ розділені в базі на класи. Кожен клас має однакові питомі електротехнічні характеристики.

Для кожного класу проводів база містить:

- діапазон перерізів та напруг, на які виготовляється кожна марка даного класу;

- переріз (**F**) в мм кв;
- діаметр проводу (**D**) в мм;
- питомий активний опір (**Ro**) в ом/км;
- питомий реактивний опір (**Xo**) в ом/км;
- питому реактиву провідність (**Bo**) в См/км;
- питому реактивну зарядну потужність (**Qo**) в кВАр/км;
- допустимий струм (**Iдоп**) в А;
- питомі втрати на корону (**dPкор**) в кВт/км.

Для кабельних ліній база містить:

- діапазон перерізів та напруг, для яких виготовляється кабель кожної марки;

- питомі значення активного опору, активної провідності, реактивного опору та реактивної провідності залежно від напруги, марки та перерізу КЛ;

- значення питомої зарядної потужності, питомого зарядного струму та тангенсу кута діелектричних втрат залежно від напруги, марки та перерізу КЛ;

- допустимий струм залежно від напруги, марки, перерізу та способу прокладення кабельних ліній.

Для кожного виду трансформаторів (однофазних, трифазних, двообмоткових, триобмоткових, з розщепленою обмоткою) всіх напруг і потужностей база містить:

1) діапазон потужностей та напруг, на які виготовляються трансформатори кожної марки;

2) узагальнюючі паспортні дані:

- повну потужність трансформатора (**St**), кВА;
- напругу високої сторони (**Uвн**), кВ;
- втрати холостого ходу (**dPxx**), кВт;
- втрати короткого замикання (**dPкз**), кВт;
- струм холостого ходу (**Ixx**), %;
- напругу короткого замикання (**Uк**), %;

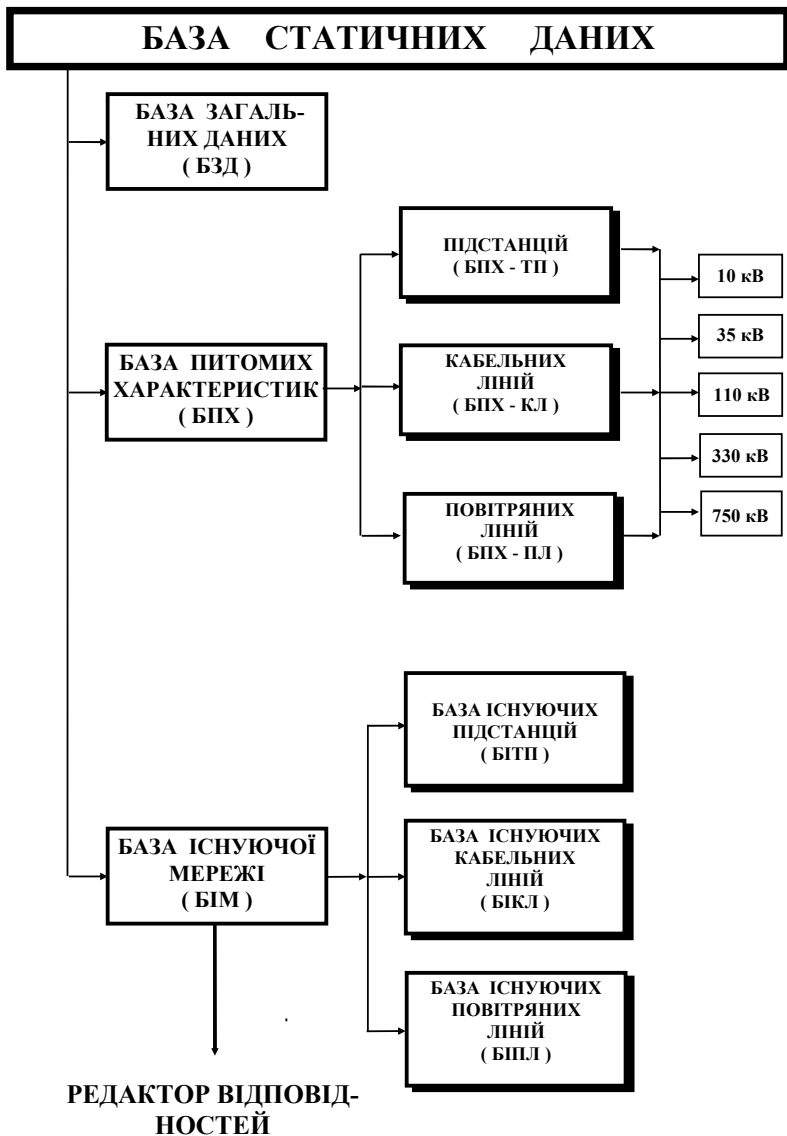


Рис. 6.3. Структурна схема бази статичних даних

3) узагальнюючі параметри Г-подібної схеми заміщення трансформаторів:

- активний опір (R_t), ом;
- реактивний опір (X_t), ом;
- активну провідність (G_t), См;
- реактивну провідність (B_t), См;
- реактивну потужність холостого ходу (Q_{xx}), кВАр.

Для триобмоткових трансформаторів параметри R_t и X_t задаються для високої, середньої та низької сторони.

База існуючої мережі

Ця база містить:

- топологічний зв'язок між елементами мережі;
- параметри П-подібних схем заміщення повітряних та кабельних ліній;
- назви, марки, перерізи, довжини ліній;
- параметри Г-подібних схем заміщення трансформаторів;
- назви та схеми підстанцій;
- марки, потужності, схеми з'єднань обмоток трансформаторів;
- інформацію про комутаційне обладнання підстанцій.

Редагування бази існуючої мережі здійснюється за допомогою спеціально розробленого редактора з робочого місця інженера режимної служби.

6.2.4. База відповідностей зі спеціально розробленим редактором

База відповідностей призначена для узгодження між собою різномірної інформації (наявні джерела телеметричної інформації прив'язуються до відповідних параметрів схеми заміщення, навантаження секцій шин підстанцій прив'язуються до відповідних підприємств електромереж тощо), а також для забезпечення високого рівня універсальності АСВЕС та незалежності її від розробника.

Редагування бази відповідностей здійснюється за допомогою спеціально розробленого редактора відповідностей.

Алгоритм редагування передбачає:

- виклик редактором відповідностей останнього варіанту бази існуючої мережі;

- виклик *редактором відповідностей* останнього варіанту бази *відповідностей*;
- створення нових, зміну та вилучення вже існуючих підприємств, підстанцій, елементів та нових зв'язків;
- запис нової бази *відповідностей* разом з новою базою існуючої мережі.

6.2.5. База динамічних даних

База динамічних даних призначена для приймання поточних даних телевимірювань і телесигналізації від інформаційно-вимірювальної системи, поточних комутаційних перемикачів від інтерфейсу диспетчера, об'єднання та структурування цих даних і передачі в підсистему відтворення режиму.

6.2.6. Інтерфейс головного робочого місця (диспетчера)

Інтерфейс головного робочого місця (диспетчера) призначений для:

- відображення поточних та архівних параметрів електроспоживання трансформаторних підстанцій;
- відображення поточних та архівних інтегральних показників електроспоживання підприємства електромереж та його підрозділів;
- здійснення контролю за виконанням обмежень на електроспоживання;
- виконання з робочого місця диспетчера необхідних комутаційних перемикачів в базі даних АСВЕС.

Головне вікно інтерфейсу АСВЕС зображене на рис. 6.4.

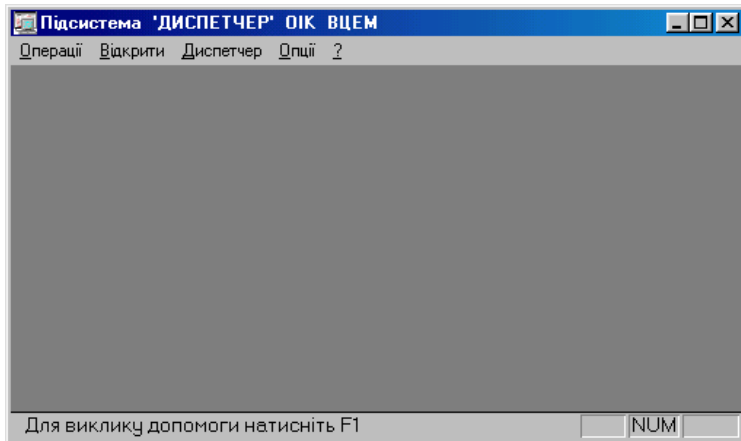
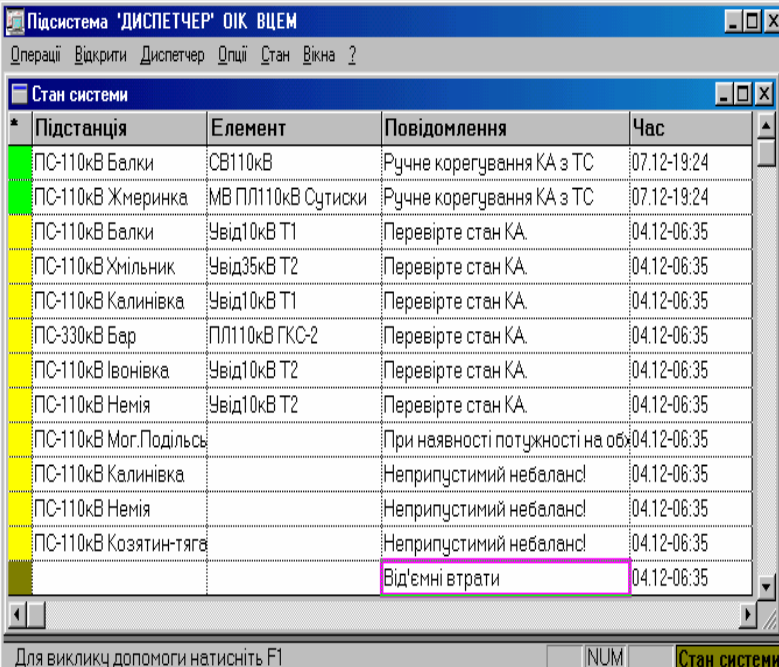


Рис. 6.4. Головне вікно інтерфейсу АСВЕС

Запуск процесу відтворення електроспоживання здійснюється викликом з головного меню пунктів *Операції-Пуск*, при цьому задається циклічність процесу. Зазвичай вона складає 1цикл/хвили.

Після запуску процесу і надалі час від часу черговий диспетчер викликає на екран *Поточний протокол подій* (рис. 6.5). Цей протокол містить діагностичні повідомлення підсистеми щодо знайдених нею суперечностей в показаннях телеметрії та схемі мережі.



* Підстанція	Елемент	Повідомлення	Час
ПС-110кВ Балки	СВ110кВ	Ручне корегування КА з ТС	07.12-19:24
ПС-110кВ Жмеринка	МВ ПЛ110кВ Сутиски	Ручне корегування КА з ТС	07.12-19:24
ПС-110кВ Балки	Увід10кВ Т1	Перевірте стан КА.	04.12-06:35
ПС-110кВ Хмільник	Увід35кВ Т2	Перевірте стан КА.	04.12-06:35
ПС-110кВ Калинівка	Увід10кВ Т1	Перевірте стан КА.	04.12-06:35
ПС-330кВ Бар	ПЛ110кВ ГКС-2	Перевірте стан КА.	04.12-06:35
ПС-110кВ Івонівка	Увід10кВ Т2	Перевірте стан КА.	04.12-06:35
ПС-110кВ Немія	Увід10кВ Т2	Перевірте стан КА.	04.12-06:35
ПС-110кВ Мог.Подільськ		При наявності потужності на об'єкті	04.12-06:35
ПС-110кВ Калинівка		Неприпустимий небаланс!	04.12-06:35
ПС-110кВ Немія		Неприпустимий небаланс!	04.12-06:35
ПС-110кВ Козятин-тяга		Неприпустимий небаланс!	04.12-06:35
		Від'ємні втрати	04.12-06:35

Рис. 6.5. Поточний протокол подій

Розглянемо окремі повідомлення системи:

- *Ручне корегування КА з ТС.*

Таке повідомлення означає, що датчик телесигналізації на відповідному комутаційному апараті передає в систему недостовірні дані і черговий диспетчер раніше перевів його в режим ручного коригування. Якщо стало відомо, що цей датчик вже полагоджено, то його повертають в режим автоматичного коригування.

- *Перевірте стан КА.*

Таке повідомлення означає, що показання датчика телесигналізації на цьому приєднанні суперечать показанням датчика телевимірів (наприклад, комутаційний апарат вимкнений, а датчик телевимірів показує відмінну від нуля потужність). В цьому випадку черговий диспетчер прояснює у чергового диспетчера підстанції дійсний стан КА на цьому приєднанні і у випадку необхідності коригує його.

- *За наявності потужності на обхідному вимикачу не увімкнений жоден обхідний роз'єднувач.*

В цьому випадку черговий диспетчер вмикає потрібний обхідний роз'єднувач.

- *Неприпустимий небаланс.*

Таке повідомлення означає, що на підстанції, яка обладнана телеметрією, розбіжність показань датчиків потужності перевищує припустимо можливу похибку для цього класу телеметричних пристроїв. В цьому випадку черговий диспетчер визначає, які саме датчики передають некоректні дані, і видає завдання на їх заміну.

- *Від'ємні втрати.*

Це повідомлення викликане або недостовірними показаннями датчиків, або втратою зв'язку з окремими підстанціями, або невідповідністю стану КА в базі мережі дійсному стану схеми мережі. В цьому випадку черговий диспетчер аналізує ситуацію і робить необхідні перемикання в базі мережі або визначає несправні датчики та видає завдання на їх заміну.

Черговий диспетчер має можливість коригувати типовий графік навантажень, що необхідно для реалізації алгоритму евристичної квазідетермінізації.

Ця процедура виконується у вікні (рис. 6.6), яке викликається за допомогою пунктів меню *Операції-Графіки навантажень*.

Користувач повинен, відштовхуючись від робочих графіків навантажень (зображені червоним кольором), скоригувати типові графіки (зображені зеленим кольором).

Це можна зробити таким чином:

- За допомогою кнопок *Копіювати підстанцію* або *Копіювати вузол* перенести всі значення робочого графіка всієї підстанції чи окремого вузла у відповідний типовий графік.
- В таблиці типового графіка вручну скоригувати ті значення потужності, які є випадковими або з якихось причин не викликають довіри.

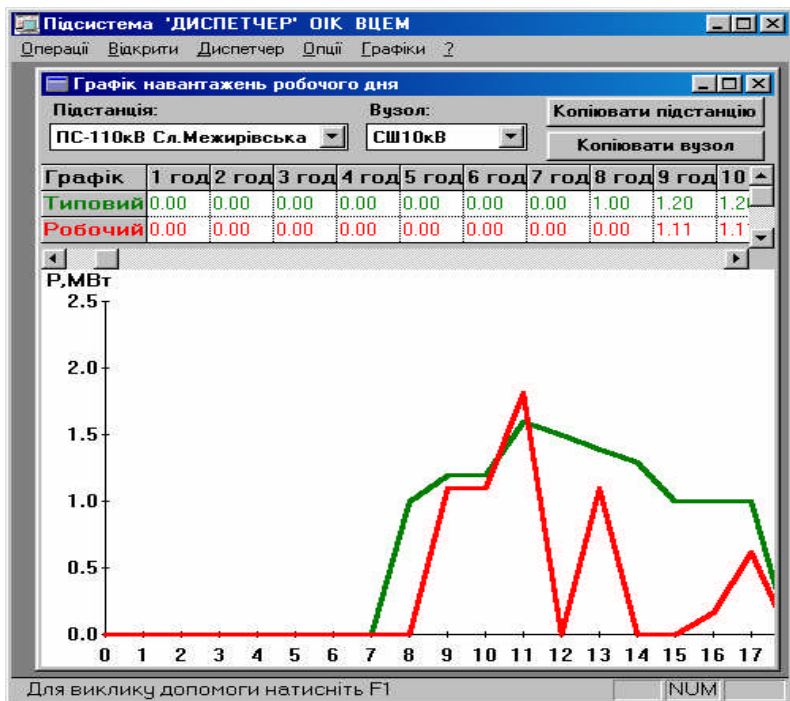


Рис. 6.6. Графіки навантажень

Для коректного відтворення режиму електроспоживання мережі необхідно своєчасно виконувати перемикання тих комутаційних апаратів підстанцій 110кВ, які не обладнані пристроями телесигналізації.

Ця процедура виконується в поточних таблицях підстанцій. Приклад такої таблиці показано на рис. 6.7.

Структура таблиці:

1. В кожному рядку таблиці міститься один з елементів підстанції і всі параметри режиму мережі, які до нього відносяться. Кожна таблиця має стільки рядків, скільки елементів має підстанція. Елементом підстанції вважається, наприклад, секція шин, комутаційний апарат, трансформаторний увід або лінія, що відходить від шин підстанції.

Підсистема 'ДИСПЕТЧЕР' ОІК ВЦЕМ

Операції Відкрити Диспетчер Опції Підстанція Вікна ?

ПС-330кВ Бар (05.12-09:38)

N	Елемент	Ст	U,кВ	P,МВт	Q,Мвар	I,А
1	1СШ330кВ		354.42			
2	2СШ330кВ		357.06			
3	1СШ110кВ		117.26			
4	2СШ110кВ		117.26			
5	ПЛ110кВ ГКС-1	■		-20.59	1.14	-101.46
6	ОР ПЛ110кВ ГКС-1	■				
7	ПЛ110кВ ГКС-2	■		0.00	0.00	0.00
8	ОР ПЛ110кВ ГКС-2	■				
9	ПЛ110кВ Жмеринка	■		1.14	0.46	5.95
10	ОР ПЛ110кВ Жмеринка	■				
11	ПЛ110кВ Балки	■		-27.46	-2.29	-135.68
12	ОР ПЛ110кВ Балки	■				
13	ПЛ330кВ Хмельницький			-109.63	-31.98	
14	ПЛ330кВ Вінниця 330			155.31	31.98	
15	Увід110кВ Т1	■		-45.67	3.04	
16	Увід110кВ Т2	■		0.00	0.00	
17	ШСВ110кВ	■				
18	ОВ110кВ	■		0.00	0.00	

Для виклику допомоги натисніть F1

NUM Стан системи

Рис. 6.7. Поточна таблиця ПС330кВ “Бар”

2. Кожна таблиця складається із семи стовпців:
 - 2.1. Перший стовпець (*N*) містить порядковий номер елемента підстанції (самостійного значення не має).
 - 2.2. Другий стовпець (*Елемент*) містить назву елемента підстанції. Це може бути:
 - 2.2.1. Секція шин підстанції (наприклад, 1СШ110кВ, 1СШ 330кВ тощо).
 - 2.2.2. Лінія, що відходить від підстанції (наприклад, ПЛ110кВ Жмеринка, ПЛ110кВ Балки тощо).
 - 2.2.3. Трансформаторний увід підстанції (наприклад, Увід110кВТ1, Увід110кВТ2 тощо).
 - 2.2.4. Комутаційні апарати підстанції (наприклад, ОР ПЛ110кВ Жмеринка, ШСВ110кВ, ОВ110кВ тощо).
 - 2.3. Третій стовпець (*Ст*) містить вид та стан комутаційного апарата. Стан комутаційного апарата відзначається кольором

(зелений – ввімкнено, червоний – вимкнено). Що стосується виду, то це може бути:

Вимикач



Роз'єднувач



2.4. Четвертий стовпець (U , κB) містить модуль напруги (лише для секцій шин).

2.5. П'ятий стовпець (P , MBm) містить активну потужність.

2.6. Шостий стовпець (Q , $Mvar$) містить реактивну потужність.

2.7. Сьомий стовпець (I , A) містить струм.

Черговий диспетчер має можливість переглядати і поточні таблиці підстанцій, і архівні, але коригування стану комутаційних апаратів в архівних таблицях не допускається. Приклади архівних таблиць наведені на рис. 6.8 – 6.11.

Головною таблицею АСВЕС є таблиця *інтегральних показників електроспоживання*, в якій містяться дані про споживання окремих РЕМів, окремих значних споживачів (наприклад, Барська газокompresорна станція та Електротяга), підприємства електромереж в цілому, а також навантаження зовнішніх ліній зв'язку зі суміжними підприємствами електромереж.

Ця таблиця викликається за допомогою пунктів меню *Відкрити-Аналіз*.

Таблиця *інтегральних показників електроспоживання* може бути виведена на екран дисплея як в повному обсязі, так і фрагментарно: окремо таблиця РЕМ і окремо таблиця зовнішніх зв'язків. Ці фрагменти поточної таблиці *інтегральних показників електроспоживання* наведені на рис. 6.12, 6.13.

АРХІВ ПС-110кВ Мог.Подільський (19.08-11:22)					
N	Елемент	Ст	U,кВ	P,МВт	Q,Мвар I,А
1	1СШ110кВ		113.74		
2	2СШ110кВ		113.81		
3	ОСШ110кВ		113.74		
4	1СШ10кВ		0.00		
5	2СШ10кВ		10.35		
6	ПЛ110кВ Конєва			0.00	0.00 0.00
7	ПЛ110кВ ДСГЕС1			4.99	1.41 23.24
8	ПЛ110кВ ДСГЕС2			15.92	1.21 53.42
9	ПЛ110кВ Коси			-5.47	-2.19 -30.56
10	ПЛ 110кВ Немія			-4.56	-1.82 -24.81
11	Увід110кВ Т1	+		0.02	0.01 0.10
12	Увід10кВ Т1	+		0.00	0.00 0.00
13	Увід110кВ Т2	+		5.44	4.08 34.50
14	Увід10кВ Т2	+		4.38	3.88 326.62
15	СВ110кВ	+			
16	ОВ110кВ	+		0.00	

Рис. 6.8. Архівна таблиця ПС110кВ “Мог.- Подільський”

АРХІВ ПС-110кВ Сосонка-тяга (19.08-11:22)					
N	Елемент	Ст	U,кВ	P,МВт	Q,Мвар I,А
1	1СШ110кВ		116.61		
2	2СШ110кВ		116.61		
3	1СШ27кВ		29.14		
4	2СШ27кВ		0.00		
5	1СШ10кВ		10.60		
6	2СШ10кВ		0.00		
7	ОСШ110кВ		116.61		
8	ПЛ110кВ Сігнал			0.00	0.00 0.00
9	ПЛ110кВ Турбів			10.03	-7.30 62.38
10	ПЛ110кВ Калинівка			-1.82	-0.91 -10.44
11	Увід110кВ Т1	+		8.21	6.16 50.80
12	Увід27кВ Т1	+		6.75	5.06 167.12
13	Увід10кВ Т1	+		7.70	6.42 546.04
14	Увід110кВ Т2	+		0.00	0.00 0.00
15	Увід27кВ Т2	+		0.00	0.00 0.00
16	Увід10кВ Т2	+		0.00	0.10 0.00

Рис. 6.9. Архівна таблиця ПС110кВ “Сосонка-тяга”

АРХІВ ПС-110кВ Західна (19.08-11:22)						
N	Елемент	Ст	U,кВ	P,МВт	Q,Мвар	I,А
1	1СШ110кВ		114.72			
2	2СШ110кВ		114.72			
3	1СШ10кВ		10.25			
4	2СШ10кВ		10.25			
5	ПЛ 110кВ Вінниця330	+		14.67	5.33	78.35
6	ПЛ 110кВ ВЗТА	+		-3.49	-0.59	-18.02
7	Чвід110кВ Т1	+		5.59	2.37	30.26
8	Чвід10кВ Т1	■		5.56	2.02	332.84
9	Чвід110кВ Т2	+		5.59	2.37	30.26
10	Чвід10кВ Т2	■		5.56	2.02	332.84
11	СВ110кВ(рем.перемичка)	■				
12	СВ10кВ	■				

Рис. 6.10. Архівна таблиця ПС110кВ “Західна”

АРХІВ ПС-750кВ Вінницька (19.08-11:22)						
N	Елемент	Ст	U,кВ	P,МВт	Q,Мвар	I,А
1	1СШ750кВ		562.50			
2	2СШ750кВ		562.50			
3	1СШ330кВ		347.82			
4	2СШ330кВ		247.50			
5	СШ110кВ		117.92			
6	ПЛ110кВ Турбів			-1.82	-0.73	-9.77
7	ОР ПЛ110кВ Турбів					
8	ПЛ110кВ Степанівка			-10.94	0.00	-53.58
9	ОР ПЛ110кВ Степанівка					
10	ПЛ110кВ Вінниця330			0.00	0.00	0.00
11	ОР ПЛ110кВ Вінниця330					
12	ПЛ330кВ Козятин			-44.51		
13	ПЛ330кВ Вінниця			-89.02		
14	ПЛ330кВ Лад.ТЕС			-54.78		
15	ПЛ750кВ Півд.Укр.АЕС			-228.36		
16	ПЛ750кВ ЧАЕС			0.00		
17	ПЛ750кВ Західна Укр.			505.96		
18	Чвід110кВ АТ-3					
19	Чвід330кВ АТ-2			89.02		

Рис. 6.11. Архівна таблиця ПС750кВ “Вінницька”

Підсистема 'ДИСПЕТЧЕР' ОІК ВЦЕМ

Операції Відкрити Диспетчер Опції Аналіз Вікна ?

Аналіз (05.12.09:38.00)

Об'єкт	Р _о , МВт	Р _{рдц} , МВт	-Р _{рдц} , МВт	Р _ф , МВт	-Р, МВт	-Р _{розг}
Барський РЕМ	9.62	0.00	0.00	10.39	0.77	0.00
Вінницький РЕМ	64.92	0.00	0.00	113.63	48.71	0.00
Замостянський РЕМ	16.83	0.00	0.00	14.78	-2.05	0.00
Жмеринський РЕМ	16.83	0.00	0.00	21.22	4.39	0.00
Козятинський РЕМ	20.44	0.00	0.00	16.52	-3.91	0.00
Калинівський РЕМ	18.03	0.00	0.00	14.54	-3.50	0.00
Літинський РЕМ	7.21	0.00	0.00	5.25	-1.96	0.00
Мог-Подільський РЕМ	15.63	0.00	0.00	19.35	3.72	0.00
Мур-Куриловецький РЕМ	4.81	0.00	0.00	1.19	-3.62	0.00
Тиврівський РЕМ	7.21	0.00	0.00	12.73	5.51	0.00
Хмільницький РЕМ	10.82	0.00	0.00	10.64	-0.18	0.00
Шаргородський РЕМ	12.02	0.00	0.00	13.73	1.71	0.00
Чернівецький РЕМ	8.01	0.00	0.00	8.52	2.51	0.00
Електротяга	20.00	0.00	0.00	8.61	-11.39	0.00
Бар КС-37	42.00	18.40	-23.60	20.53	-21.47	-2.13
В/в втрати	3.61	0.00	0.00	12.08	8.48	0.00
Госп.потреби	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Разом по ВЦЕМ	276.00	304.40	28.40	303.71	27.71	0.69

Для виклику допомоги натисніть F1

NUM Стан системи

Рис. 6.12. Поточна таблиця РЕМ

Таблиця інтегральних показників електроспоживання має таку структуру:

1. В кожному рядку таблиці міститься один з підрозділів підприємства електромереж (наприклад, Калинівський РЕМ), окремих значних споживачів (наприклад, Електротяга) або суміжних підприємств електромереж (наприклад, Київобленерго). В свою чергу, суміжні підприємства електромереж можуть розкриватися у множину окремих ліній зв'язку.

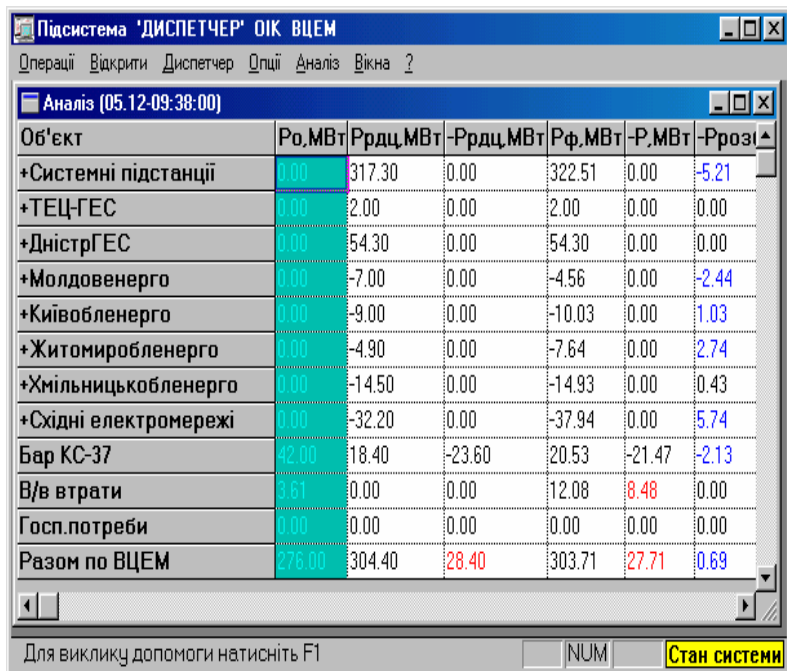
2. Кожна таблиця складається із семи стовпців:

2.1. Перший стовпець (*Об'єкт*) містить назву підрозділу підприємства електромереж або назву лінії зв'язку.

2.2. Другий стовпець (*P_о, МВт*) містить значення плану (обмеження) активної потужності, яке підприємство не має права

перевищувати. Такі обмеження вводяться лише для районів електромереж, окремих значних споживачів та підприємства в цілому.

2.3. Третій стовпець ($P_{РДЦ}$, $МВт$) містить значення активної потужності, яке за даними диспетчерської служби Південно-Західної енергосистеми (ПЗЕС) на цю мить споживає відповідне підприємство електромереж.



Об'єкт	$P_0, МВт$	$P_{РДЦ}, МВт$	$-P_{РДЦ}, МВт$	$P_{\phi}, МВт$	$-P_{\phi}, МВт$	$P_{розі}$
+Системні підстанції	0.00	317.30	0.00	322.51	0.00	-5.21
+ТЕЦ-ГЕС	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00	0.00
+ДністрГЕС	0.00	54.30	0.00	54.30	0.00	0.00
+Молдовенерго	0.00	-7.00	0.00	-4.56	0.00	-2.44
+Київобленерго	0.00	-9.00	0.00	-10.03	0.00	1.03
+Житомиробленерго	0.00	-4.90	0.00	-7.64	0.00	2.74
+Хмельницькобленерго	0.00	-14.50	0.00	-14.93	0.00	0.43
+Східні електромережі	0.00	-32.20	0.00	-37.94	0.00	5.74
Бар КС-37	42.00	18.40	-23.60	20.53	-21.47	-2.13
В/в втрати	3.61	0.00	0.00	12.08	8.48	0.00
Госп.потреби	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Разом по ВЦЕМ	276.00	304.40	28.40	303.71	27.71	0.69

Рис. 6.13. Поточна таблиця зовнішніх зв'язків

2.4. Четвертий стовпець ($-P_{РДЦ}$, $МВт$) містить різницю між значенням активної потужності, яке за даними диспетчерської служби ПЗЕС на цю мить споживає відповідне підприємство електромереж, та планом активної потужності. Ця різниця може бути як додатною, так і від'ємною (додатна різниця на екрані дисплею відображається червоним кольором).

2.5. П'ятий стовпець (P_{ϕ} , $МВт$) містить значення активної потужності, яке за результатами відтворення режиму мережі на цю мить споживає відповідне підприємство електромереж.

2.6. Шостий стовпець ($-P_{\phi}$, $МВт$) містить різницю між значенням активної потужності, яке за результатами відтворення

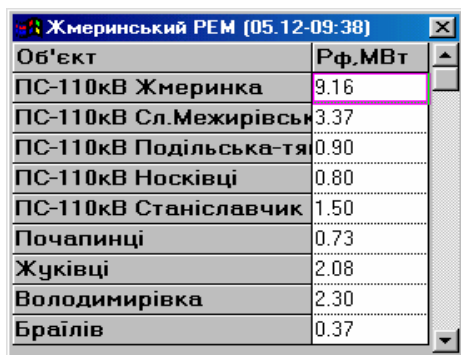
режиму мережі на цю мить споживає відповідне підприємство електромереж, та планом активної потужності. Ця різниця може бути як додатною, так і від'ємною (додатна різниця на екрані дисплею відображається червоним кольором). У випадку значної додатної різниці диспетчер може прийняти рішення про примусове відключення частини споживачів відповідного підприємства електромереж.

2.7. Сьомий стовпець ($-P_{\text{розбіжн.}}$ MBm) містить можливу розбіжність між фактичним споживанням активної потужності за даними ПЗЕС та фактичним споживанням активної потужності за результатами відтворення режиму мережі. Ця розбіжність може існувати внаслідок таких причин:

2.7.1. Відсутність в ОІК ПЗЕС аналітичної системи відтворення електроспоживання і використання для невідомих параметрів режиму середньостатистичних даних.

2.7.2. Відсутність в оперативно-інформаційному комплексі ПЗЕС (ОІК ПЗЕС) показань окремих телеметричних пристроїв.

Диспетчер також має можливість, двічі натиснувши ліву кнопку *Миші* на назві РЕМ, викликати на екран вікно (рис. 6.14), в якому зображена розгортка споживання РЕМ по окремих підстанціях.



Об'єкт	Рф.МВт
ПС-110кВ Жмеринка	9.16
ПС-110кВ Сл.Межирівськ	3.37
ПС-110кВ Подільська-тя	0.90
ПС-110кВ Носківці	0.80
ПС-110кВ Станіславчик	1.50
Почапінці	0.73
Жуківці	2.08
Володимирівка	2.30
Браїлів	0.37

Рис. 6.14. Розгортка споживання РЕМ по окремих підстанціях

Диспетчер може переглядати не тільки поточну таблицю *інтегральних показників*, але і архівні таблиці. Приклади наведені на рис. 6.15, 6.16.

АРХІВ Аналіз (19.08-11:22:00)						
Об'єкт	Р ₀ ,МВт	Р _{рдц} ,МВт	Р _{рдц} ,МВт	Р _ф ,МВт	Р,МВт	Р _{розбіжн} ,МВт
Барський РЕМ	9.00	0.00	0.00	6.23	-2.77	0.00
Вінницький РЕМ	86.90	0.00	0.00	78.76	-8.14	0.00
Замостянський РЕМ	11.50	0.00	0.00	14.07	2.57	0.00
Жмеринський РЕМ	10.80	0.00	0.00	13.60	2.80	0.00
Козятинський РЕМ	11.40	0.00	0.00	11.24	-0.16	0.00
Калинівський РЕМ	11.30	0.00	0.00	14.21	2.91	0.00
Літинський РЕМ	4.50	0.00	0.00	4.51	0.01	0.00
Мог-Подільський РЕМ	12.90	0.00	0.00	7.30	-5.60	0.00
Мур-Куриловецький РЕМ	3.10	0.00	0.00	0.94	-2.16	0.00
Тиврівський РЕМ	8.60	0.00	0.00	6.68	-1.92	0.00
Хмільницький РЕМ	9.50	0.00	0.00	5.52	-3.98	0.00
Шаргородський РЕМ	8.60	0.00	0.00	7.01	-1.59	0.00
Чернівецький РЕМ	3.20	0.00	0.00	2.84	-0.36	0.00
Електротяга	23.30	0.00	0.00	20.04	-3.26	0.00
Бар КС-37	24.80	20.00	-4.80	19.72	-5.08	0.28
В/в втрати	5.60	0.00	0.00	7.83	2.23	0.00
Госп.потреби	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Разом по ВЦЕМ	245.00	214.00	-31.00	220.50	-24.50	-6.50

Рис. 6.15. Архівна таблиця РЕМ

АРХІВ Аналіз (19.08-11:22:00)						
Об'єкт	Р _о , МВт	Р _{рдц} , МВт	Р _{рдц} , МВт	Р _ф , МВт	Р, МВт	Р _{розбі}
+Системні підстанції	0.00	219.80	0.00	222.25	0.00	-2.45
+ТЕЦ-ГЕС	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00
-ДністрГЕС	0.00	23.20	0.00	23.20	0.00	0.00
ПЛ110Жван	0.00	2.20	0.00	2.20	0.00	0.00
ПЛ110Мог-Под2	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	0.00
ПЛ110Мог-Под1	0.00	5.00	0.00	5.00	0.00	0.00
+Молдовенерго	0.00	-3.00	0.00	-3.00	0.00	0.00
-Київобленерго	0.00	-5.40	0.00	-6.38	0.00	0.98
ПЛ110Коз.тяга-Фастов	0.00	-2.70	0.00	-3.65	0.00	0.95
ПЛ110Коз.тяга-Бровки	0.00	-2.70	0.00	-2.74	0.00	0.04
+Житомиробленерго	0.00	-2.90	0.00	-4.48	0.00	1.58
-Хмельницьобленерго	0.00	-7.30	0.00	-4.56	0.00	-2.74
ПЛ110МурКур-Ставчани	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ПЛ110Балки-Деражня	0.00	-7.30	0.00	-4.56	0.00	-2.74
+Східні електромережі	0.00	-12.80	0.00	-7.53	0.00	-5.27
Бар КС-37	24.80	20.00	-4.80	19.72	-5.08	0.28
В/в втрати	5.60	0.00	0.00	7.83	2.23	0.00
Госп.потреби	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Разом по ВЦЕМ	245.00	214.00	-31.00	220.50	-24.50	-6.50

Рис. 6.16. Архівна таблиця зовнішніх зв'язків

6.2.7. Інтерфейс віддаленого робочого місця

Для того, щоб керівництво підприємства електромереж могло контролювати режими електроспоживання, АСВЕС передбачає віддалені робочі місця в кабінетах директора, головного інженера та інших відповідальних осіб підприємства. Для цього розроблений спеціальний інтерфейс, який дозволяє переглядати поточні та архівні таблиці підстанцій та інтегральних показників. На відміну від інтерфейса диспетчера інтерфейс віддаленого робочого місця не дає можливості вносити зміни в базу даних АСВЕС.

6.3. Ефективність функціонування алгоритмів та програмного забезпечення АСВЕС

Розглянемо питання щодо ефективності функціонування алгоритму евристичної квазідетермінізації, на якому базується АСВЕС.

Інакше кажучи, проаналізуємо значення похибок відтворених параметрів режиму мережі. При цьому нас буде цікавити похибка двох видів – максимальна похибка розрахунку інтегральних показників електроспоживання (саме цей вид похибки найбільш важливий для диспетчерів, оскільки від нього залежить правильність оперативних рішень у випадку значного перевищення норм електроспоживання окремими районами електромереж) і максимальна похибка відтворення параметрів поточного електроспоживання окремих вузлів, не охоплених телевимірами. Зрозуміло, що перший вид похибки менший за другий, оскільки має місце ефект компенсації похибок окремих вузлів.

Цілком зрозуміло, що спочатку ми оцінимо значення похибок телевимірів, що виникають внаслідок похибок інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), яка постачає вхідними даними АСВЕС. В реальних вітчизняних системах телевимірювання ці похибки досить великі, і пояснюються це не лише похибками сенсорів, а й, головне, похибками масштабних перетворювачів – трансформаторів струму та напруги.

Граничні значення похибки телевимірів активної потужності можна визначити як: $\frac{h_P}{P_{\max}} 100\% \leq \delta_P \leq \frac{h_P}{P_{\min}} 100\%$, де h_P – крок квантування активної потужності, $P_{\min}$ – мінімальне навантаження ліній, обладнаних сенсорами, $P_{\max}$ – максимальне навантаження ліній, обладнаних сенсорами.

В первинній ІВС $h_P = 0.91 \text{ MBm}$, а навантаження ліній, які обладнані сенсорами, (в прикладах, представлених на рис. 6.7 – 6.11) коливається від $P_{\min} = 1.82 \text{ MBm}$ до $P_{\max} = 27.46 \text{ MBm}$. Очевидно, що в цьому випадку для похибки телевимірів можна записати $3.3\% \leq \delta_P \leq 50\%$.

Аналіз похибок відтворених параметрів режиму мережі проведемо з урахуванням історичного розвитку системи.

На початковій стадії функціонування АСВЕС телевимірюваннями було охоплено близько 12% підстанцій 110 кВ [37]. При цьому, визначена за алгоритмом (див. рис. 5.3) оптимальна кількість підстанцій, обладнаних телевимірюваннями, яка забезпечувала детермінізуючу сукупність параметрів для мережі 110 кВ підприємства, складала близько 36%. Тому не дивно, що максимальна похибка розрахунку ін-

тегральних показників електроспоживання перевищувала 70%, а максимальна похибка відтворення параметрів поточного електроспоживання окремих вузлів досягала майже 100%.

Поступово, в міру наростання капіталовкладень в інформаційно-вимірну систему, почав спадати рівень похибок. На жаль, внаслідок постійних фінансових проблем, керівництву не вдалось довести відносну кількість оснащених телеметричними пристроями трансформаторних підстанцій до бажаних 36%.

Графік залежності максимальної похибки інтегральних показників електроспоживання від відносної кількості трансформаторних підстанцій, обладнаних телеметричними пристроями, зображений на рис. 6.17.

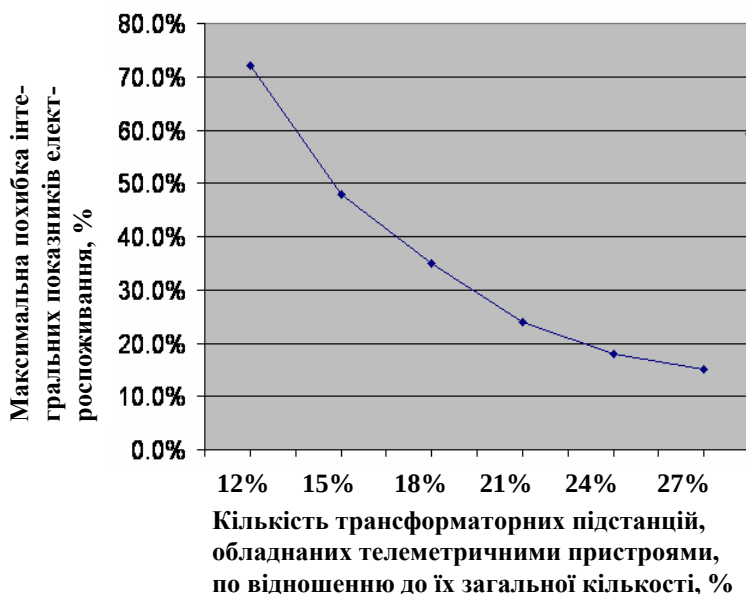


Рис. 6.17. Графік залежності максимальної похибки інтегральних показників електроспоживання від відносної кількості підстанцій, обладнаних телеметричними пристроями

Причина цього явища криється в стратегії поступового оснащення трансформаторних підстанцій телеметричними пристроями.

Нагадаємо, що в першу чергу телеметричні пристрої встановлювались на шинах живильних підстанцій та інших вузлах з найвищим *ступенем вершини*.

Цілком зрозуміло, що в цьому випадку підмножини F , P , G нарощувалися набагато швидше, ніж підмножина Θ .

Подальші капіталовкладення вже робились в телеметричні пристрої вузлів із меншим *ступенем вершини* і хоча підмножина Θ зростала із такою ж самою швидкістю, що і раніше, підмножини F , P , G росли значно повільніше.

По суті, виходить, що відносна кількість трансформаторних підстанцій, обладнаних телеметричними пристроями, прямо пропорційна $Card(\Theta)$, а максимальна похибка інтегральних показників електроспоживання приблизно обернено пропорційна $Card(G)$.

З викладеного вище випливають декілька важливих висновків:

1. Якщо головною метою впровадження АСВЕС на підприємстві електромереж є забезпечення контролю саме інтегральних показників електроспоживання і рівень похибки відтворення електроспоживання окремих вузлів мережі не є визначальним, то керівництво підприємства може зупинити капіталовкладення в інформаційно-вимірювальну систему на тому рівні похибок (згідно графіка рис. 6.17), який його влаштовує. При цьому зовсім не обов'язково доводити оснащення трансформаторних підстанцій телеметричними пристроями до рівня, який забезпечує детермінізуючу сукупність параметрів. Разом з тим, слід мати на увазі, що внаслідок комутаційних перемикачів або зіпсування каналів зв'язку з *телеметричними* підстанціями, можуть зменшитись підмножини Θ_1 та G , що призведе до зростання максимальної похибки інтегральних показників електроспоживання. Тому, найдоцільнішим можна вважати вибір рівня максимальної похибки інтегральних показників (і, звичайно, кількості оснащених телеметричними пристроями трансформаторних підстанцій) з деяким "запасом".
2. Якщо керівництво підприємства електромереж зацікавлене також і в точності відтворення електроспоживання окремих вузлів мережі, то воно повинно довести капіталовкладення в інформаційно-вимірювальну систему до рівня, який забезпечує детермінізуючу сукупність параметрів. Звичайно, це теж доцільно робити з деяким "запасом".

Протягом дослідної експлуатації АСВЕС, як фахівцями підприємства електромереж, так і розробниками АСВЕС, проводилась постійна робота по перевірці похибки відтворення режиму мережі, тобто адекватності алгоритму евристичної квазидетермінізації. Були

ватності алгоритму евристичної квазідетермінізації. Були також проаналізовані основні складові цієї похибки та причини їх виникнення.

В результаті цієї роботи було виявлено, що:

- Найбільшою за значенням складовою похибки відтворення режиму мережі є похибка, яка утворюється внаслідок похибок інформаційно-виміральної системи. Ця складова “відповідає” приблизно за 60% загальної похибки.
- Наступною за значенням складовою похибки відтворення режиму мережі є похибка, яка утворюється внаслідок порушення евристичного припущення щодо пропорційності фактичних навантажень у вузлах їх типовим навантаженням. Ця складова “відповідає” приблизно за 30% загальної похибки.
- Нарешті, найменшою складовою похибки відтворення режиму мережі є похибка, яка утворюється внаслідок порушення евристичного припущення щодо стабільності значень $\cos\varphi$ в лініях. Ця складова “відповідає” приблизно за 10% загальної похибки.

Тому, очевидно, що для суттєвого зниження загальної похибки відтворення режиму мережі необхідні такі заходи:

- Переобладнання трансформаторних підстанцій масштабними перетворювачами (трансформаторами струму) з меншими значеннями коефіцієнта трансформації для зниження кванта вимірів активної потужності (h_p). Звичайно при цьому слід враховувати те, що від цих трансформаторів струму можуть також житися пристрої релейного захисту та автоматики.
- Досягнення такого рівня оснащення трансформаторних підстанцій телеметричними пристроями, який забезпечує детермінізуючу сукупність відомих параметрів.

ВИСНОВКИ

В результаті досліджень, висвітлених в монографії, встановлено:

1. Моделі та методи відтворення режимів електричних мереж, які існували до цього дослідження, мали декілька істотних недоліків, а саме:
 - 1.1. Не була визначена залежність сумісності системи вузлових рівнянь, що розв'язувалась в задачі відтворення режимів електричних мереж, від місць розташування телеметричних пристроїв.
 - 1.2. Мала місце суттєва невизначеність задачі відтворення режимів електричних мереж внаслідок практичної неможливості вимірювати комплексні значення напруги на шинах підстанцій.
 - 1.3. Використання нечітких множин з жорстко заданою функцією належності в нечітких моделях відтворення режиму (які базуються на традиційному максимінному принципі узагальнення) призводила до високої залежності результатів від суб'єктивних помилок експертів.
2. Задачу відтворення режимів електричних мереж доцільно розглядати як окремий випадок задачі детермінізації процесів в складних системах в умовах неповноти вхідних даних. Що стосується недоліків, наведених в п.1, то для п.1.1 доцільно застосувати методи теорії графів, для п. 1.2 – використати неевклідову метрику, для п.1.3 – використати нетрадиційні операції теорії нечітких множин.
3. Основними теоретичними здобутками роботи є:
 - 3.1. Розробка основних положень теорії детермінізації процесів в складних системах.
 - 3.2. Визначення умов відтворення стану систем з лінійними та лінеаризованими функціональними зв'язками.
 - 3.3. Розробка нового методу суттєвого зменшення невизначеності вхідних даних в задачі відтворення параметрів електроспоживання за допомогою лінійної неевклідової метрики.
 - 3.4. Розробка аксіоматики класу нетрадиційних операцій та принципів узагальнення в теорії нечітких множин.
4. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:
 - 4.1. Теорія детермінізації процесів в складних системах дозволяє розв'язувати задачу відтворення стану складної системи для довільних технічних систем з лінійними та лінеаризованими

- функціональними зв'язками, в тому числі і для систем електропостачання.
- 4.2. Теорема, яка визначає умови відтворення стану систем з лінійними та лінеаризованими функціональними зв'язками, дозволяє коректно розташувати джерела інформації на графі системи без попередніх обчислень, що суттєво підвищує ефективність алгоритмів.
 - 4.3. Модель та алгоритм евристичної квазідетермінізації, які базуються на неевклідовій метриці в просторі комплексних електротехнічних параметрів, дають можливість підвищити точність та ефективність розв'язання задачі відтворення параметрів електроспоживання
 - 4.4. Модель та алгоритм нечіткої квазідетермінізації, які базуються на нетрадиційному класі операцій та принципів узагальнення теорії нечітких множин, дозволяють підвищити ефективність розв'язання задачі відтворення параметрів електроспоживання і зменшити її залежність від суб'єктивних похибок експертів.
5. Одержані наукові результати впроваджені в програмному комплексі “Аналітична Система Відтворення Електроспоживання” (АСВЕС), який з 1997р. успішно функціонує в оперативно-диспетчерській службі Вінницьких центральних високовольтних електромереж. Можливості АСВЕС дозволяють відтворювати і відображати параметри поточного електроспоживання в усіх вузлах без телевимірів, а також забезпечувати розрахунок і контроль балансів активної потужності й енергії підприємств електромереж, РЕМ і окремих значних споживачів із достатньою точністю навіть за умови дуже обмеженої кількості реальних вимірів. АСВЕС дає можливість безперервно вести поточні розрахунки технічних втрат в мережі, що дозволяє визначати місця позаоблікового електроспоживання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д., Серова И.А. Синтез системы сбора и передачи информации в случае оценивания состояния по линейной модели // Сб. научн. тр. Моск. энерг. ин-та, вып. 104. – М.: МЭИ, 1986. – С. 60-65.
2. Бердников В.И., Бучинский Л.А., Гамм А.З. и др. Алгоритм достоверизации измерений и оценивание состояния ЭЭС в реальном времени // Электричество. – 1999. – №2.
3. Бочарников В.П. Модель нечеткого процесса для задач управления нечеткими динамическими системами // Проблемы управления и информатики. – 1996. – №3. – С. 61-66.
4. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. – М.: Советское радио, 1973. – 440 с.
5. Буткевич О.Ф. Про один з аспектів постановки задачі оцінювання стану електричних мереж за умов неповноти інформації // Технічна електродинаміка. 1998. – №2. – С. 60-66.
6. Буткевич О.Ф. Інтелектуалізація систем диспетчерського управління територіально-розподіленими електроенергетичними об'єктами. // Автореф. дис. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук – Київ – 2001.
7. Бутковский А.Г. Кибернетика и структуры // Проблемы управления и информатики. – 1996. – №1-2. – С. 8-20.
8. Веников В.А., Оруджев Ф.Д. Размытое подобие нечетко заданных процессов в электрических системах // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1983. – №2. – С. 26-32.
9. Воропай Н.И., Шутов Г.В. Нечеткие множества при оценке динамических свойств электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1982. – №5. – С. 41-51.
10. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976. – 220 с.
11. Гамм А.З. Нелинейная наблюдаемость электроэнергетической системы // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1980. – №2. – С. 3-14.
12. Гамм А.З. Развитие методов анализа установившихся режимов электроэнергетических систем в Институте систем энергетики им. Л.А.Мелentyева // Электричество. – 2000. – №11. – С.10-16.
13. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем. – М.: Наука, 1990. – 200 с.
14. Гвоздик А.А. Решение нечетких уравнений. // Техническая кибернетика. – 1984. – №5. – С. 176-183.

15. Гришин Ю.А., Колосок И.Н., Коркина Е.С. и др. Программно-вычислительный комплекс «Оценка» оценивания состояния ЭЭС в реальном времени // Электричество. – 1999. – №2.
16. Гроп Д., Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302с.
17. Дружинин В.В. Конторов Д.С. Системотехника. – М.: Радио и связь, 1985. – 200с.
18. Зайченко Ю.П. Многокритериальные задачи нелинейного программирования с нечеткими параметрами. Альтернативный подход. // Проблемы управления и информатики. – 1996. – №6. – С. 145-151.
19. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. – М.: Мир, 1971. – 400 с.
20. Касти Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 216 с., ил.
21. Кацев С.Ш. Детермінізація простору комплексних електротехнічних параметрів за рахунок часткового використання лінійної неевклідової метрики // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – №1. – С. 49-52.
22. Кацев С.Ш. Визначення умов однозначної детермінізації процесів в складних системах з лінійними функціональними зв'язками без попередніх обчислень // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – №1. – С. 51-54.
23. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1981. – 544с.
24. Кострикин А.И. Введение в алгебру. – М.: Наука, 1977. – 496 с.
25. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с., ил.
26. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. – 10-е изд. – М.: Наука, Глав. ред. физ. мат. лит., 1971. – 432с.
27. Лежнюк П.Д., Оболенский Д.И., Серова И.А. Адаптация метода узловых напряжений к составу исходной информации // Изв. вузов. Энергетика. – 1986. – №10. – С. 47-50.
28. Лежнюк П.Д., Серова И.А. Восстановление режима электрической системы по ограниченному объему исходных данных с использованием узлового уравнения // Межведомств. сб. научн. тр., вып. 65. – М.: МЭИ, 1985. – С. 10-18.
29. Лежнюк П.Д., Серова И.А., Нгуен Данг Там. Формування стратегії поетапного розвитку систем збору і передачі інформації в енергосистемах // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1994. – №1. – С. 63-68.

30. Манусов В.З., Озерных И.Л., Перков С.Д. Расчет установившихся режимов электрических систем в нечетко-определенных условиях // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1986. – №8. – С. 13-17.
31. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, Глав. ред. физ. мат. лит., 1981. – 488с.
32. Митюшкин Ю. И., Мокин Б. И., Ротштейн А. П. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2002. – 146 с.
33. Мокин Б. И., Грабко В.В., Динь Тхань Вьет. Математические модели и информационно-измерительные системы для технической диагностики трансформаторных вводов. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 1997. – 130 с.
34. Мокін Б. І., Леонтьєв В. О., Мокін О. Б. Стратегія пошуку оптимального співвідношення лабораторного практикуму та наукових досліджень в навчальному процесі інженерних спеціальностей. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2002. – 144 с.
35. Мокин Б.И., Корбич Ю. Математические модели контроля и управления в энергетике. К.: "Техніка", 1990, 192 с. Зелена Гура: Издательство высшей инженерной школы, 1990, 160 с.
36. Мокин Б.И., Мизерный В.Н. Восстановление сигналов в многосвязных системах управления // Автоматика. – 1986. – №2. – С. 73-77.
37. Мокин Б.И., Волков В.К., Каминский В.В., Кацев С.Ш. Аналитическая система диспетчерского контроля электропотребления в условиях недостаточного количества телеизмерений // Энергетика и электрификация. – 2001. – №2. – С. 36-40.
38. Мокін Б.І., Камінський В.В., Кацев С.Ш. Детермінізація процесів в складних системах з використанням обернено-прямих математичних моделей // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1997. – №3. – С. 105-109.
39. Мокін Б.І., Камінський В.В., Кацев С.Ш. Система відтворення режиму електроспоживання в умовах недостатньої кількості телеметричної інформації // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – №2. – С. 63-65.
40. Мокін Б.І., Камінський В.В., Кацев С.Ш. Система відтворення режиму електроспоживання в умовах недостатньої кількості телеметричної інформації // «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-99). Книга за матеріалами п'ятої міжнародної науково-технічної конференції. м. Вінниця, 3 – 5 лютого 1999 року. У 3-х томах. Том 3. – Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця", 1999.
41. Мокін Б.І., Камінський В.В., Кацев С.Ш. Нетрадиційні операції та принципи узагальнення в теорії нечітких множин (основні ідеї та

- перспективи застосування в прикладних задачах) // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – №5. – С. 83-88.
42. Мокін Б.І., Камінський В.В., Каців С.Ш. Властивості слабких операцій в теорії нечітких множин // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – №5. – С. 106-113.
43. Мокін Б.І., Камінський В.В., Каців С.Ш. Нетрадиційні операції та принципи узагальнення теорії нечітких множин в задачах квазідетермінізації процесів в складних системах // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – №6. – С. 173-175.
44. Мороз А.И. Курс теории систем: Учеб. пособие для вузов по спец. «Прикл. математика». – М.: Высш. шк., 1987. – 304 с., ил.
45. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. – Т. 1. – Энергия, Ленингр. Отд. – 1967. – 522 с.
46. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения: Пер. с англ. / Под ред. Р.Р.Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с., ил.
47. В.Н. Николаев, В.М. Брук. Системотехника: методы и приложения. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199с., ил.
48. Оре О. Теория графов. – 2-е изд. – М.: Наука, Глав. ред. физ. мат. лит., 1980. – 336с.
49. Писсанецки С. Технология разреженных матриц. – М.: Мир, 1988. – 410 с., ил.
50. Попов В.А., Экель П.Я. Теория нечетких множеств и задачи управления развитием и функционированием электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1986. – №4. – С. 143-151.
51. Почечуев С.В., Унароков А.А. Применение разреженных матриц при оценке состояния электроэнергетической системы // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1982. – №2. – С. 53-59.
52. Садовский В.Н. Общая теория систем как метатеория // Вопросы философии. – 1972. – №4.
53. Сильвестров А.Н. Два альтернативных подхода к идентификации реальных объектов // Проблемы управления и информатики. – 1996. – №6. – С. 54-65.
54. Снежко А.Г., Скрипник А.Н. Расчет режима ненаблюдаемой по телеметрии части схемы электрической сети энергосистемы в ППП ТОРОС // Энергетика и электрификация. – 1995. – №1. – С. 39-40.
55. Современные методы идентификации систем / Под ред. П. Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400 с.

56. Теория систем. Математические методы и моделирование. Т44. Сборник статей. Под ред. Колмогорова А.Н., Новикова С.П. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 384с.
57. Харари Ф., Палмер Э. Перечисление графов. – М.: Мир, 1977. – 324 с.
58. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. – М.: Наука, 1984, 320с.
59. Шостак Л.П. Нечеткие кардиналы и мощности нечетких множеств. // Алгебра и дискретная математика. – Рига: Латв. гос. ун-т, 1989. – С. 137-144.
60. Шостак Л.П. Два десятилетия нечеткой топологии: основные идеи, понятия и результаты // Успехи математических наук. — 1989. – Т.44, вып.6 (270). – С.99-147.
61. Ю.А. Шрейдер, А.А. Шаров. Системы и модели. - М.: Радио и связь, 1982. -152с.
62. Экель П.Я., Попов В.А. Учет факторов неопределенности в задачах моделирования и оптимизации электрических сетей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1985. – №2. – С. 50-58.
63. Экель П.Я. Неопределенность исходной информации и дискретность в задачах оптимизации электрических сетей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1986. – №3. – С. 48-54.
64. Artigo G., Moresco R. On fuzzy metrizable // J.Math. Anal.Appl. – 1985. – V.107. – P.144-147.
65. Atkin R.H. Mathematical Structure in Human Affairs. – Heinemann, London. – 1973.
66. Casti J. Dynamical Systems and Their Applications: Linear Theory. – Academic Press, New York. – 1977.
67. De Luca A., Termini S. Algebraic properties of fuzzy sets // J.Math. Anal.Appl. – 1972. – V.40. – P.373-386.
68. Dubois D., Prade H. Fuzzy real algebra, some results // Fuzzy Sets & Syst. – 1979. – V.2. – P.327-348.
69. Dubois D., Prade H. Systems of Linear Fuzzy Constraints // Fuzzy Sets & Syst. – 1980. – V.3, №1.
70. Dubois D., Prade H. Fuzzy Real Algebra: Some Results // Fuzzy Sets & Syst. – 1979. – V.2, №4.
71. Eceg M.A. Functions, equivalence relations, quotient spaces and subsets in fuzzy set theory // Fuzzy Sets & Syst. – 1980. – V.3. – P.75-92.
72. Goguen J.A. L-fuzzy sets. // J.Math. Anal.Appl. – 1967. – V.18. – P.145-174.

73. Kaleva O., Seikkala S. On fuzzy metric spaces // Fuzzy Sets & Syst. – 1984. – V.12. – P.215-229.
74. Klement E.P. Operations on fuzzy sets – an axiomatic approach // Inform. Sciences. – 1982. – V.27. – P.221-232.
75. Mizumoto M., Tanaka K. Some properties of fuzzy numbers // Adv. Fuzzy Set Theory and Appl. – North Holland, 1979. – P.153-164.
76. Weinberg G. Introduction to General Systems Thinking. – Wiley, N. Y. – 1975.
77. Vemuri V. Modeling of Complex Systems: An Introduction. – Academic Press, New York. – 1978.
78. Yager R.R. On the Lack of Inverses in Fuzzy Arithmetic // Fuzzy Sets & Syst. – 1980. – V.4, №1.
79. Zadeh L.A. Fuzzy sets. // Inform. and Control. – 1965. – V.8. – P.338-353.

Наукове видання

**Самоїл Шулімович Кацив
Борис Іванович Мокін**

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЕТЕРМІНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ
В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Монографія

Редактор Т. Ягельська

Оригінал-макет підготовлено С. Кацивом

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к.114
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку 24.11.2005 р. Формат 29,7×42 ¹/₄
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,7
Наклад 100 прим. Зам. № 2005-192

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к.114
Тел. (0432) 59-85-32