

МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ
ЛУГАНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Л.И. Леви

**ОПЕРАТИВНЕ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО
ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА
ЗРОШУВАЛЬНИМИ
СИСТЕМАМИ**

Луганськ 2001

УДК 681.513; 62-50
ББК 39.71-082.02
Л 36

Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів
Лист № 14/18.2-1771 від 04.12.2001

Рецензенти:

Коробецький Ю.П., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
автоматики і систем управління Східноукраїнського національного
університету

Грїбанов В.М., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
прикладної математики Східноукраїнського національного університету

Белодєдов В.О., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
сільськогосподарських машин Луганського державного аграрного
університету

Лєві Л. І.

Л 36 **Оперативне управління системами сільськогосподарського
водопостачання та зрошувальними системами:** Навчальний
посібник. – Луганськ: вид-во СНУ, 2001. – 92 с.: бібліогр.
151 назв.

ISBN – 966-590-307-1

Навчальний посібник містить комплекс досліджень, котрі дозволяють
розв'язати проблему автоматизації технологічних процесів розподілу
цільового продукту шляхом реалізації процесів оперативного управління
ієрархічно організованими інженерними мережними системами, до яких
зокрема належать системи сільськогосподарського водопостачання та
зрошувальні системи, що має важливе народногосподарське та соціальне
значення. На відміну від відомих підходів до управління інженерними
мережними системами, запропоновані в навчальному посібнику призначені
для інженерних мережних систем з неповною інформацією про об'єкти
управління та середовище їхнього функціонування.

Для студентів спеціальностей "Механізація сільського господарства" та
"Промислове і цивільне будівництво", викладачів, аспірантів, наукових та
інженерно-технічних працівників.

УДК 681.513; 62-50
ББК 39.71-082.02

ISBN – 966-590-307-1

© Лєві Л.І.
©Східноукраїнський національний
університет, 2001

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Відповідно до [54 - 84], в даній роботі використані такі умовні
позначення та скорочення.

АК	- визначена процедура автоматичної класифікації.
АЕ	- активний елемент, який відповідає визначеній дузі ІМ.
ГА	- глобальний алгоритм управління ІМС, породжуваний відповідною ГЗ.
ГЗ	- глобальна задача управління ІМС, породжувана відповідною ГЦ.
ГСУ	- глобальна система управління, яка реалізує відповідний ГА в ієрархічно організованій ІМС.
ГЦ	- глобальна ціль функціонування ІМС.
ІМ	- визначена інженерна мережа, розглядувана на одному рівні ієрархії, без виділення в ній ієрархічної структури.
ІМС	- визначена інженерна мережна система, яка має ієрархічну організацію (структуру).
ЛА	- локальний алгоритм управління визначеною ЛМ, породжуваний відповідною ЛЗ.
ЛЗ	- локальна задача управління визначеною ЛМ, породжувана відповідною ЛЦ.
ЛМ	- визначена локальна мережа певного рівня ієрархії, котра входить як підсистема до складу ієрархічно організованої ІМС.
ЛСУ	- локальна система управління визначеною ЛМ, яка реалізує відповідний ЛА.
ЛЦ	- локальна ціль функціонування відповідної ЛМ.
МК	- магістральний канал зрошувальної системи, який є окремим випадком ММ ієрархічно організованої ІМС.
ММ	- магістральна мережа, яка є ЛМ найвищого рівня ієрархії в ієрархічно організованій ІМС.
НМ	- нечіткі множини.
НЛР	- нечіткий логічний регулятор.
ОП	- оперативна пам'ять керуючої ЕОМ.
ПК	- персональний комп'ютер.

- ППП - пакет прикладних програм, які реалізують визначену програму мережної оптимізації.
- СЦП - визначений споживач цільового продукту.
- ПЕ - пасивний елемент, який відповідає визначеній дузі ІМ.
- РМ - розподільна мережа, яка є ЛМ нижчого рівня ієрархії відносно до ММ ієрархічно організованої ІМС.
- МСЦП - мережа споживачів ЦП, яка є РМ найнижчого рівня ієрархії ієрархічно організованої ІМС.
- ЦП - цільовий продукт (вода), для транспортування якого з наступним перерозподілом між окремими СЦП призначена розглядувана ІМС.
- УЛА - універсальний локальний алгоритм управління визначеною ЛМ, породжуваний відповідною УЛЗ.
- УЛСУ - універсальна локальна система управління, яка реалізує УЛА у відповідній ЛМ.

ВСТУП

Відповідно до [24, 30 - 33, 62, 74, 108, 111, 114, 136], через спільності ряду характерних властивостей та особливостей, якими, зокрема, є такі:

- функціональне призначення;
- топологічна структура;
- моделі поточкорозподілів;
- задачі, методи та алгоритми управління;

системи сільськогосподарського водопостачання, а також зрошувальні системи можуть бути віднесені до класу ієрархічно організованих інженерних мережних систем (ІМС). На основі аналізу існуючих та проєктованих ІМС можна зробити висновок, що такі об'єкти можуть бути декомпозовані на певним чином взаємозалежні та взаємодіючі між собою в процесі функціонування окремі локальні мережі (ЛМ) різного рівня ієрархії. При цьому реальні ІМС на найвищому рівні ієрархії як ЛМ містять магістральні мережі (ММ), до яких підключені ЛМ більш низького рівня ієрархії – розподільні мережі (РМ). До РМ передостаннього рівня ієрархії підключені РМ найнижчого рівня ієрархії – мережі споживачів цільового продукту (МСЦП). До них безпосередньо підключені споживачі цільового продукту (СЦП), що здійснюють у підсумку споживання цільового продукту (ЦП) – води, із розглядуваної ієрархічно організованої ІМС [62, 74, 136].

Функціональним призначенням ММ є споживання ЦП із зовнішніх стосовно ІМС джерел, його транспортування та перерозподіл між РМ, підключеними до розглядуваної ММ.

Функціональним призначенням РМ є споживання ЦП із ММ, до якої підключена розглядувана РМ, його транспортування та перерозподіл між МСЦП, підключеними до даного РМ.

Функціональним призначенням МСЦП є споживання ЦП із РМ, до якої підключена розглядувана МСЦП, його транспортування та перерозподіл між СЦП, підключеними до даної МСЦП.

Внаслідок стохастичних змін режимів споживання ЦП окремими СЦП для створення припустимих умов їхнього функціонування є необхідною реалізація процесів оперативного управління ІМС [7, 8, 10, 20, 25, 33, 37, 43, 49, 77, 81, 97, 113, 130].

Відповідно до [54, 55, 58, 60, 69, 74, 77, 81, 136] ієрархічна декомпозиція ІМС як об'єкта оперативного управління породжує декомпозицію процесу оперативного управління ІМС на сукупність окремих локальних процесів оперативного управління, реалізованих у відповідних ЛМ розглядуваної ІМС. Для реалізації такого процесу передбачається використовувати глобальну систему управління (ГСУ) ієрархічно організованою ІМС.

Ієрархічна організація ІМС як об'єкта управління та пов'язана з нею ієрархічна декомпозиція процесу управління ІМС породжує ієрархічну організацію ГСУ, що реалізує відповідний процес оперативного управління [54, 55, 58, 60, 69, 74, 77, 81, 136].

Аналіз характерних властивостей та особливостей реальних ЛМ як об'єктів управління, проведений відповідно до [63, 67, 70], показує, що такі об'єкти характеризуються інформаційною невизначеністю (неповнотою інформації), нестаціонарністю, стохастичністю, а також складністю їхніх математичних моделей. Розглянемо вказані властивості та особливості реальних ЛМ, що входять до складу реальних ІМС.

1. Невизначеність ЛМ як об'єктів управління. Вона обумовлена неповнотою інформації як про об'єкти управління розглядуваного класу, так і про зовнішнє середовище їхнього функціонування. Вказана невизначеність включає такі аспекти:

- структурна невизначеність ЛМ;
- параметрична невизначеність ЛМ;
- невизначеність стану об'єктів управління розглядуваного класу.

Така неповнота інформації обумовлена практичною неможливістю проведення в повному обсязі та реальному масштабі часу структурної та параметричної ідентифікації, а також ідентифікації стану ЛМ як об'єктів управління [63, 67, 74]. Також практично не уявляється можливим зробити в повному обсязі ідентифікацію всіх змінних та параметрів, що надають істотні збурювальні дії на ЛМ як об'єкти управління [63, 67, 70, 74].

2. Нестационарність ЛМ як об'єктів управління. Вона включає такі аспекти:

- структурна нестаціонарність ЛМ;
- параметрична нестаціонарність ЛМ;
- нестаціонарність стану об'єктів управління розглядуваного класу.

Структурна нестаціонарність ЛМ обумовлена зміною топологічної структури реальних ЛМ внаслідок їхньої реконструкції та розвитку [63, 67, 70, 74].

Параметрична нестаціонарність ЛМ обумовлена як зміною параметрів, зв'язаних із реконструкцією та розвитком цих ЛМ, так і такою їхньою зміною, що має вигляд тенденцій у процесі функціонування об'єктів управління розглядуваного класу (звуження трубопроводів, зміна їхньої шорсткості, зміна русел каналів внаслідок замулення) [63, 67, 70, 74].

Нестационарність стану ЛМ обумовлена такими змінами процесів подачі ЦП із зовнішнього середовища або ЛМ вищого рівня ієрархії в розглядувану ЛМ, а також процесів споживання ЦП із розглядуваної ЛМ підключеними до неї ЛМ нижчого рівня ієрархії або СЦП, які мають характер тенденцій у процесі функціонування реальних ЛМ.

Зокрема, це зв'язано із сезонними змінами запасів ЦП у природних резервуарах, зміною потреб у ЦП внаслідок сезонних змін режимів поливу та споживання води [63, 67, 70, 74].

3. Стохастичність ЛМ як об'єктів управління. Вона включає такі аспекти:

- стохастичність зміни структури ЛМ;
- стохастичність зміни параметрів ЛМ;
- стохастичність зміни стану об'єктів управління розглядуваного класу.

Стохастичність зміни структури реальних ЛМ обумовлена як заходами, зв'язаними з їхньою реконструкцією, точний детальний прогноз яких практично неможливий, так і виникненням аварійних ситуацій в процесі функціонування об'єктів управління розглядуваного класу [63, 67, 70, 74].

Стохастичність зміни параметрів ЛМ обумовлена як стохастичністю фізичних процесів, що змінюють властивості та характеристики окремих елементів та конструкцій реальних ЛМ у процесі їхнього функціонування, так і такими їхніми змінами, які зв'язані з реконструкцією та розвитком ЛМ, а також виникненням в них аварійних ситуацій [63, 67, 70, 74].

Стохастичність зміни стану ЛМ обумовлена як стохастичністю процесів зміни структури та параметрів об'єктів управління розглядуваного класу, так і стохастичністю збурювальних дій з боку зовнішнього середовища на такі об'єкти. Зокрема, до зовнішніх збурювальних дій відносяться стохастичні процеси подачі та споживання ЦП, швидкість фільтрації та випару ЦП, а також такі

метеорологічні чинники, як напрямок та швидкість вітру, рівень сонячної радіації, атмосферні опади [63, 67, 70, 74].

4. Складність математичних моделей реальних ЛМ як об'єктів управління. Крім перерахованих чинників, вона обумовлена такими характерними властивостями та особливостями об'єктів управління розглядуваного класу:

- велика розмірність;
- розподільність параметрів;
- многозв'язність;
- динамічність;

істотна складність взаємозв'язків між змінними та параметрами поточкорозподілів, обумовлених у загальному випадку системами нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних [30 - 33, 113].

Проведений аналіз характерних властивостей та особливостей реальних ЛМ як об'єктів управління дозволяє зробити висновок, що вони є нечіткими об'єктами управління, які функціонують у нечіткому середовищі [92, 93]. Тому такі способи реалізації процесів управління ЛМ, які засновані на відомих методах розрахунку поточкорозподілів, у більшості випадків є малоефективними [30 - 33, 113].

З урахуванням специфіки реальних ЛМ для управління об'єктами розглядуваного класу вважаються адекватними підходи, які враховують неповноту інформації про об'єкти управління та середовище їхнього функціонування, а також складність математичних моделей зазначених об'єктів та процесів управління.

У роботах [6, 44, 105] докладно розглянуто питання, зв'язані з технічною реалізацією основних типів зрошувальних систем, наведено техніко-експлуатаційні характеристики їхніх функціональних елементів. У роботі [6] також розглянуто питання планування водорозподілів на зрошувальних системах різних типів. У роботі [7] із позицій теорії автоматичного управління розглянуто технічні засоби та реалізовані ними процеси управління окремими функціональними елементами зрошувальних систем. Зокрема, у цій роботі розглянуто апаратуру і технологію автоматизації процесів зрошення, водорозподіли на відкритих та закритих зрошувальних системах, автоматизацію меліоративних насосних станцій, а також свердловин на воду.

У роботі [39] розглянуто задачі та структуру служби експлуатації водогосподарських об'єктів, умови роботи гідротехнічних споруджень, а також чинники, що впливають на їхню надійність та

довговічність. У цій роботі проаналізовано особливості експлуатації гідротехнічних споруджень у різних можливих ситуаціях.

Питання проектування окремих гідротехнічних споруджень, що входять до складу меліоративних систем, розглянуто в [100].

У роботах [96, 118] розглянуто як загальні питання сільськогосподарського водопостачання, так і специфіку водопостачання окремих сільськогосподарських виробничих та побутових об'єктів. Зокрема, у цих роботах розглянуто норми та режими водоспоживання, схеми, спорудження та устаткування систем сільськогосподарського водопостачання, механізацію підйому та транспортування води, а також експлуатацію і техніко-економічне обґрунтування вибору устаткування для таких систем.

В [29, 37] зазначено, що сучасний період зрошувального землеробства характеризується переходом від зрошення окремих невеликих ділянок до зрошення великих масивів з груповим використанням високопродуктивних машин. У цьому зв'язку в [29, 37] розглянуто основні типи перспективних зрошувальних систем, їхні схеми та технічні рішення, а також умови застосування. Особливу увагу в [29, 37] приділено питанням автоматизації зрошувальних систем, а також забезпеченню їхньої надійності.

Для формалізації процесів функціонування ІМС та управління такими об'єктами можуть бути використані моделі, методи, алгоритми та процедури відповідно до [18, 35, 46, 48, 50, 53, 79, 83, 84, 98, 103, 120, 121, 122, 124, 125, 129, 133, 135, 139]. Зокрема, у [21, 24, 38, 49, 110, 112, 113] містяться різні аспекти моделювання функціональних елементів та процесів функціонування систем водопостачання, а також зрошувальних систем. Питання синтезу автоматизованих систем управління об'єктами розглядуваного класу містяться в [4, 10, 20, 22, 25, 40, 52, 132].

Різні аспекти моделювання, дослідження та синтезу керуючих систем складними технічними об'єктами розглядуваного класу знайшли відбиток у таких роботах.

Зокрема, у [26, 45, 47, 85, 88, 107, 109, 127, 128] пропонується використовувати структуровані системи для розв'язання системних задач проектування, зроблено висновок про доцільність використання структурованих систем для розв'язання системних задач проектування, про доцільність використання ієрархічних структур при проектуванні складних систем. У [26, 45, 47, 109, 127] містяться теоретичні аспекти представлення структурованих складних систем в оперативній пам'яті (ОП) керуючих ЕОМ, а також розроблено

методику і процедури структурної та параметричної ідентифікації, адекватні структурованим складним системам управління.

Методи і процедури автоматичної класифікації та зниження розмірностей, що лежать в основі реалізації керуючих алгоритмів, містяться в [100, 109]. Зокрема, найбільш ефективні з них ті, що використовують апарат ієрархічного кластер-аналізу та функціональних відповідностей; вони розроблені в [34].

Різні аспекти моделювання та дослідження потокорозподілів в узагальнених мережних системах містяться в [106, 126, 128]. Питання, пов'язані з алгоритмічною та програмною реалізацією задач мережної оптимізації, знайшли відбиток у [140 - 146].

Актуальність даної роботи полягає в тому, що в ній міститься комплекс досліджень, які дозволяють вирішити проблему автоматизації технологічних процесів розподілу ЦП шляхом реалізації процесів оперативного управління ієрархічно організованими ІМС, що має важливе народногосподарське і соціальне значення. На відміну від відомих підходів до управління ІМС, запропоновані в даній роботі призначені для ІМС з неповною інформацією про об'єкти управління та середовище їхнього функціонування.

Запропоновані підходи засновані на використанні можливості ієрархічної декомпозиції топологічної структури ІМС та породжуваної нею ієрархічної декомпозиції ГСУ, що дозволяє реалізувати ефективні локальні процеси оперативного управління в окремих ЛМ різного рівня ієрархії.

Результати, отримані в даній роботі, знайшли практичне застосування при моделюванні ГСУ та алгоритмізації процесів оперативного управління реальними зрощувальними системами, а також системами водопостачання. Використання матеріалів, розробок та результатів даної роботи дозволяє скоротити непродуктивні витрати ЦП та електроенергії, а також підвищити надійність та якість функціонування об'єктів управління розглядуваного класу.

Метою даної роботи є розробка теоретичних аспектів проблеми автоматизації технологічних процесів розподілу ЦП шляхом реалізації процесів оперативного управління ієрархічно організованими ІМС з неповною інформацією про об'єкти управління та середовище їхнього функціонування, реалізація теоретичних положень розглядуваної проблеми у вигляді конструктивних алгоритмів та відповідних ППП, які практично реалізують процеси оперативного управління реальними ІМС розглядуваного класу.

Для досягнення заданої мети в даній роботі вирішено такі питання.

1. Створення концептуальних основ моделювання оперативного керування ІМ в умовах неповної інформації, що дозволяють дати аналіз надійності та керованості для таких об'єктів.

2. Розробка концептуальних основ моделювання реальних ІМС розглядуваного класу як ієрархічно організованих об'єктів оперативного управління, що враховують їх структурні та функціональні особливості.

3. Створення концептуальних основ моделювання ієрархічно організованих ГСУ, що реалізують процеси оперативного управління в ІМС розглядуваного класу.

4. Дослідження проблеми координності в ієрархічно організованих оперативного керування ІМС.

5. Формалізація, алгоритмічна та програмна реалізація процесів оперативного управління ієрархічно організованими ІМС, адекватна стосовно істотних властивостей об'єктів управління розглядуваного класу.

Як методи дослідження в даній роботі використано такі розділи сучасного математичного апарату системно-структурного аналізу:

- теорія функцій та функціональний аналіз;
- теоретико-множинні та теоретико-графові моделі;
- теорія імовірностей, математична статистика та теорія випадкових процесів;
- теорія інформації та системний аналіз;
- кластер-аналіз та функціональні відповідності;
- теорія, моделі та методи математичного програмування;
- дослідження операцій, теорія прийняття складних рішень та теорія нечітких множин.

У даній роботі містяться такі нові наукові результати.

1. Комбінаторно-графові моделі та методи, пов'язані з визначенням ефективності керуючих дій в ІМ, а також оцінок надійності та керованості ІМ.

3. Система чинників для аналізу зміни найважливіших властивостей та особливостей, характерних для окремих ЛМ, у залежності від їхнього рівня ієрархії в ІМС.

4. Система моделей оптимізації проєктованих ЛМ різного рівня ієрархії, які входять до складу реальних ІМС, в аспекті реалізації процесів оперативного управління такими об'єктами.

5. Моделі та умови, які формалізують принципи координності в ієрархічно організованих ІМС.

7. Моделювання вертикальних взаємозв'язків та взаємодій підсистем в ієрархічно організованих керуючих системах із структурою, що змінюється.

9. Моделі, методи та алгоритми реалізації локальних процесів оперативного управління в окремих ЛМ ієрархічно організованих ІМС, що використовують статистичні методи, кластер-аналіз і функціональні відповідності, а також моделі і методи теорії нечітких множин (НМ).

Практична цінність даної роботи обумовлена можливістю використання концептуальних підходів, що містяться в ній, методів, моделей та алгоритмів науково-дослідними та проектно-конструкторськими організаціями, пов'язаними з розробкою керуючих систем та процесів оперативного управління мережними системами водопостачання, а також зрошувальними системами в умовах неповної інформації про об'єкти управління розглядуваного класу та середовище їхнього функціонування.

Наукові та практичні результати, отримані в роботі, широко апробовані при розробці систем та процесів оперативного управління реальними ІМС. Результати, отримані в даній роботі, знайшли практичне застосування при моделюванні ГСУ та алгоритмізації процесів оперативного управління зрошувальними системами, а також мережними системами сільськогосподарського водопостачання. Зокрема, моделі, методи та алгоритми, котрі містяться в даній роботі, використані Інститутом гідротехніки і меліорації УААН (м. Київ), Луганським обласним виробничим управлінням меліорації і водного господарства, Обласним державним комунальним підприємством «Луганськводоканал» при розробці та реалізації керуючих систем і процесів оперативного управління зрошувальними системами, а також мережними системами сільськогосподарського водопостачання.

Концептуальні аспекти, моделі, методи, процедури та алгоритми, що містяться в даній роботі, використані в навчальному процесі при підготовці та читанні курсів, пов'язаних з управлінням зрошувальними системами, а також мережними системами сільськогосподарського водопостачання, у технічних та аграрних університетах для студентів спеціальностей «Механізація сільськогосподарства» та «Промислове і цивільне будівництво». Вони також можуть бути корисними для викладачів, аспірантів, наукових та інженерно-технічних працівників.

Автор висловлює щирі вдячність рецензентам – завідувачу кафедри автоматики і систем управління Східноукраїнського

національного університету доктору технічних наук, професору Коробецькому Ю.П., завідувачу кафедри прикладної математики Східноукраїнського національного університету доктору технічних наук, професору Грібанову В.М., завідувачу кафедри сільськогосподарських машин Луганського державного аграрного університету доктору технічних наук, професору Бєлодєдову В.О.

Особливу вдячність автор висловлює ректору Луганського державного аграрного університету академіку Академії економічних наук України, доктору економічних наук, професору Ткаченко В.Г. за постійну підтримку його роботи та допомогу в виданні цього навчального посібника.

АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ТА КЕРОВНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ

1.1. Комбінаторно-графовий підхід до оперативного управління інженерними мережами

При дослідженні ІМ як об'єктів оперативного управління в [79 - 81] було виконано наступні розробки і при цьому було отримано такі результати.

1. Формалізовано структуру і функціональні елементи оперативного керування ІМ та зроблено постановку узагальненої задачі оперативного управління такими об'єктами.

2. Розроблено систему показників для оцінювання керуючих алгоритмів, породжуваних відомими методами реалізації поставленої узагальненої задачі оперативного управління ІМ.

3. Проведено аналіз керуючих алгоритмів, породжуваних узагальненою задачею, із використанням для цієї мети системи показників для оцінювання керуючих алгоритмів.

4. Показано, що відомі методи реалізації узагальненої задачі оперативного управління ІМ не дозволяють одержати ефективні керуючі алгоритми. На підставі цього зроблено висновок про необхідність таких нових підходів до управління ІМ, які б враховували істотні структурні та функціональні особливості об'єктів управління розглядуваного класу і породжували ефективні алгоритми оперативного управління.

Ці результати використано в даній роботі при дослідженні ІМ в аспекті оперативного управління такими об'єктами.

Відомі різні способи реалізації процесів управління ІМ, що використовують різні методи розрахунку сталих потокорозподілів у ІМ. До них, зокрема, відносяться метод Ньютона, модифікований метод Ньютона, метод Лобачева-Кросса, узагальнений метод Ньютона, метод координатного спуску, метод сполучених напрямків Флетчера-Ривса, а також метод змінної метрики Девідона-Флетчера-Пауелла [30 - 33].

Практична реалізація керуючих процесів, заснованих на перелічених методах, зустрічає такі труднощі [30 - 33, 56].

1. Необхідна дуже велика ємність ОП керуючої ЕОМ для збереження даних, що беруть участь у обчислювальному процесі: апіорної інформації про параметри всіх дуг ІМ та робочої інформації – проміжних величин, використовуваних в обчислювальному процесі.

2. Необхідні значні витрати процесорного часу керуючої ЕОМ для виконання дуже великого числа ітерацій з метою розрахунку керуючих дій, що забезпечують необхідний потокорозподіл.

Тому в даному підрозділі пропонується інший підхід до управління ІМ, безпосередньо не зв'язаний із необхідністю розрахунку сталих потокорозподілів в ІМ [56, 79, 80].

Будучи комбінаторно-графовим, запропонований підхід враховує істотні структурні та функціональні особливості об'єктів управління розглядуваного класу. Цим він дозволяє істотно зменшити ємність ОП та скоротити кількість процесорного часу керуючої ЕОМ, необхідного для формування керуючих дій в ІМ.

Для розгляду запропонованого в даному підрозділі комбінаторно-графового підходу до управління ІМ відповідно до [56] введемо наступні позначення та поняття.

Множина вершин графа G , що відповідає вузлам ІМ N , підключеним до АЕ, позначимо A та назвемо множиною вхідних вершин графа G . У реальних ІМ вхідними вершинами є лише деякі з множини усіх вершин V . Тому будемо вважати, що між множиною вхідних вершин A та множиною усіх вершин V має місце наступне співвідношення: $A \subset V$. Визначений АЕ, що бієктивно відповідає вхідній вершині x , позначимо S_x , де $x \in A$. Відповідно до математичної моделі потокорозподілу в ІМ [30 - 33], в результаті функціонування АЕ S_x створюються певні напори (рівні) ЦП Z_y у вершинах y , де $x \in A, y \in V$.

Кожній дузі $j \in E$ моделюючого графа G поставимо у відповідність величину I_j , що формалізує гідравлічний опір відповідної ділянки розглядуваної ІМ N . Існують різні способи розрахунку значень I_j для реальних ІМ. Ці величини також можуть бути визначені в процесі ідентифікації ІМ як об'єктів управління [30 - 33, 123, 126].

Нехай вершини $x, y \in V$ моделюючого графа G зв'язані ланцюгом P_{xy} . Тоді довжина ланцюга P_{xy} , що виражає опір відповідної ділянки ІМ N , може бути визначена співвідношенням:
$$L_{xy} = \sum_{j \in P_{xy}} l_j.$$

У загальному випадку розглядувані вершини $x, y \in V$ графа G можуть бути зв'язані декількома ланцюгами P_{xy} , що обумовлено наявністю декількох ділянок у ІМ N , котрі з'єднують відповідні вузли. Тоді найкоротшим ланцюгом K_{xy} назвемо такий ланцюг P_{xy} , що має найменшу довжину L_{xy} . Довжину L_{xy} найкоротшого ланцюга K_{xy} позначимо M_{xy} . Величина M_{xy} визначається наступним співвідношенням: $M_{xy} = \min \{L_{xy}\}$.

Моделюючий граф G топологічної структури ІМ N , що формалізує комбінаторно-графовий підхід до управління об'єктом розглядуваного класу, наведений у [79 - 81].

Виходячи з математичної моделі поточкорозподілу в ІМ N , процес управління об'єктом розглядуваного класу включає цілеспрямовані дії на всі або деякі АЕ S_x , де $x \in A$, для реалізації необхідних змін напорів (рівнів) ЦП Z_y , де $y \in V$, відповідно до певних критеріїв управління [30-33, 123, 126]. Для реалізації процесу управління ІМ в даному підрозділі пропонується використовувати наступні евристики.

1. Для зміни величини Z_y необхідно в першу чергу використовувати ті АЕ S_x , що найбільш ефективно впливають на величину Z_y , де $x \in A, y \in V$.

2. Ступінь впливу АЕ S_x на величину напору Z_y будемо характеризувати довжиною M_{xy} найкоротшого ланцюга K_{xy} із вершини x в вершину y , де $x \in A, y \in V$. При цьому чим менше довжина найкоротшого ланцюга, тим ступінь впливу визначеного АЕ на напір (рівень) ЦП у розглядуваній вершині вважається більшим.

Справедливість даних евристик обумовлена певними твердженнями, що установлюють взаємозв'язок між керуючими

змінними та параметрами сталих поточкорозподілів у ІМ, що сформульовані та доведені в [79 - 81].

У відповідності зі специфікою математичної моделі поточкорозподілу в ІМ, дані евристики сприяють зменшенню енергетичних витрат при створенні припустимих умов функціонування для СЦП, підключених до розглядуваного ІМ, що сприяє реалізації узагальненої задачі оперативного управління розглядуваної ІМ, формалізованої в [79 - 81].

Запропонований в даному підрозділі комбінаторно-графовий підхід до управління ІМ формалізуємо таким способом. Нехай множини V та A містять відповідно v та a вершин: $|V| = v, |A| = a$. З умови $A \subset V$ випливає, що $a < v$. Не зменшуючи спільності, усі вершини множини V занумеруємо v послідовними натуральними числами так, що перші a із них відповідають підмножині $A \subset V$. Оскільки кожній вхідній вершині $x \in A$ бієктивно відповідає АЕ S_x , з'єднаний із розглядуваною вхідною вершиною, будемо вважати, що кожний АЕ S_x має номер, що відповідає вхідній вершині D_y . У цьому випадку усі АЕ S_x будуть так само, як і вхідні вершини $x \in A$, занумеровані першими a натуральними числами.

Для кожної вершини $y \in V$ упорядкуємо множину номерів всіх АЕ S_x за ступенем їхнього впливу на величину Z_y , де $x \in A$. Ступінь впливу АЕ S_x на величину Z_y відповідно до прийнятих евристик будемо оцінювати довжиною M_{xy} найкоротшого ланцюга K_{xy} , де $x \in A, y \in V$. Для цього кожній вершині $y \in V$ поставимо у відповідність вектор D_y , координатами якого є номери всіх АЕ S_x , упорядковані за зростанням величини M_{xy} , де $x \in A$. Такий вектор назвемо вектором упорядкування номерів АЕ за ступенем їхнього впливу на величину Z_y у вершині $y \in V$. Розмірність вектора D_y для кожної вершини $y \in V$, обумовлена числом його координат, дорівнює загальній кількості АЕ a розглядуваної ІМ N .

Вектор D_y може бути використаний для визначення тих АЕ S_x , на котрі потрібно впливати в першу чергу при необхідності зміни величини Z_y у вершині y в процесі управління ІМ N , де $x \in A, y \in V$.

Сукупність векторів D_y для усіх вершин $y \in V$ утворить матрицю $D = \{D_y\}$. Матрицю D назвемо матрицею упорядкування АЕ S_x , де $x \in A$, за ступенем їхнього впливу на напори Z_y в усіх вершинах $y \in V$ графа G . Кожним рядком матриці D є вектор D_y , що відповідає визначеній вершині $y \in V$. Тому число елементів у рядку матриці D , що визначає кількість її стовпців, відповідає розмірності вектора D_y та дорівнює числу a . Число рядків матриці D визначається кількістю усіх вершин y , що входять у множину V , і тому дорівнює числу v . Отже, матриця D має розмірність $v \times a$.

Матриця D формалізує запропонований у даному підрозділі комбінаторно-графовий підхід до управління ІМ N .

Запропонований комбінаторно-графовий підхід може бути використаний при синтезі систем, що реалізують процеси управління ІМ розглядуваного класу. На відміну від відомих способів управління, заснованих на чисельних методах розрахунку потокорозподілів в ІМ, запропонований підхід у загальному випадку не забезпечує оптимального управління об'єктами розглядуваного класу. Однак запропонований комбінаторно-графовий підхід враховує істотні структурні та функціональні особливості таких об'єктів. Це дозволяє в порівнянні з відомими методами значно зменшити необхідну ємність ОП та скоротити необхідну кількість процесорного часу керуючої ЕОМ.

1.2. Методика оцінювання ефективності керуючих дій на інженерні мережі

Однієї з задач, породжуваних проблемою управління ІМ, є оцінювання ефективності керуючих дій, що надаються АЕ, які включають насосні агрегати, насосні станції та водонапірні вежі, на величини напорів (рівнів) ЦП, створюваних цими АЕ у визначених вершинах ІМ. Для розв'язання такої задачі в даному підрозділі пропонується використовувати відповідний комбінаторно-графовий підхід. Концептуалізацію, формалізацію, а також прикладні аспекти комбінаторно-графового підходу до управління ІМ розглянуто в [56]. Даний підхід є логічним продовженням, розвитком та узагальненням запропонованого в [56] комбінаторно-графового підходу з метою його використання для визначення ефективності керуючих дій, які надаються АЕ на напори (рівні) ЦП у визначених вершинах ІМ [59, 79, 80].

Для розгляду запропонованого в даному підрозділі комбінаторно-графового підходу до визначення ефективності керуючих дій будемо використовувати формалізацію ІМ N відповідно до [56, 59, 79, 80]. Зокрема, будемо вважати, що кожній вхідній вершині x моделюючого графа G розглядуваної ІМ N біективно відповідає АЕ S_x ; при цьому $x \in V^a$, де V^a - множина вхідних вершин на моделюючому графі G розглядуваної ІМ N . Також будемо припускати, що виходячи з функціонального призначення розглядуваної ІМ N , на її моделюючому графі G визначена множина вершин із керованими напорами (рівнями) ЦП, яку позначимо V^r . При цьому будемо вважати, що кожній вершині з керованим напором $y \in V^r$ відповідає визначена величина керованого напору Z_y . Для реалізації процесу управління ІМ N необхідно мати можливість визначити (виміряти, оцінити) ефективність керуючої дії з боку АЕ S_x , яка надається на величини керованих напорів Z_y , де $x \in V^a$, $y \in V^r$. З цією метою відповідно до [56, 59] будемо використовувати наступну евристику.

Ефективність керуючої дії, що надається АЕ S_x на величину Z_y , будемо визначати (вимірювати, оцінювати) довжиною M_{xy} найкоротшого ланцюга K_{xy} на моделюючому графі розглядуваної ІМ, де $x \in V^a$, $y \in V^r$.

При цьому передбачається, що концептуальні поняття довжини M_{xy} найкоротшого ланцюга K_{xy} на моделюючому графі ІМ визначені та формалізовані відповідно до [56, 59].

Справедливість такої евристики обумовлена певними твердженнями, що установлюють взаємозв'язок між керуючими змінними (параметрами) та змінними (параметрами) сталих потокорозподілів в ІМ, що сформульовані та доведені в [79 - 81].

Виходячи зі специфіки математичної моделі потокорозподілу в ІМ, можна зробити висновок, що така евристика дозволяє зменшити енергетичні витрати при створенні припустимих умов функціонування СЦП, підключених до розглядуваної ІМ N . Це сприяє реалізації узагальненої задачі оперативного управління ІМ N , формалізованої в [79 - 81].

Вказана модель ІМ як об'єкта управління та сформульована на її підставі евристика дозволяють поставити наступні задачі, зв'язані з визначенням ефективності керуючих дій в ІМ.

Задача 1. Необхідно визначити ефективність керуючих дій, що надаються АЕ S_x , який відповідає визначеній вхідній вершині $x \in V^a$, на величини напорів Z_y в усіх вершинах із керованими напорами $y \in V^r$.

Задача 2. Необхідно визначити ефективність керуючих дій, що надаються АЕ S_x , які відповідають усім вхідним вершинам $x \in V^a$, на величину напору Z_y у визначеній вершині з керованим напором $y \in V^r$.

У змістовному аспекті поставлені задачі 1 і 2 є взаємозворотними. На підставі сформульованої евристики розв'язання задачі 1 зводиться до пошуку довжин M_{xy} найкоротших ланцюгів K_{xy} для визначеної вершини $x \in V^a$ та вершин $y \in V^r$ на моделюючому графі G розглядуваної ІМ N . Аналогічно розв'язання задачі 2 зводиться до пошуку довжин M_{xy} найкоротших ланцюгів K_{xy} для вершин $x \in V^a$ та визначеної вершини $y \in V^r$ на моделюючому графі G розглядуваної ІМ N .

Специфіка поставлених задач дозволяє для їхнього розв'язання використовувати відому задачу про багатополісний найкоротший ланцюг [59, 123]. Суть такої задачі полягає в пошуку найкоротших ланцюгів між усіма парами вузлів (вершин) на заданій мережі, а також їхніх довжин. Алгоритм розв'язання задачі про багатополісний найкоротший ланцюг спочатку був розроблений Флойдом. У [123] наведений удосконалений варіант такого алгоритму, що належить Ху. В основу зазначеного алгоритму покладений метод, який полягає в наступному. Спочатку як оцінка довжини найкоротшого ланцюга з вузла I в вузол K вибирається довжина дуги з I в K . На ітерації з номером J робиться порівняння довжини ланцюга з I в K , що містить проміжні вузли з множини $\{1, 2, \dots, J\}$, із довжиною ланцюга, що проходить через вузол J та містить проміжні вузли з множини $\{1, 2, \dots, J-1\}$. Якщо використання вузла J дозволяє одержати більш

короткий ланцюг, то довжина останнього приймається за нову оцінку довжини найкоротшого ланцюга.

Моделюючий граф G до задачі визначення ефективності керуючих дій в ІМ N приведений у [79 - 81].

Реалізація задачі про багатополісний найкоротший ланцюг здійснюється за допомогою ППП мережної оптимізації [52, 123]. Зокрема, програма розв'язання цієї задачі включає основну програму такого пакету, а також підпрограми MULTSH, PRNTRX, PRNTRY. Підпрограма MULTSH реалізує введення вхідних даних та обчислення відповідно до алгоритму розв'язання зазначеної задачі. За допомогою підпрограми PRNTRX здійснюється друк як вихідної матриці довжин найкоротших шляхів, так і матриці довжин найкоротших шляхів, що відповідають оптимальному рішенню розглядуваної задачі. Підпрограма PRNTRY призначена для видачі на друк матриці найкоротших маршрутів, що містить проміжні вузли найкоротших шляхів, які відповідають оптимальному рішенню розглядуваної задачі.

Зазначена програма дозволяє обробляти ІМ, що містять до 50 вузлів та 50 дуг. Для опрацювання ІМ більшої розмірності необхідно змінити границі масивів в операторах розмірності, що містяться в основній програмі та в підпрограмі MULTSH.

Відповідно до [59, 123] для реалізації програми розв'язання розглядуваної задачі необхідні наступні вхідні дані.

Набір 1. Складається з одного запису з ім'ям алгоритму MTSC у форматі (A4).

Набір 2. Містить один запис із числом вузлів та числом дуг в ІМ у форматі (2I10).

Набір 3. Загальне число записів у даному наборі дорівнює числу дуг у ІМ. При цьому кожний запис містить наступні дані у форматі (4X, I6, I10, F10.2):

- 1) номер початкового вузла дуги;
- 2) номер кінцевого вузла дуги;
- 3) довжину дуги.

Набір 4. Складається з одного запису, що містить слово PEND у форматі (A4), яке вказує на кінець задачі.

Набір 5. Складається з одного запису, що містить слово EXIT у форматі (A4), яке вказує на кінець вхідних даних.

Запропонований у даному підрозділі комбінаторно-графовий підхід до визначення ефективності керуючих дій у ІМ на підставі використання ППП мережній оптимізації апробований для об'єктів управління розглядуваного класу [79 - 81].

1.3. Методика оцінювання надійності та керовності інженерних мереж

Актуальність питань надійності та керовності реальних ІМ розглядуваного класу обумовлена ускладненням їхньої топологічної структури, а також підвищенням вимог до якості забезпечення ЦП підключених до них окремих СЦП.

Наслідуючи [30 - 35, 57], будемо вважати, що ІМ N задовольняє припустимим умовам функціонування, якщо в кожному її вузлі, що відповідає визначеній вершині $y \in V^r$ моделюючого графа G , величина напору (рівня) ЦП Z_y знаходиться в заданих для розглядуваної вершини y межах:

$$Z_y \in [Z_y^*, Z_y^{**}]; \quad (1.1)$$

де Z_y^* і Z_y^{**} - відповідно нижня та верхня межа величини Z_y . Відповідно до [30 - 25, 57] умова (1.1) формалізує ціль управління розглядуваної ІМ N .

Кожній дузі $j \in E$ моделюючого графа G поставимо у відповідність величину l_j , яка формалізує гідравлічний опір відповідної ділянки ІМ N . Нехай вершини $x, y \in V$ моделюючого графа G зв'язані деяким шляхом P_{xy} . Тоді довжина розглядуваного шляху P_{xy} , що виражає опір відповідної ділянки ІМ N , може бути виражена наступним співвідношенням:

$$L_{xy} = \sum_{j \in P_{xy}} l_j; \quad (1.2)$$

де L_{xy} - довжина шляху P_{xy} ; l_j - величина опору ділянки ІМ N , що відповідає дузі j , яка входить у розглядуваний шлях P_{xy} . У загальному випадку розглядувані вершини $x, y \in V$ моделюючого графа G можуть бути зв'язані декількома шляхами P_{xy} , що

обумовлено наявністю декількох ділянок у ІМ N , які з'єднують відповідні вузли. Тоді найкоротшим із них назвемо такий шлях P_{xy} , що має найменшу довжину L_{xy} , визначену співвідношенням (1.2).

Виходячи з функціонального призначення ІМ N , під її надійністю будемо припускати можливість постачання ЦП до вершин $y \in V^r$ з боку АЕ S_x , де $x \in V^a$, у випадку, якщо деякі зі шляхів P_{xy} перестануть існувати (будуть виведені з ладу відповідні ділянки ІМ N внаслідок аварії, профілактики, ремонту).

Відповідно до цільової настанови та критерію управління ІМ N під керовністю об'єктом розглядуваного класу будемо розуміти можливість ефективно впливати на величини Z_y з боку АЕ S_x , де $x \in V^a, y \in V^r$, для реалізації співвідношення (1.1).

На відміну від [30 - 33, 57], у даному підрозділі пропонується інший підхід до оцінювання надійності та керовності ІМ, безпосередньо не зв'язаний із необхідністю розрахунку поточкорозподілів. Будучи комбінаторно-графовим, запропонований підхід враховує істотні структурні і функціональні властивості та особливості об'єктів управління розглядуваного класу. Цим він дозволяє істотно зменшити ємність ОП та скоротити кількість процесорного часу керуючої ЕОМ, необхідні для формування оцінок надійності та керовності ІМ.

Для формулювання евристики, що виражає сутність запропонованого підходу, розглянемо дві такі вершини x та y моделюючого графа G , для яких відповідно до наведеної вище формалізації ІМ N як об'єкта оперативного управління, справедливе таке твердження: вершині $x \in V^a$ біективно відповідає визначений АЕ S_x , а вершині $y \in V^r$ - визначена величина керованого напору (рівня) ЦП Z_y у відповідному вузлі ІМ N . Тоді стосовно розглядуваних АЕ S_x та керованої величини напору Z_y ІМ N характеризується надійністю K_{xy} та керовністю M_{xy} , якщо існує K_{xy} таких найкоротших шляхів P_{xy} , що їхні довжини L_{xy} задовольняють

умові $L_{xy} \leq M_{xy}$. Величина K_{xy} , що виражає в розглядуваній евристиці кількість визначених шляхів, може приймати значення в області натуральних чисел. Величини L_{xy} і M_{xy} , що виражають опори відповідних шляхів P_{xy} та їх максимально припустимі розглядуваною евристикою межі, ϵ , як це впливає зі співвідношення (1.2), невід'ємними дійсними числами.

Запропонований у даному підрозділі комбінаторно-графовий підхід до оцінювання надійності та керовності ІМ практично реалізований за допомогою розв'язання задачі про K найкоротші шляхи, змістовна постановка, алгоритмічна і програмна реалізація якої приведені в [57, 123]. При цьому в основу програми, що реалізує зазначену задачу, покладений відомий алгоритм подвійного пошуку, що використовує дві узагальнені двомісні операції над векторами: мінімізації та додавання.

Моделюючий граф G до задачі оцінювання надійності та керовності ІМ N приведений у [79 - 81]. Алгоритм подвійного пошуку реалізований у вигляді програми, що локалізована як підпрограма KSHORT у ППП мережної оптимізації. Зазначена програма здатна обробляти ІМ, що містять до 50 вузлів та 50 дуг. При цьому розміри ІМ можна збільшити за допомогою зміни меж масивів в операторах розмірності, записаних у підпрограмі KSHORT та в основній програмі. Відповідно до [123] вхідні дані мають наступний вигляд.

Набір 1. Складається з одного запису з ім'ям алгоритму KSRT у форматі (A4).

Набір 2. Містить один запис із числом вузлів та числом дуг у ІМ у форматі (2I10).

Набір 3. Він складається з трьох розділів.

З кожного запису розділу 1 зчитуються наступні величини:

- 1) номер початкового вузла дуги;
- 2) номер кінцевого вузла дуги;
- 3) довжина дуги.

Для кожної дуги відповідні величини повинні бути введені у форматі (3I10). Зазначені записи розташовуються в порядку зростання кінцевих вузлів дуг.

У розділ 2 входить запис, що містить число K шуканих найкоротших шляхів, номер початкового вузла K шуканих найкоротших шляхів, а також максимальне припустиме число ітерацій в алгоритмі подвійного пошуку. Перераховані величини повинні бути введені у форматі (4X, 3I5).

У розділ 3 входить запис, що містить номер кінцевого вузла K шуканих найкоротших шляхів, а також максимальне число шляхів із заданих початкового та кінцевого вузла, яке повинно бути згенероване.

Якщо розглядувану задачу потрібно послідовно розв'язувати для різних початкових і (або) кінцевих вузлів ІМ, то вихідні дані варто змінити тільки в розділах 2 і 3.

Набір 4. Даний набір складається з одного запису, що містить слово PEND у форматі (A4), яке вказує кінець задачі.

Набір 5. Даний набір складається з одного запису, що містить слово EXIT у форматі (A4), яке вказує кінець вхідних даних.

Програма пошуку K найкоротших шляхів складається з наступних підпрограм: KSHORT (введення даних та обчислення), DSWP (друк довжин K найкоротших шляхів із початкового вузла у всі інші вузли), TRACE (друк вузлів K найкоротших шляхів із початкового вузла ІМ у заданий кінцевий вузол). Якщо за умовою задачі потрібно розглядати шляхи, що не містять циклів, то відповідно до [123] підпрограма TRACE може бути модифікована таким чином, що пошук шляху завершиться при виявленні циклу.

Апробація даного підходу показала ефективність його використання для оцінювання надійності та керовності реальних ІМ [79 - 81].

1.4. Статистичний підхід до оперативного управління інженерними мережами

На відмінність від [30 - 33], розглянемо такий підхід до управління ІМ, який заснований на використанні сучасних прикладних статистичних методів [61]. Зокрема, для цієї мети пропонується використовувати ієрархічний кластерний аналіз, а також нелінійний параболічний множинний регресивний аналіз [23, 28, 34, 86].

Концептуально статистичний підхід до управління ІМ обумовлений необхідністю створення припустимих умов функціонування окремих СЦП, підключених до розглядуваної ІМ, в умовах стохастичних змін їхніх режимів споживання. У реальних ІМ припустимі умови функціонування підключених до них СЦП можуть бути виконані, якщо в деяких вершинах величини напорів (рівнів) ЦП знаходяться у визначених інтервалах [30 - 33, 74, 77]. Такі вершини ІМ назвемо вершинами з керованими напорами (рівнями) ЦП.

Для реалізації запропонованого підходу проведемо відповідну формалізацію ІМ як об'єкта управління. При цьому будемо

використовувати модель сталого поточкорозподілу в ІМ відповідно до [79 - 81].

Будемо вважати, що в множині усіх вершин розглядуваної ІМ виділена підмножина вершин з керованими напорами (рівнями) ЦП. Множину індексів вершин із керованими напорами розглядуваної ІМ позначимо I . Кожній вершині з індексом i поставимо у відповідність величину напору (рівня) ЦП y_i , де $i \in I$. Величини y_i для $\forall i \in I$, розглядуваному підході назвемо керованими змінними. Будемо припускати, що для кожної вершини з індексом $i \in I$ величина y_i повинна знаходитися в інтервалі, визначеному відповідно нижньою межею y_i^* та верхньою межею y_i^{**} . Формально дане твердження має наступний вигляд:

$$\forall i \in I, \quad y_i \in [y_i^*, y_i^{**}]. \quad (1.3)$$

Припустимо, що величини y_i^* та y_i^{**} є відомими для $\forall i \in I$. Зокрема, вони можуть бути визначені, виходячи з функціонального призначення ІМ [30 - 33].

Припустимо, що для створення необхідних напорів (рівнів) ЦП розглядувана ІМ містить визначену множину АЕ. Множину індексів таких АЕ позначимо J . Вважатимемо, що кожний АЕ з індексом j характеризується відповідним параметром x_j , який визначає режим функціонування розглядуваного АЕ, при цьому $j \in J$. Змістовним параметром x_j може бути, наприклад, кутова частота, споживана потужність, напруга, струм, а також рівень води у водонапірній вежі. Параметри x_j для $\forall j \in J$ назвемо керуючими параметрами розглядуваної ІМ. Будемо припускати, що для кожного АЕ з індексом $j \in J$ величина параметра знаходиться в інтервалі, визначеному відповідно нижньою x_j^* та верхньою x_j^{**} межами. Формально дане твердження має наступний вигляд:

$$\forall j \in J, \quad x_j \in [x_j^*, x_j^{**}]. \quad (1.4)$$

Припустимо, що величини x_j^* та x_j^{**} відомі для $\forall j \in J$. Такі величини визначаються техніко-експлуатаційними характеристиками використовуваних АЕ [30 - 33, 79, 80].

Збурювальні дії на ІМ як об'єкт управління з боку підключених до неї СЦП будемо характеризувати вектором потоків, координатами якого є потоки в дугах розглядуваної ІМ. Для реальних ІМ $q \in Q$, де Q – область значень вектора потоків q . Будемо припускати, що в області Q виділена множина класів – підобластей Q_k ; при цьому $k \in K$, де K – множина індексів таких класів. Будемо вважати, що для визначеного індексу $k \in K$ $\forall q \in Q_k$ є близькими в аспекті надання збурювальних дій на керовані змінні розглядуваної ІМ. Також будемо вважати, що для кожного значення вектора $q \in Q$ однозначно визначається індекс класу $k \in K$, виходячи з виконання наступного співвідношення:

$$q \in Q_k, \quad Q_k \subset Q \Rightarrow k \in K. \quad (1.5)$$

Концептуальною та методологічною основою даних припущень можуть послужити відомі процедури кластерного аналізу, до яких, зокрема, відносяться швидкодіючі алгоритми ієрархічної класифікації, а також алгоритми формування розбивок та перерізів кластерів [34, 86, 119].

Будемо вважати, що для розглядуваної ІМ реалізована процедура формування множини підобластей Q_k в області Q , де $k \in K$. Процедури пошуку індексу класу в співвідношенні (1.5) передбачаються відомими та готовими до програмної реалізації.

Подальша формалізація ІМ як об'єкта управління, що припускає використання статистичного підходу, виконана в припущенні, що в ІМ має місце певне значення вектора q , для якого з умови (1.5) визначений відповідний індекс класу $k \in K$.

Аналіз моделей поточкорозподілів у реальних ІМ [30 - 33, 61, 72] дозволяє зробити припущення про те, що при визначеному $k \in K$ кожна керована змінна y_i^k зв'язана з керуючими параметрами наступним співвідношенням:

$$y_i^k = \sum_{j \in J} (a_{ij}^k x_j^2 + b_{ij}^k x_j) + c_i^k. \quad (1.6)$$

У співвідношенні (1.6) коефіцієнти a_{ij}^k , b_{ij}^k та c_i^k характеризують взаємозв'язок між визначеною керованою змінною y_i^k та всіма керуючими параметрами x_j при визначеному $k \in K$.

Будемо припускати, що концептуально співвідношення (1.6) при визначеному $k \in K$ є рівнянням множинної параболічної регресії [23, 24], у якому керуючі параметри x_j є чинниками, а керована змінна y_i^k – залежною змінною. При визначеному $k \in K$ для $\forall k \in K$ співвідношення (1.6) утворюють систему квадратних рівнянь. На підставі аналізу, який міститься в [23, 30 - 34], будемо припускати, що для $\forall k \in K$, $\forall i \in I$ коефіцієнти a_{ij}^k , b_{ij}^k та c_i^k в рівняннях (1.6) є відомими.

Аналіз реальних ІМ [30 - 33, 61, 74] показує, що для визначеного $k \in K$, який характеризує величини потоків у дугах розглядуваної ІМ, загальні енерговитрати Z^k всіх АЕ визначаються наступним співвідношенням:

$$Z^k = \sum_{j \in J} (f_j^k x_j^3 + g_j^k x_j^2 + p_j^k x_j) + t^k. \quad (1.7)$$

У співвідношенні (1.7) коефіцієнти f_j^k , g_j^k , p_j^k та t^k характеризують взаємозв'язок між усіма керуючими параметрами x_j , які визначають режими функціонування відповідних АЕ, та загальними енерговитратами Z^k при визначеному $k \in K$.

Аналогічно (1.6), співвідношення (1.7) при визначеному $k \in K$ є рівнянням множинної параболічної регресії [23, 61, 74], у якому чинниками є керуючі параметри x_j , а залежною змінною – величина загальних енерговитрат Z^k . Припустимо, що для $\forall k \in K$ коефіцієнти f_j^k , g_j^k , p_j^k та t^k в рівняннях (1.7) відомі.

На підставі проведеної формалізації поставимо наступну задачу управління ІМ.

При визначеному $k \in K$ необхідно знайти такі значення керуючих параметрів x_j , що задовольняють системі рівнянь (1.6), обмеженням (1.3), (1.4) та мінімізують цільову функцію, виражену рівняннями (1.7). Вигляд зазначених співвідношень дозволяє зробити висновок, що при визначеному $k \in K$ поставлена задача є задачею сепарабельного програмування. Як метод розв'язання такої задачі був використаний метод штрафів та бар'єрів [17, 122].

Значення керуючих параметрів x_j , що входять в оптимальний план при визначеному $k \in K$, позначимо $x_{j \min}^k$, де $j \in J$.

На підставі запропонованої формалізації був розроблений наступний керуючий алгоритм.

1. На об'єкті оперативного управління - ІМ - виконується вимір поточних значень керованих змінних y_i для $\forall i \in I$.

2. На підставі вимірних значень y_i здійснюється перевірка виконання обмежень (1.3) для $\forall i \in I$. Якщо усі вони виконуються, то здійснюється перехід до пункту 1. Інакше виконується пункт 3.

3. Визначається поточне значення вектора q шляхом виміру значень його координат.

4. На підставі поточного значення вектора q з співвідношення (1.5) визначається відповідний індекс класу k .

5. На підставі визначеного значення індексу k для $\forall i \in I$, $\forall j \in J$ вибираються відповідні значення коефіцієнтів a_{ij}^k , b_{ij}^k та c_i^k в рівняннях (1.6).

6. На підставі визначеного значення індексу k для $\forall j \in J$ вибираються відповідні значення коефіцієнтів f_j^k , g_j^k , p_j^k та t^k в рівняннях (1.7).

7. На підставі відомих обмежень (1.3), (1.4), (1.6) та цільової функції (1.7) реалізується процедура пошуку розв'язку відповідної

задачі сепарабельного програмування. У результаті для $\forall j \in J$ визначаються оптимальні значення керуючих параметрів $x_{j \min}^k$.

8. Знайдені оптимальні значення керуючих параметрів $x_{j \min}^k$ для $\forall j \in J$ реалізуються шляхом установки відповідних режимів функціонування АЕ в розглядуваній ІМ.

9. Виконується передача управління до пункту 1.

Розроблений алгоритм, що реалізує запропонований у даному підрозділі статистичний підхід до управління ІМ, апробований для об'єктів управління розглядуваного класу. Зокрема, він був використаний для реалізації процесу оперативного управління мережною системою сільськогосподарського водопостачання.

1.5. Висновки

1. На підставі запропонованої концептуалізації проведена формалізація і визначені прикладні аспекти комбінаторно-графового підходу до управління ІМ із неповною інформацією про об'єкти управління розглядуваного класу та середовище їхнього функціонування.

2. Використовуючи комбінаторно-графовий підхід до управління ІМ, формалізовані задачі, зв'язані з визначенням ефективності керуючих дій в ІМ, а також оцінювання надійності та керовності ІМ. Для їхнього розв'язання використані такі відомі задачі мережної оптимізації, як задача про багатополосний найкоротший ланцюг, а також задача про K найкоротші шляхи, реалізовані за допомогою ППП мережної оптимізації.

3. Для формалізації реальних ІМ як об'єктів управління з урахуванням специфіки їхньої топологічної структури та процесів функціонування використаний ієрархічний кластерний та параболічний регресивний аналіз. Такий підхід дозволяє формалізувати задачу управління ІМ як задачу сепарабельного програмування, реалізовану методом штрафів та бар'єрів. На підставі зазначеного підходу розроблений ефективний керуючий алгоритм для реальних об'єктів управління розглядуваного класу.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖНИХ СИСТЕМ ЯК ІЄРАРХІЧНО ОРГАНІЗОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

2.1. Концептуальна модель ієрархічної організації інженерних мережних систем

У даному підрозділі розглянемо зміну наступних найважливіших характерних властивостей та особливостей ЛМ в залежності від їхнього рівня ієрархії в ІМС.

1. Функціональне призначення.
2. Геометричні розміри.
3. Конструктивно-технологічні особливості реалізації.
4. Топологічна структура моделюючих графів.
5. Енергетична характеристика потокорозподілів.
6. Режими споживання ЦП.
7. Ступінь стохастичності потокорозподілів.
8. Елементний склад дуг.
9. Можливість практичної реалізації різних видів ідентифікації.

На підставі робіт [30 - 33, 95, 118, 136], що містять матеріали та результати за різними аспектами дослідження ІМС як об'єктів управління, розглянемо найважливіші властивості та особливості, характерні для окремих ЛМ різного рівня ієрархії.

Конструктивно ММ складаються із великих трубопроводів великого перетину, здатних витримати великі напори та пропускати значні потоки ЦП. ММ мають велику довжину. Моделюючі графи ММ є або деревами, або мають відносно невелику кількість циклів, тому цикломатичні числа таких графів рівні або ненабагато перевищують нульове значення.

Конструктивно РМ складаються з трубопроводів меншого діаметру, розрахованих на передачу менших потоків ЦП з напорами, меншими щодо відповідних величин в ММ. Реальні РМ характеризуються меншою в порівнянні з ММ довжиною. Моделюючі графи РМ містять більшу в порівнянні з моделюючими графами ММ

кількість циклів, тому відповідні цикломатичні числа набувають більших значень, ніж для моделюючих графів ММ.

Конструктивно МСЦП являють собою дуже розгалужені та зашліфовані мережі дрібних трубопроводів низького тиску, що мають невелику довжину. Цикломатичні числа, що відповідають моделюючим графам реальних МСЦП, набувають більших значень, ніж для моделюючих графів РМ.

Режими споживання ЦП із вищих ЛМ нижчими ЛМ або СЦП визначаються величинами потоків ЦП, а також значеннями напорів за яких споживаються ці потоки. Для реальних СЦП має місце стохастичний характер режимів споживання, обумовлений цілим рядом випадкових чинників, до яких, зокрема, можна віднести погодні умови, біологічні потреби організмів, а також суб'єктивне міркування [30 - 33, 35, 118, 136]. Відповідно до математичної моделі потокорозподіл в розглядуваній ЛМ визначається режимами споживання ЦП підключених до неї нижчих ЛМ або СЦП. Тому стохастичність режимів споживання СЦП породжує стохастичність потокорозподілів в окремих ЛМ різного рівня ієрархії. Однак у силі тієї ж стохастичності режимів споживання СЦП або нижчими ЛМ різні випадкові зміни (збурення) таких режимів взаємно компенсуються, вирівнюються, згладжуються при їхньому впливі на вищі ЛМ. Тому потокорозподіли у вищих ЛМ та режими споживання ними ЦП є більш детермінованими, ніж в нижчих ЛМ.

Особливість елементного складу дуг реальних ММ – наявність в них потужних АЕ та відсутність або мінімальна кількість ПЕ. Доцільність розміщення великих АЕ в дугах ММ обумовлена наявністю в них потокорозподілів з високими енергетичними параметрами (потоками та напорами), що мають високий ступінь детермінованості, що дозволяє застосувати більш потужні, а отже більш економічні конструкції та типорозміри АЕ, створивши при цьому для них більш сприятливі умови функціонування. Розміщення ж ПЕ в дугах ММ є менш доцільним, оскільки в умовах потужних потокорозподілів це приводить до істотних енергетичних витрат [30 - 33, 96, 118].

В дугах реальних РМ можуть міститися як АЕ, так і ПЕ. Однак відносна кількість АЕ тут менша, ніж у дугах ММ, а потужність їх нижча. Це пояснюється тим, що енергетичні параметри потокорозподілів в РМ нижчі, ніж у ММ, а ступінь їх стохастичності – вищий. У таких умовах важко створити припустимі умови для функціонування реальних АЕ, особливо для тих, які мають велику потужність. Наявність же тут ПЕ припустима в більшій мірі, ніж в ММ

оскільки відповідні енергетичні параметри потокорозподілів тут нижчі, а отже нижчі й енергетичні втрати в ПЕ [30 - 33, 96, 118].

У дугах реальних МСЦП внаслідок високої стохастичності та низьких енергетичних параметрів потокорозподілів містяться лише ПЕ [30 - 33, 96, 105, 118].

Таким чином, ієрархічність структури реальних ІМС обумовлена необхідністю узгодження невеликого числа в основному детермінованих процесів споживання ЦП із зовнішнього середовища, які мають високі енергетичні параметри, з дуже великим числом стохастичних процесів його споживання СЦП, що характеризуються низькими енергетичними параметрами.

Для реалізації процесів управління ІМС велике значення має можливість їх структурної та параметричної ідентифікації, а також ідентифікації стану таких об'єктів [30 - 33]. На підставі розглянутих властивостей ММ, РМ та МСЦП визначимо можливість практичної реалізації різних видів ідентифікації цих ЛМ.

Зокрема, ММ характеризуються відносно невеликим числом постійних змінних та параметрів, взаємозалежних між собою у відносно меншому ступені, ніж аналогічні величини в РМ і МСЦП, та в достатньому ступені доступних для виміру. Тому можна зробити висновок, що для ММ зазначені види ідентифікації є практично реалізованими [30 - 33, 96, 105, 118].

РМ характеризуються значно більшим числом змінних та параметрів, стохастичність котрих істотно вища, ніж для аналогічних величин в ММ. Крім цього, зазначені величини в РМ взаємозалежні між собою в більшому ступені, ніж у ММ, та в меншому ступені доступні для виміру. Тому можна зробити висновок, що в РМ практична реалізація розглянутих видів ідентифікації зустрічає певні труднощі [96, 105, 118]. У зв'язку з цим будемо припускати, що в РМ можуть бути ідентифіковані лише істотні структурні взаємозв'язки, а також найважливіші змінні та параметри.

МСЦП характеризуються дуже великим числом змінних та параметрів, ступінь стохастичності яких занадто високий. В силу структурно-топологічних особливостей моделюючих графів та конструктивно-технологічних особливостей реалізації МСЦП, ці величини дуже взаємозалежні між собою та важкодоступні для виміру. Тому можна зробити висновок, що зазначені види ідентифікації в МСЦП реалізувати практично неможливо [96, 105, 118].

Як приклад, що конкретизує основні положення даного підрозділу, виходячи з [105, 118], розглянемо мережну систему

сільськогосподарського водопостачання, що складається з ММ, до якої підключені РМ.

ММ, що входить у розглядувану систему, характеризується наступними основними властивостями та параметрами. Її довжина знаходиться в межах від декількох сотень метрів – до декількох кілометрів. За своєю конфігурацією ММ довжиною до 200 м є ступиковими, а ММ більшої довжини мають декілька циклів. Ділянками ММ є сталеві, чавунні або асбестоцементні труби діаметром від 100 мм до 500 мм. Як АЕ в розглядуваній ММ використовуються відцентрові насоси типу К та КМ із подачею від $0,45 \text{ м}^3/\text{год}$ до $360 \text{ м}^3/\text{год}$ та напорами від 8,8 м до 98 м, а також багатоступінчасті секційні насоси типу ММ із подачею від $22 \text{ м}^3/\text{год}$ до $400 \text{ м}^3/\text{год}$ та напорами від 30 м до 1230 м. Розглядувана ММ як ПЕ містить декілька засувок, що знаходяться на ділянках, інцидентних АЕ. Добова нерівномірність процесу водоспоживання з ММ, що має певну тенденцію, подана відповідним погодинним графіком у [79 - 81]. Він має два максимуми, що досягають $10 \text{ м}^3/\text{год}$, а також мінімум, який відповідає $1 \text{ м}^3/\text{год}$. Ідентифікація розглядуваної ММ як об'єкта управління здійснюється за допомогою вимірювальних перетворювачів тисків та потоків. Як перетворювачі тисків використовуються перетворювачі «Сапфір», що мають похибку виміру 1,5% та час установлення сигналу від 0,5 с до 2,5 с. Вимір потоків у розглядуваній ММ реалізується за допомогою електромагнітного перетворювача потоків ІР-51, похибка виміру якого становить 1%, а типовий час установлення вихідного сигналу - від 0,6 с до 2,3 с.

Кожна з РМ, підключених до розглядуваної ММ, характеризується наступними основними властивостями та параметрами. Довжина розглядуваної РМ знаходиться в межах від декількох десятків до декількох сотень метрів. Ділянками РМ є сталеві труби діаметром від 50 мм до 100 мм. Розглядувана РМ не містить АЕ, у якості ПЕ використовуються вентилі, що знаходяться на ділянках, інцидентних як ММ, так і СЦП. При цьому швидкості руху води на ділянках РМ дорівнюють від 0,7 м/с до 1,4 м/с, а напори можуть досягати 60 м. Через складність процесів водоспоживання з РМ, обумовлену, зокрема, суб'єктивними чинниками, зв'язаними з СЦП, їхнє статистичне моделювання у вигляді відповідних графіків не робиться. Також не робиться ідентифікація розглядуваних РМ як об'єктів управління.

Зазначені найважливіші характерні властивості та особливості окремих ЛМ різного рівня ієрархії можуть бути використані для

постановки відповідних ЛЗ та вибору адекватних ЛА їхньої реалізації. Зокрема, отримані результати використані при синтезі керуючих алгоритмів для ММ зрошувальних систем.

2.2. Оптимізація трасування магістральних каналів оперативно керованих зрошувальних систем

Зрошувальні системи як підклас ІМС мають ієрархічну організацію. Їхня вертикальна декомпозиція обумовлена багаторівневою структурою [62, 136]. На вищому рівні ієрархії знаходиться головний водозабір з магістральним каналом (МК) зрошувальної системи, нижчі рівні представлені з'єднаними між собою РМ різного призначення.

У даному підрозділі розглянемо постановку та реалізацію на ЕОМ задачі оптимізації трасування МК оперативно керованих зрошувальних систем.

Нехай необхідно від заданого пункту споживання ЦП (води) із зовнішнього середовища побудувати МК зрошувальної системи в одну з декількох можливих вершин РМ, що знаходиться на наступному, більш низькому рівні ієрархії. Для забезпечення подачі ЦП буде потрібна певна кількість насосних станцій, які є АЕ оперативно керованої зрошувальної системи. Кожний АЕ може знаходитися на одній з доступних для спорудження ділянок місцевості. Обмеження в даному випадку можуть бути обумовлені складними фізико-географічними умовами місцевості, наявністю інших споруджень, а також міркуваннями, зв'язаними з охороною навколишнього середовища.

Передбачається, що для будь-якої пари суміжних АЕ відомі витрати на спорудження інцидентної їм частини можливого варіанту МК зрошувальної системи.

Задача оптимізації трасування МК оперативно керованої зрошувальної системи, розглядувана в даному підрозділі, полягає в наступному. Необхідно при заданих положеннях пунктів споживання ЦП із зовнішнього середовища визначити таке припустиме розташування АЕ, яке мінімізує загальні витрати на спорудження МК зрошувальної системи.

З метою формалізації поставленої на змістовному рівні задачі введемо наступні позначення.

Мережу можливих варіантів МК представимо моделюючим графом G , який має множину вершин V та дуг E , на котрому кожна дуга $e \in E$ відповідає упорядкованій парі вершин (i, j) , де $i, j \in V$.

Вершину, що відповідає пункту споживання ЦП із зовнішнього середовища МК зрошувальної системи, позначимо S та назвемо її головним джерелом. Вершину розподільної мережі з множини можливих вершин, до якої передбачається підключення МК, позначимо t та назвемо її головним стоком. Кожній дузі e поставимо у відповідність величину C_{ij} , що виражає вартість спорудження частини МК, котра з'єднує відповідні вузли мережі можливих варіантів. В даній формалізації задача оптимізації трасування МК оперативно керованої зрошувальної системи зводиться до задачі пошуку найкоротшого ланцюга з вершини S у вершину t на моделюючому графі G [123].

Мережа можливих варіантів трасування МК зрошувальної системи приведена в [79 - 81].

Машинні програми, що чисельно реалізують дану задачу, засновані на відомому алгоритмі Дейкстри, який враховує специфіку розглядуваної моделі [123]. Основу алгоритму становить положення про те, якщо відомий найкоротший ланцюг із вузла S у вершину j та вершина K належить до цього ланцюга, то найкоротший ланцюг із S у K є частиною вихідного ланцюга, що закінчується у вузлі K . Ініціалізація алгоритму здійснюється при $j=S$; потім величина j дискретно збільшується на одиницю, та при $j=t$ алгоритм завершує роботу. На основі зазначеного алгоритму реалізована програма DIJKA, що входить у ППП мережної оптимізації [123].

Призначення програми, що реалізує алгоритм Дейкстри, полягає в пошуку найкоротшого ланцюга з джерела в будь-який інший вузол мережі. Програма DIJKA локалізована в ППП мережної оптимізації [123]. Програма обробляє мережі, що містять до 50 вузлів та 50 дуг. Розміри мережі можна збільшити, змінивши межі масивів в операторах розмірності, записаних у підпрограмі DIJKA та в основній програмі.

Вхідні дані мають наступний вигляд.

Набір 1. Один запис з ім'ям алгоритму у форматі (A4).

Набір 2. Один запис із числом вузлів та числом дуг мережі у форматі (2I10).

Набір 3. Загальне число записів в даному наборі дорівнює числу дуг мережі. Кожний запис містить наступні величини:

1) номер початкового вузла дуги;

2) номер кінцевого вузла дуги;

3) довжину дуги.

Формат такого запису (4X,I6,I10,F10.2).

Набір 4. Складається з одного запису, що містить слово PEND у форматі (A4), яке вказує на кінець задачі.

Набір 5. Складається з одного запису, що містить слово EXIT у форматі (A4), яке вказує на кінець вхідних даних.

Програма складається з наступних підпрограм: DIJKA (введення даних та обчислення), TRACED (друк вузлів найкоротшого ланцюга та його довжини). Використовувані змінні: I - початковий вузол дуги,

J - кінцевий вузол дуги, VAL - довжина дуги, D - робочий масив

довжин дуг, $OPTPAT$ - масив оптимального розв'язку. Виведення

оптимального розв'язку у вигляді роздруковки вузлів найкоротшого

ланцюга та його довжини здійснюється програмою TRACED, що

входить у зазначений ППП. Реалізація задачі оптимізації трасування

МК оперативно керованої зрошувальної системи міститься в [79 - 81].

2.3. Оптимізація топологічної структури розподільних мереж оперативно керованих систем сільськогосподарського водопостачання

Відповідно до [29, 115], оптимізація топологічної структури оперативно керованих ЛМ повинна здійснюватися з урахуванням наступних техніко-економічних вимог.

1. Мінімізація загальних витрат на спорудження ЛМ.

2. Мінімізація загальних витрат на експлуатацію ЛМ.

Мінімізація загальних витрат на спорудження ЛМ може бути здійснена за допомогою реалізації наступних заходів [29, 115].

1. Мінімізація обсягу будівельних робіт.

2. Мінімізація витрат будівельних та конструкційних матеріалів.

Мінімізація загальних витрат на експлуатацію ЛМ може бути досягнута за допомогою реалізації наступних вимог [29, 115].

1. Мінімізація загального числа елементів (ділянок) розглядуваної ЛМ.

2. Мінімізація загальних енергетичних витрат при транспортуванні ЦП по ділянках та його перерозподілу у вузлах розглядуваної ЛМ.

У даному підрозділі розглянемо можливий підхід до оптимізації топологічної структури оперативно керованих ЛМ, який враховує вказані вимоги. У даному контексті розглядуваний підхід є логічним продовженням та розвитком підходу до оптимізації трасування МК

оперативно керованих зрошувальних систем, що міститься в підрозділі 2.2 даної роботи.

Аналіз існуючих та проєктованих ЛМ дозволяє зробити висновок, що для об'єктів розглядуваного класу найчастіше відомим є розташування вузлів (вершин), у яких з'єднуються їхні ділянки (дуги) [29, 115]. З метою реалізації свого функціонального призначення та задоволення перелічених вимог, проєктована ЛМ повинна мати наступні властивості.

1. Бути зв'язною.
2. Містити всі задані вузли (вершини).
3. Містити мінімальне число ділянок (дуг).
4. Мінімізувати суму узагальнених вартісних оцінок (узагальнених довжин) цих дуг.

На підставі теоретико-графового аналізу, проведеного відповідно до [123], можна зробити висновок, що ЛМ, які мають зазначені властивості, можуть бути формалізовані як найкоротші остовні дерева. Тому для оптимізації топологічної структури оперативно керованих ЛМ пропонується використовувати відому задачу про найкоротше остовне дерево. Постановка зазначеної задачі відповідно до [123] припускає наступну формалізацію. Виділимо у ІМС визначену ЛМ M , яку формалізуємо остовним деревом T , що має n вершин, котрі належать множині S . Вершини остовного дерева T відповідають вузлам ЛМ M . Остовним деревом T називається зв'язний граф, який складається з $n-1$ дуг та n вершин. Дуги дерева T відповідають ділянкам ЛМ M . З будь-якої власної підмножини множини S може бути утворене дерево, яке, однак, може не бути остовним деревом даної ЛМ M . Припустимо, що кожній дузі (i, j) , що з'єднує вершини i та j ЛМ M , відповідає величина C_{ij} , яка виражає узагальнену вартісну оцінку (узагальнену довжину) розглядуваної дуги (i, j) , породжувану загальними витратами на спорудження та експлуатацію відповідної ділянки ЛМ M , де $i, j \in S$. Найкоротшим остовним деревом назовемо такий остов ЛМ M , що має мінімальну суму узагальнених вартісних оцінок C_{ij} усіх його дуг (i, j) , де $i, j \in S$.

Мережа можливих варіантів топологічної структури РМ зрошувальної системи приведена в [79 - 81].

Відповідно до [123], задача про найкоротше остовне дерево є задачею дослідження операцій, яка може бути вирішена за допомогою алгоритму, «що поглинає». Цей процес починається вибором довільної вершини ЛМ M та найкоротшої дуги з множини дуг, що з'єднують обрану вершину з іншими вершинами. Після з'єднання двох вершин обраною дугою визначається найближча вершина до цих двох. Потім ця вершина та відповідна їй дуга додаються до шуканого остовного дерева. Даний процес продовжується доти, поки усі вершини не будуть з'єднані між собою. Алгоритм, заснований на «поглинанні» найкоротших дуг, відповідно до [123], може бути формалізований таким способом.

1. Використовуючи вершини дерева T , визначаються наступні дві множини: S – множина з'єднаних вершин, \bar{S} – множина нез'єднаних вершин. Спочатку усі вершини будуть належати множині S .
2. Вибирається довільна вершина з \bar{S} та з'єднується з найближчою сусідньою вершиною. Після виконання даного пункту множина S буде містити дві вершини.
3. Серед усіх дуг, що з'єднують вершини множини S з вершинами множини \bar{S} , вибирається найкоротша дуга. Кінцева вершина цієї дуги, що належить множині \bar{S} , позначається δ . Вершина δ вилучається з множини \bar{S} та переміщується у множину S .
4. Пункт 3 виконується доти, поки усі вершини не будуть належати множині S .

Програма побудови найкоротшого остовного дерева для заданої мережі міститься в [123]. Вона локалізована в якості підпрограми в ППП мережної оптимізації. Відповідно до накладених обмежень, зазначена програма дозволяє обробляти ЛМ, які містять до 50 вузлів та 50 дуг. У разі потреби розмірність можна збільшити, змінивши межі в операторах DIMENSION підпрограми MINSPA та основної програми.

Підготовка вхідної інформації для розв'язання розглядуваної задачі з використанням зазначеного ППП мережної оптимізації полягає у наступному.

У набір 1 входить один запис з ім'ям алгоритму MSTR у форматі (A4).

Набір 2 поданий одним записом із числом вершин та числом дуг ЛМ M у форматі (2110).

У наборі 3 загальне число записів дорівнює числу дуг ЛМ M . При цьому кожний запис містить наступні величини: номер початкового вузла дуги, номер кінцевого вузла дуги, узагальнену вартісну оцінку (узагальнену довжину) дуги. Перелічені дані мають формат (4X, I6, I10, F10.2).

Набір 4 складається з одного запису, що містить слово PEND у форматі (A4), яке вказує кінець задачі.

Набір 5 складається з одного запису, що містить слово EXIT у форматі (A4), яке вказує кінець вхідних даних.

Реалізація задачі оптимізації топологічної структури оперативних керуваних ЛМ за критерієм суми узагальнених вартісних оцінок їхніх дуг міститься в [79 - 81].

2.4. Висновки

1. На підставі відповідної концептуалізації встановлено ієрархічна організація реальних ІМС за функціональним принципом. Проаналізовано зміну найважливіших властивостей та особливостей, характерних для окремих ЛМ, у залежності від їхнього рівня ієрархії в ІМС. Визначено прикладні аспекти запропонованого аналізу.

2. Для оптимізації трасування МК оперативних керуваних зрощувальних систем використана задача пошуку найкоротшого ланцюга на моделюючому графі можливих варіантів трасування МК. Машинні програми, які входять у ППП мережної оптимізації, котрі використані для чисельної реалізації поставленої задачі, засновані на відомому алгоритмі Дейкстри, що враховує специфіку даної задачі.

3. Для оптимізації топологічної структури оперативних керуваних ЛМ, які входять до складу ієрархічно організованих ІМС, з урахуванням реалізації запропонованих до них конструктивних та експлуатаційних вимог, використана відома задача про найкоротше остовне дерево. Тому для оптимізації топологічної структури оперативних керуваних ЛМ використаний ППП мережної оптимізації, який ефективно реалізує зазначену задачу на ЕОМ за допомогою алгоритму, «що поглинає».

КООРДИНОВАНІСТЬ В ІЄРАРХІЧНО ОРГАНІЗОВАНИХ ОПЕРАТИВНО КЕРОВАНИХ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖНИХ СИСТЕМАХ

3.1. Ієрархічна декомпозиція топологічної структури інженерних мережних систем

Для формалізації ієрархічної декомпозиції топологічної структури ІМС введемо необхідні позначення та поняття. При цьому будемо використовувати теоретико-графову термінологію відповідно до [13, 94, 129].

Будемо вважати, що ІМС N декомпозована за функціональним принципом на окремі ЛМ різного рівня ієрархії, і при цьому усі ЛМ визначеного рівня ієрархії є занумерованими.

Тоді j -у ЛМ i -го рівня ієрархії, яка безпосередньо нижча для k -ої ЛМ $(i+1)$ -го рівня ієрархії, позначимо N_{jk}^i . Будемо припускати, що безпосередньо вищою для розглядуваної ЛМ N_{jk}^i є ЛМ N_{kl}^{i+1} , а однією з безпосередньо нижчих – ЛМ N_{mj}^{i-1} .

Топологічну структуру ІМС N формалізуємо моделюючим графом G , множина вершин котрого V відповідає множині вузлів ІМС N , а множина дуг E – множині ділянок ІМС N . Аналогічно, топологічну структуру ЛМ N_{jk}^i формалізуємо відповідним моделюючим графом G_{jk}^i , який є подграфом моделюючого графа G ІМС N . При цьому передбачається, що множина вершин V_{jk}^i моделюючого графа G_{jk}^i відповідає множині вузлів ЛМ N_{jk}^i , а множина його дуг E_{jk}^i – множині ділянок розглядуваної ЛМ.

Множині вузлів ЛМ N_{jk}^i , у яких здійснюється споживання ЦП із зовнішнього середовища або безпосередньо з вищої ЛМ, поставимо у відповідність множину джерел (вхідних вершин) S_{jk}^i моделюючого графа G_{jk}^i розглядуваної ЛМ.

Множині вузлів ЛМ N_{jk}^i , у яких здійснюється споживання ЦП безпосередньо нижчими ЛМ або СЦП, підключеними до розглядуваної ЛМ, поставимо у відповідність множину стоків (вихідних вершин) T_{jk}^i моделюючого графа G_{jk}^i розглядуваної ЛМ.

Множині вузлів ЛМ N_{jk}^i , у яких здійснюється перерозподіл ЦП між ділянками розглядуваної ЛМ або СЦП, поставимо у відповідність множину проміжних (внутрішніх) вершин M_{jk}^i моделюючого графа G_{jk}^i розглядуваної ЛМ.

На підставі аналізу топологічної структури реальних ІМС, який міститься в [62, 74, 136], сформулюємо постулати, котрі визначають топологічну структуру окремих ЛМ різного рівня ієрархії, що входять до складу ІМС. При цьому для визначеності будемо розглядати ЛМ N_{jk}^i .

1. Множини джерел S_{jk}^i , стоків T_{jk}^i , а також проміжних вершин M_{jk}^i моделюючого графа G_{jk}^i ЛМ N_{jk}^i не є порожніми. Указаний постулат може бути формалізований наступними співвідношеннями:

$$T_{jk}^i \neq \emptyset; S_{jk}^i \neq \emptyset; M_{jk}^i \neq \emptyset. \quad (3.1)$$

2. Множини джерел S_{jk}^i , стоків T_{jk}^i , а також проміжних вершин M_{jk}^i моделюючого графа G_{jk}^i ЛМ N_{jk}^i не містять загальних вершин, і тому ці множини не мають спільних елементів. Даний постулат може бути формалізований наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} S_{jk}^i \cap T_{jk}^i &= \emptyset; S_{jk}^i \cap M_{jk}^i = \emptyset; \\ T_{jk}^i \cap M_{jk}^i &= \emptyset. \end{aligned} \quad (3.2)$$

3. Множина вершин V_{jk}^i моделюючого графа G_{jk}^i ЛМ N_{jk}^i не містить якихось інших вершин, що не належать множинам джерел S_{jk}^i , стоків T_{jk}^i , а також проміжних вершин M_{jk}^i розглядуваного моделюючого графа G_{jk}^i . Зазначений постулат може бути формалізований наступним співвідношенням:

$$S_{jk}^i \cup M_{jk}^i \cup T_{jk}^i = V_{jk}^i. \quad (3.3)$$

Виходячи зі співвідношень (3.1)-(3.3), можна зробити висновок, що система множин $\{S_{jk}^i; M_{jk}^i; T_{jk}^i\}$ утворює розбивку на множині вершин V_{jk}^i моделюючого графа G_{jk}^i ЛМ N_{jk}^i .

Враховуючи специфіку топологічної структури реальних ІМС [62, 74, 136], сформулюємо постулати, що визначають взаємозв'язки топологічних структур окремих ЛМ різного рівня ієрархії, які входять до складу ІМС.

1. Моделюючі граfi всіх ЛМ, що входять до складу ІМС, розділені між собою ребрами [129]. Для різних ЛМ N_{jk}^i та N_{qr}^p , які входять до складу ІМС N , зазначений постулат може бути формалізований наступним співвідношенням:

$$(i \neq p) \vee (j \neq q) \vee (k \neq r) = 1 \Rightarrow E_{jk}^i \cap E_{qr}^p = \emptyset. \quad (3.4)$$

2. Моделюючі граfi ЛМ одного рівня ієрархії розділені між собою вершинами [129]. Для ЛМ N_{jk}^i і N_{qr}^i , які знаходяться на i -му рівні ієрархії в ІМС N , зазначений постулат може бути формалізований наступним співвідношенням:

$$(j \neq q) \vee (k \neq r) = 1 \Rightarrow V_{jk}^i \cap V_{qr}^i = \emptyset. \quad (3.5)$$

3. Множина джерел S_{jk}^i моделюючого графа G_{jk}^i ЛМ N_{jk}^i міститься як підмножина в множині стоків T_{kl}^{i+1} моделюючого графа G_{kl}^{i+1} ЛМ N_{kl}^{i+1} , яка є безпосередньо вищою стосовно розглядуваної ЛМ N_{jk}^i у ІМС N . Даний постулат може бути формалізований наступним співвідношенням:

$$S_{jk}^i \subset T_{kl}^{i+1}. \quad (3.6)$$

4. Множина стоків T_{jk}^i моделюючого графа G_{jk}^i ЛМ N_{jk}^i включає в якості підмножин множини джерел S_{mj}^{i-1} моделюючих графів G_{mj}^{i-1} ЛМ N_{mj}^{i-1} , які є безпосередньо нижчими для розглядуваної ЛМ N_{jk}^i у ІМС N .

Зазначений постулат може бути формалізований наступним співвідношенням:

$$T_{jk}^i \subset S_{mj}^{i-1}. \quad (3.7)$$

Співвідношення (3.1) - (3.7) формалізують ієрархічну декомпозицію топологічної структури реальних ІМС.

Апробація запропонованого в даному підрозділі підходу показала ефективність його використання для організації процесів управління РМ мережної системи сільськогосподарського водопостачання.

3.2. Координованість локальних цілей функціонування та локальних задач оперативного управління в багаторівневих інженерних мережних системах

Для реалізації процесів управління ієрархічно організованими ІМС необхідно насамперед сформулювати і формалізувати цілі

функціонування та породжувані ними задачі управління для окремих ЛМ різного рівня ієрархії, які назвемо відповідно локальними цілями функціонування (ЛЦ) та локальними задачами управління (ЛЗ). Потім на підставі отриманих результатів необхідно формалізувати умови, що виражають принцип координованості ЛЦ та породжуваних ними ЛЗ для нижчих ЛМ стосовно відповідних ЛЦ та ЛЗ для безпосередньо вищих ЛМ. Відповідно до [88] виконання зазначеного принципу є необхідною умовою функціонування ієрархічно організованих систем. Перераховані питання є предметом дослідження в даному підрозділі.

Будемо припускати, що усі ЛМ визначеного рівня ієрархії є занумерованими. Тоді j -у ЛМ i -го рівня ієрархії, яка є безпосередньо нижчою для k -ої ЛМ $(i+1)$ -го рівня ієрархії, позначимо N_{jk}^i .

Слідуючи [58, 60], будемо припускати, що керівні дії в розглядуваній ЛМ здійснюються шляхом зміни станів її АЕ та ПЕ. Виходячи з цього, розглядуваній ЛМ поставимо у відповідність вектори параметрів АЕ та ПЕ, які позначимо відповідно U_{jk}^i та R_{jk}^i .

Координатами вектора U_{jk}^i , зокрема, можуть бути кутові частоти, а також споживані ними потужності, напруги, струми. Координатами вектора R_{jk}^i , зокрема, можуть бути величини лінійних або кутових переміщень відповідних ПЕ.

Також розглядуваній ЛМ N_{jk}^i поставимо у відповідність вектори її керованих та збурювальних змінних, які позначимо відповідно Z_{jk}^i та Q_{jk}^i . Координатами вектора Z_{jk}^i , зокрема, можуть бути величини керованих напорів або рівнів ЦП у визначених вершинах моделюючого графа розглядуваної ЛМ. Координатами вектора Q_{jk}^i є змінні, що характеризують збурювальні дії на керовані змінні розглядуваної ЛМ, які надаються безпосередньо вищою та нижчими ЛМ. Такими змінними, зокрема, можуть бути потоки ЦП у певних дугах моделюючого графа розглядуваної ЛМ.

Зважаючи на [58, 60], будемо припускати, що в розглядуваній ЛМ N_{jk}^i вектори U_{jk}^i , R_{jk}^i , Z_{jk}^i та Q_{jk}^i належать областям їхніх припустимих значень, які позначимо відповідно $\Omega(U_{jk}^i)$, $\Omega(R_{jk}^i)$, $\Omega(Z_{jk}^i)$ та $\Omega(Q_{jk}^i)$. Формально такі умови мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} U_{jk}^i &\in \Omega(U_{jk}^i); & R_{jk}^i &\in \Omega(R_{jk}^i); \\ Z_{jk}^i &\in \Omega(Z_{jk}^i); & Q_{jk}^i &\in \Omega(Q_{jk}^i). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Відповідно до [58, 60] будемо вважати, що співвідношення (3.8) формалізують стан технічної справності розглядуваної ЛМ, відсутність в ній аварійних ситуацій.

Виходячи з [58, 60], будемо припускати, що ЛЦ визначеної ЛМ полягає в створенні необхідних умов функціонування для всіх безпосередньо нижчих ЛМ або всіх СЦП, підключених до розглядуваної ЛМ. Така ЛЦ може бути виражена приналежністю вектора керування змінних розглядуваної ЛМ до області необхідних значень, яка є підобластю припустимих значень цього вектора. При цьому передбачається, що всі інші вектори, які відповідають розглядуваній ЛМ, знаходяться в областях їхніх припустимих значень. Область необхідних значень вектора Z_{jk}^i розглядуваної ЛМ

N_{jk}^i позначимо $\Omega^r(Z_{jk}^i)$; при цьому $\Omega^r(Z_{jk}^i) \subset \Omega(Z_{jk}^i)$.

З урахуванням введених позначень та понять критерій управління розглядуваної ЛМ N_{jk}^i , який формалізує відповідну ЛЦ, має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} N_{jk}^i : Z_{jk}^i &\in \Omega^r(Z_{jk}^i), U_{jk}^i \in \Omega(U_{jk}^i), \\ R_{jk}^i &\in \Omega(R_{jk}^i), Q_{jk}^i \in \Omega(Q_{jk}^i). \end{aligned} \quad (3.9)$$

Формалізована співвідношеннями (3.9) ЛЦ породжує наступну ЛЗ. Необхідно в розглядуваній ЛМ реалізувати такі значення векторів параметрів АЕ та ПЕ, що знаходяться у відповідних областях їхніх

припустимих значень, які при визначеному необхідному значенні вектора керування змінних безпосередньо вищої ЛМ забезпечать певне необхідне значення вектора керування змінних у розглядуваній ЛМ. При цьому передбачається, що значення вектора керування змінних розглядуваної ЛМ знаходяться в області їхніх припустимих значень.

З урахуванням виразів (3.9), які формалізують відповідний критерій управління, ЛЗ розглядуваної ЛМ N_{jk}^i може бути виражена наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} N_{kl}^{i+1}, N_{jk}^i : Z_{kl}^{i+1} &\in \Omega^r(Z_{kl}^{i+1}) \Rightarrow \\ \Rightarrow \exists U_{jk}^i \in \Omega(U_{jk}^i), \exists R_{jk}^i &\in \Omega(R_{jk}^i) \Rightarrow \\ \Rightarrow Z_{jk}^i \in \Omega^r(Z_{jk}^i), Q_{jk}^i &\in \Omega(Q_{jk}^i). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Необхідною умовою функціонування ієрархічно організованих систем є виконання принципу координованості цілей функціонування в породжуваних ними задач управління для нижчих підсистем стосовно відповідних цілей функціонування та задач управління для безпосередньо вищих підсистем [88]. Зазначений принцип формулюємо у вигляді певної умови, яка може бути реалізована в об'єктах управління розглядуваного класу через специфіку та взаємозв'язок математичних моделей потокорозподілів в окремих ЛМ різного рівня ієрархії [58, 60]. З цієї метою розглянемо таку ЛМ, яка безпосередньо вища для визначених ЛМ, котрі у свою чергу є безпосередньо нижчими для розглядуваної ЛМ. Суть умови, яка формулюється, полягає в тому, що існує така область необхідних значень вектора керування змінних розглядуваної ЛМ, із котрої кожне значення зазначеного вектора дозволяє забезпечити необхідні значення векторів керування змінних у всіх безпосередньо нижчих ЛМ шляхом реалізації в них деяких відповідних значень векторів параметрів АЕ та ПЕ. При цьому передбачається, що вектори параметрів АЕ та ПЕ, а також вектори збудувальних змінних, які відповідають усім цим ЛМ, не виходять з областей їхніх припустимих значень. Справедливість даного твердження обумовлена твердженням, що установлює взаємозв'язок між змінними (параметрами) сталих потокорозподілів у визначеній вищій ЛМ та безпосередньо нижчих ЛМ, яке сформульовано та доведено в [79 - 81].

У припущенні, що розглядуваною є ЛМ N_{kl}^{i+1} , а безпосередньо нижчими – ЛМ N_{jk}^i , з урахуванням співвідношень (3.8) - (3.10), формалізують технічну справність, а також відповідні ЛЦ та ЛЗ означених ЛМ, така умова допускає наступну формалізацію:

$$\begin{aligned} N_{kl}^{i+1}, \forall N_{jk}^i: \exists \Omega^r(Z_{kl}^{i+1}), \forall Z_{kl}^{i+1} \in \Omega^r(Z_{kl}^{i+1}) &\Rightarrow \\ \Rightarrow \exists U_{jk}^i \in \Omega(U_{jk}^i), \exists R_{jk}^i \in \Omega(R_{jk}^i) &\Rightarrow \\ \Rightarrow \exists Z_{jk}^i \in \Omega^r(Z_{jk}^i), Q_{jk}^i \in \Omega(Q_{jk}^i). & \end{aligned} \quad (3.11)$$

Таким чином, у даному підрозділі співвідношеннями (3.8) - (3.10) формалізований стан технічної справності, а також ЛЦ та ЛЗ породжуваними ними ЛЗ для окремих ЛМ різного рівня ієрархії. Урахуванням цих результатів співвідношеннями (3.11) формалізовані умови, які виражають принцип координованості ЛЦ та породжуваними ними ЛЗ для нижчих ЛМ стосовно відповідних ЛЦ та ЛЗ для безпосередньо вищих ЛМ в ієрархічно організованих ІМС. Зазначені моделі були використані для організації процесів управління реальними ІМС. Зокрема, такі моделі використані для реалізації процесу управління мережною системою сільськогосподарської водопостачання.

3.3. Координовність локальних цілей та локальних задач стосовно глобальної цілі та глобальної задачі в багаторівневих інженерних мережних системах

Відповідно до [88] для реальних ієрархічно організованих складних технічних систем є справедливим твердження про те, що досягнення глобальної цілі їхнього функціонування за допомогою реалізації відповідної задачі управління такими об'єктами залежить від досягнення підсистемами найнижчого рівня ієрархії локальних цілей їхнього функціонування за допомогою реалізації відповідних локальних задач управління цими підсистемами. При цьому для реалізації процесів управління ієрархічно організованими системами є необхідним виконання принципу координовності локальних цілей функціонування та породжуваних ними локальних задач управління для підсистем найнижчого рівня ієрархії стосовно глобальної цілі

функціонування та породжуваної нею глобальної задачі управління для ієрархічно організованої системи [88].

У ієрархічно організованій складній технічній системі зазначений принцип виконується в тому випадку, якщо реалізація локальних задач управління підсистемами найнижчого рівня ієрархії, породжуваних відповідними локальними цілями їхнього функціонування, приводить до реалізації глобальної задачі керування ієрархічно організованою системою, породжуваною відповідною глобальною ціллю її функціонування [88].

Розглянемо можливий підхід до формалізації умов, які реалізують зазначений принцип в ієрархічно організованих ІМС. Справедливість такого підходу обумовлена твердженням, що встановлює умови реалізації розглядуваного принципу в ієрархічно організованих ІМС, яке сформульовано та доведено в [79 - 81]. Поняття ЛЦ та ЛЗ для окремих ЛМ різного рівня ієрархії розглянуто в підрозділі 3.2 даної роботи. Ціль функціонування ІМС та породжувану нею задачу управління ІМС назвемо відповідно глобальною ціллю функціонування (ГЦ) та глобальною задачею управління (ГЗ) для розглядуваної ІМС.

Виходячи з аналізу функціонального призначення реальних ІМС [60, 62, 136], можна зробити висновок, що ЛЦ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії полягає в створенні необхідних умов функціонування для всіх тих СЦП, які підключені до розглядуваної ЛМ. Така ЛЦ може бути виражена приналежністю вектора керованих змінних розглядуваної ЛМ до відповідної області необхідних значень, яка є підобластю припустимих значень цього вектора.

Для визначеності будемо припускати, що в розглядуваній ІМС ЛМ найнижчого рівня є ЛМ першого рівня ієрархії. Тоді безпосередньо вищими для них є ЛМ другого рівня ієрархії.

З урахуванням введених позначень та понять ЛЦ для ЛМ першого рівня ієрархії N_{jk}^1 може бути формалізована наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} N_{jk}^1: Z_{jk}^1 \in \Omega^r(Z_{jk}^1), U_{jk}^1 \in \Omega(U_{jk}^1), \\ R_{jk}^1 \in \Omega(R_{jk}^1), Q_{jk}^1 \in \Omega(Q_{jk}^1). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Виходячи з аналізу функціонального призначення реальних ІМС [60, 62, 136], можна зробити висновок, що ГЦ для ієрархічно організованих об'єктів управління розглядуваного класу полягає в

створенні припустимих умов функціонування для всіх СЦП підключених до розглядуваної ІМС. Відповідно до [60, 62, 136], СЦП реальних ІМС підключені до ЛМ найнижчого рівня ієрархії. Тому на підставі введених позначень та понять, з урахуванням співвідношень (3.12), ГЦ для реальної ІМС може бути формалізована наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \forall N_{jk}^1: Z_{jk}^1 \in \Omega^r(Z_{jk}^1), U_{jk}^1 \in \Omega(U_{jk}^1), \\ R_{jk}^1 \in \Omega(R_{jk}^1), Q_{jk}^1 \in \Omega(Q_{jk}^1). \end{aligned} \quad (3.13)$$

З аналізу співвідношень (3.12) та (3.13) можна зробити висновок, що в реальних ІМС досягнення всіма ЛМ найнижчого рівня ієрархії відповідних ЛЦ приводить до досягнення ГЦ для ІМС. Отже запропонований підхід до формалізації ЛЦ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії та ГЦ для ІМС дозволяє формалізувати умову, що реалізує принцип координованості ЛЦ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії стосовно ГЦ для ІМС в ієрархічно організованих об'єктах управління розглядуваного класу.

Формалізована співвідношенням (3.12) ЛЦ породжує наступну ЛЗ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії. Необхідно в розглядуваній ЛМ реалізувати такі значення векторів стану АЕ та ПЕ, що знаходяться в відповідних областях їхніх припустимих значень, які при визначеному необхідному значенні вектора керованих змінних безпосередньо вищої ЛМ забезпечать деяке необхідне значення вектора керованих змінних розглядуваної ЛМ. При цьому передбачається, що значення вектора збурювальних змінних розглядуваної ЛМ знаходяться в області їхніх припустимих значень.

На підставі введених позначень та понять, з урахуванням співвідношення (3.12), ЛЗ для розглядуваної ЛМ першого рівня ієрархії N_{jk}^1 , може бути формалізована наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} N_{kl}^2, N_{jk}^1: Z_{kl}^2 \in \Omega^r(Z_{kl}^2) \Rightarrow \exists U_{jk}^1 \in \Omega(U_{jk}^1), \\ \exists R_{jk}^1 \in \Omega(R_{jk}^1) \Rightarrow \exists Z_{jk}^1 \in \Omega^r(Z_{jk}^1), Q_{jk}^1 \in \Omega(Q_{jk}^1). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Формалізована співвідношеннями (3.13) ГЦ для ІМС породжує наступну ГЗ для ієрархічно організованого об'єкта управління

розглядуваного класу. Необхідно у всіх ЛМ нижчого рівня ієрархії обрати такі значення векторів параметрів АЕ та ПЕ, які належать областям їхніх припустимих значень, що забезпечать деякі значення векторів керованих змінних у розглядуваних ЛМ, які належать областям їхніх необхідних значень. При цьому передбачається, що вектори керованих змінних, які відповідають усім безпосередньо нижчим ЛМ, належать областям їхніх необхідних значень, а всі інші вектори, які відповідають зазначеним ЛМ, - областям їхніх припустимих значень.

На підставі введених позначень та понять, з урахуванням співвідношень (3.14), ГЗ для реальної ІМС може бути формалізована наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \forall N_{kl}^2, \forall N_{jk}^1: Z_{kl}^2 \in \Omega^r(Z_{kl}^2) \Rightarrow \\ \Rightarrow \exists U_{jk}^1 \in \Omega(U_{jk}^1), \exists R_{jk}^1 \in \Omega(R_{jk}^1) \Rightarrow \\ \Rightarrow \exists Z_{jk}^1 \in \Omega^r(Z_{jk}^1), Q_{jk}^1 \in \Omega(Q_{jk}^1). \end{aligned} \quad (3.15)$$

На підставі аналізу співвідношень (3.14) та (3.15) можна зробити висновок, що реалізація ЛЗ для всіх ЛМ найнижчого рівня ієрархії приводить до реалізації ГЗ для ІМС. Отже, запропонований підхід до формалізації ЛЗ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії та ГЗ для ІМС дозволяє формалізувати умову, що реалізує принцип координованості ЛЗ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії стосовно ГЗ для ІМС в ієрархічно організованих об'єктах управління розглядуваного класу.

Таким чином, розглядуваний у даному підрозділі підхід до формалізації ЛЦ та ЛЗ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії, а також ГЦ та ГЗ для ІМС дозволяє формалізувати співвідношеннями (3.12) - (3.15) умови, які реалізують принцип координованості ЛЦ та ЛЗ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії стосовно відповідних ГЦ та ГЗ для ІМС.

Отримані результати використані для реалізації процесів управління ієрархічно організованими мережними системами сільськогосподарського водопостачання.

3.4. Висновки

1. Формалізовано ієрархічну декомпозицію топологічної структури ІМС, породжувану ієрархічною декомпозицією ІМС на окремі ЛМ за функціональним принципом.

2. Розроблено підхід до формалізації стану технічної справності, а також ЛЦ та породжуваних ними ЛЗ для окремих ЛМ різного рівня ієрархії. На підставі такого підходу формалізовані умови, які реалізують принцип координовності ЛЦ та породжуваних ними ЛЗ для нижчих ЛМ стосовно відповідних ЛЦ та ЛЗ для безпосередньо вищих ЛМ в ієрархічно організованих ІМС.

3. Розроблено підхід до формалізації ЛЦ та ЛЗ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії, а також ГЦ та ГЗ для ієрархічно організованих ІМС. На основі такого підходу формалізовані умови, які реалізують принцип координовності ЛЦ та ЛЗ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії стосовно відповідних ГЦ та ГЗ для ієрархічно організованих ІМС.

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ІЄРАРХІЧНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ІНЖЕНЕРНИМИ МЕРЕЖНИМИ СИСТЕМАМИ

4.1. Формалізація координуючих зв'язків в ієрархічно організованих керуючих системах

Одним з основних принципів ієрархічної організації системи є пріоритет дій або право втручання підсистем верхнього рівня ієрархії відносно підсистем нижнього рівня [88, 90]. Цей принцип припускає, що в ГСУ деякі ЛСУ, названі нижчими, знаходяться під дією або управляються іншими ЛСУ, названими вищими. Відповідно до вказаного принципу в процесі функціонування ієрархічно організованої ГСУ відбувається передача командних сигналів від вищих ЛСУ до нижчих (підпорядкованих) ЛСУ. Виходячи з [88, 90], зазначені вертикальні дії назвемо координуючими.

Доцільно припустити, що для реалізації зазначених дій у ГСУ окремі ЛСУ повинні бути певним способом зв'язані між собою. Такі вертикальні зв'язки ЛСУ, які дозволяють реалізувати координуючі дії, назвемо координуючими зв'язками.

Відповідно до [72] розглянемо підходи до формалізації координуючих зв'язків в ієрархічно організованих системах. Для досягнення цієї мети визначимо, яким способом повинні бути зв'язані ЛСУ в ієрархічно організованій ГСУ, щоб вищі (координуючі) ЛСУ могли надавати координуючих дій на відповідні підпорядковані їм (координовні) ЛСУ. Будемо вважати, що така можливість має місце, якщо виконується наступний постулат.

Постулат 1. Кожна ЛСУ може надавати координуючі дії тільки на координовні (нижчі, підпорядковані) ЛМ відносно розглядуваної ЛСУ.

Сформульований постулат породжує два наслідки.

Наслідок 1. Ніяка ЛСУ не може надавати координуючих дій сама собі.

Наслідок 2. Ніяка ЛСУ не може надавати координуючих дій на координуючі (вищі, командні) ЛСУ відносно розглядуваної ЛСУ.

З метою реалізації можливих підходів до формалізації координуючих зв'язків в ієрархічно організованій ГСУ введемо наступні позначення та поняття. При цьому будемо використовувати термінологію, прийняту в [13, 72, 94].

Множину ЛСУ, що входять в ієрархічну ГСУ, позначимо X . Множині X координуючі зв'язки окремих ЛСУ $x \in X$ формалізуємо відображенням Γ таким способом. Для ЛСУ x відображення Γ визначає підмножину $\Gamma(x)$ ЛСУ, які є безпосередньо координованими відносно розглядуваної ЛСУ x . Доцільно припустити, що транзитивне замикання відображення Γ визначає підмножину $\bar{\Gamma}(x)$ усіх ЛСУ координованих відносно розглядуваної ЛСУ (як безпосередньо, так і за посередництвом інших ЛСУ). З поняття, що надається відображенням Γ , випливає, що для ЛСУ x прообраз Γ^{-1} визначає підмножину $\Gamma^{-1}(x)$ ЛСУ, які надають координуючі дії безпосередньо на розглядувану ЛМ x . Транзитивне ж замикання прообразу Γ^{-1} визначає підмножину $\bar{\Gamma}^{-1}(x)$ усіх ЛСУ, які надають координуючих дії на розглядувану ЛМ x (як безпосередньо, так і за посередництвом інших ЛСУ).

Введені позначення та поняття, які формалізують координуючі зв'язки ЛСУ в ієрархічно організованій ГСУ, дозволяють подати відповідний постулат у наступному вигляді:

$$\left(\{x\} \cup \bar{\Gamma}^{-1}(x) \right) \cap \bar{\Gamma}(x) = \emptyset. \quad (4.1)$$

Зі співвідношення (4.1) можна формально одержати наслідки та 2 у вигляді співвідношень (4.2) та (4.3):

$$\{x\} \cap \bar{\Gamma}(x) = \emptyset; \quad (4.2)$$

$$\bar{\Gamma}^{-1}(x) \cap \bar{\Gamma}(x) = \emptyset. \quad (4.3)$$

Координуючі зв'язки між ЛСУ в ієрархічній ГСУ допускають також формалізацію у вигляді суворого часткового упорядкування

множині X . Покажемо, що відображення Γ , яке формалізує координуючі зв'язки ЛСУ в ієрархічній ГСУ, які задовольняють умові (4.1), породжує відношення суворого часткового упорядкування на множині X . Для цього досить припустити, що для $a, b \in X$ має місце співвідношення $a \geq b$, якщо $b \in \bar{\Gamma}(a)$. При цьому з умови (4.2) випливає, що для $\forall a, b \in X$ має місце співвідношення $a \neq b$. Тому в даному випадку має місце співвідношення $a > b$ і, отже, відображення Γ на X породжує відношення суворого часткового упорядкування між елементами цієї множини. Якщо $a > b$ і немає такого іншого елемента c у множині X , що $a > c > b$, то ЛСУ b є безпосередньо координованою відносно ЛСУ a , а ЛСУ a - безпосередньо координуючою для ЛСУ b . Це відповідає умові $b \in \Gamma(a)$. Якщо ж $\exists c \in X$, для якого має місце співвідношення $a > c > b$, то ЛСУ b є координованою відносно ЛСУ a за посередництвом інших ЛСУ (зокрема, ЛСУ c), а ЛСУ a - координуючою для ЛСУ b за посередництвом інших ЛСУ (зокрема, ЛСУ c).

Ще одним можливим є теоретико-графовий підхід до моделювання координуючих зв'язків ЛСУ в ієрархічній ГСУ. Для реалізації зазначеного підходу припустимо, що відображення Γ на множині X породжує зв'язний моделюючий оргграф G , множиною вершин якого є X , а множина дуг E визначена таким способом. Пара вершин (a, b) зв'язана дугою $e \in E$, якщо $b \in \Gamma(a)$, де $a, b \in X$. Отже, дуга $e = (a, b)$ означає, що ЛСУ b є безпосередньо координованою відносно ЛСУ a , а ЛСУ a - безпосередньо координуючою для ЛСУ b . Направлений шлях (ланцюг) P_{ab} із вершини a у вершину b означає, що ЛСУ b є координованою відносно ЛМ a за посередництвом інших ЛСУ, які відповідають проміжним вершинам ланцюга P_{ab} . Такою вершиною може бути ЛСУ c , якщо $c \in P_{ab}$. У цьому випадку ЛСУ a є координуючою для ЛСУ b

за посередництвом інших ЛМ (зокрема, ЛСУ C). У силу співвідношен (4.2) та (4.3) моделюючий оргграф G не містить петель та орієнтованих циклів (контурів). Отже, координуючі зв'язки ЛСУ ієрархічної ГСУ допускають формалізацію у вигляді зв'язного безконтурного моделюючого оргграфа G , названого відповідно до [94] графом суворого часткового упорядкування. Графічна інтерпретація координуючих зв'язків в ієрархічно організованих ГСУ приведена в [79, 80].

Різні підходи до формалізації координуючих зв'язків в ієрархічних системах дозволяють вибрати найбільш адекватний підхід при розв'язанні конкретних задач дослідження та синтезу ієрархічно організованих керуючих систем. Зокрема, теоретично множинна формалізація координуючих зв'язків зручна для аналітичних досліджень таких систем [72, 88, 90]. Формалізація координуючих зв'язків у вигляді суворого часткового упорядкування більш придатна для алгоритмізації та програмної реалізації процесу функціонування систем розглядуваного класу. Відповідно до [72, 90] моделюючим графом координуючі зв'язки зручно представити в ієрархічно організованих людино-машинних керуючих системах.

4.2. Формалізація зворотних зв'язків в ієрархічно організованих керуючих системах

Іншим основним принципом ієрархічної організації керуючих систем є залежність дій підсистем верхнього рівня ієрархії від фактичного виконання підсистемами нижніх рівнів своїх функцій [88]. Цей принцип припускає, що деякі ЛСУ, названі вищим (координуючими, командними), одержують відповідну інформацію у вигляді відповідних сигналів про характер та ступінь успішності реалізації координуючих дій на нижчі (координовні, підпорядковані) ЛСУ. Відповідно до розглядуваного принципу, у процесі функціонування ієрархічно організованої ГСУ відбувається передача відповідної інформації у вигляді відповідних сигналів від нижчих до вищих ЛСУ. Відповідно до [74, 88], зазначені вертикальні дії будемо називати відповідними діями (відповідною інформацією) або сигналами зворотних зв'язків.

Доцільно припустити, що для реалізації зазначених дій окремі ЛСУ, які входять до складу ієрархічно організованих ГСУ, повинні бути визначеним способом зв'язані між собою. Виходячи з [88] вертикальні зв'язки між ЛСУ, які дозволяють передати відповідні

сигнали вищим (координуючим) ЛСУ від координованих ними нижчих ЛСУ про виконання останніми своїх функцій, будемо називати зворотними зв'язками. Відповідно до [88], якість функціонування ієрархічно організованих ГСУ забезпечується зворотними зв'язками між окремими ЛСУ.

Відповідно до [73] розглянемо можливі моделі, які формалізують зворотні зв'язки ЛСУ, що входять до складу ієрархічно організованих ГСУ.

Для реалізації зазначеної мети розглянемо, яким способом повинні бути зв'язані ЛСУ в ієрархічно організованій ГСУ, щоб нижчі (підпорядковані, координовні) ЛСУ могли надавати відповідних дій (передавати відповідну інформацію) на відповідні вищі (координуючі, командні) ЛСУ. Будемо вважати, що така можливість має місце, якщо виконується наступний постулат.

Постулат 2. Кожна ЛСУ може надавати відповідних дій по каналах зворотних зв'язків тільки на вищі (координуючі, командні) ЛСУ відносно розглядуваної ЛСУ.

Сформульований постулат породжує три наслідки.

Наслідок 1. Ніяка ЛСУ не може надавати відповідні дії по каналах зворотних зв'язків на себе саму.

Наслідок 2. Ніяка ЛСУ не може надавати відповідних дій по каналах зворотних зв'язків на нижчі (підпорядковані, координовні) ЛСУ відносно розглядуваної ЛСУ.

Наслідок 3. Кожна ЛСУ може одержувати відповідні дії по каналах зворотних зв'язків тільки від координованих (підпорядкованих, нижчих) ЛСУ відносно розглядуваної ЛСУ.

Виходячи з [88], в ієрархічно організованих системах первинними є координуючі зв'язки, які мають визначальне значення відносно зворотних зв'язків. Тому для формалізації останніх будемо використовувати моделі координуючих зв'язків, які містяться в підрозділі 4.1 даної роботи.

З метою реалізації можливих підходів до моделювання зворотних зв'язків ЛСУ в ієрархічно організованій ГСУ введемо наступні позначення та поняття.

Нехай X - множина ЛСУ, які входять до складу ієрархічно організованої ГСУ. Будемо припускати, що координуючі зв'язки окремих ЛСУ $x \in X$ формалізовані відображенням Γ на X відповідно до моделі, яка міститься в підрозділі 4.1 даної роботи. Зворотні зв'язки окремих ЛСУ $x \in X$ формалізуємо відображенням Δ на X таким способом. Для окремої ЛСУ x відображення Δ визначає

підмножину $\Delta(x)$ ЛСУ, які одержують відповідні дії по каналах зворотних зв'язків безпосередньо від розглядуваної ЛСУ x .

Доцільно припустити, що транзитивне замикання відображення Δ визначає підмножину $\bar{\Delta}(x)$ усіх ЛСУ, які одержують відповідні дії по каналах зворотних зв'язків від розглядуваної ЛСУ x (безпосередньо, так і за посередництвом інших ЛСУ). Зі змісту, надається відображенню Δ , впливає, що для ЛСУ x прообраз $\Delta^{-1}(x)$ визначає підмножину ЛСУ, які надають відповідних дій по каналах зворотних зв'язків безпосередньо на розглядувану ЛМУ x . Транзитивне ж замикання прообразу Δ^{-1} визначає підмножину $\bar{\Delta}^{-1}(x)$ усіх ЛСУ, які надають відповідних дій по каналах зворотних зв'язків на розглядувану ЛМУ x (як безпосередньо, так і посередництвом інших ЛСУ).

Введені в даному підрозділі позначення та поняття, формалізують координуючі та зворотні зв'язки ЛСУ в ієрархічно організованій ГСУ, дозволяють висловити сформульований вище постулат 2 таким чином:

$$\{x\} \cup \bar{\Gamma}(x) \cap \bar{\Delta}(x) = \emptyset; \quad (4.4)$$

$$\bar{\Delta}(x) \subset \Gamma^{-1}(x). \quad (4.5)$$

Виходячи зі співвідношень (4.4) та (4.5), які формалізують зазначений постулат, можна одержати вирази (4.6) - (4.8), які відповідно формалізують наслідки 1 - 3, породжувані постулатом 2:

$$\{x\} \cap \bar{\Delta}(x) = \emptyset; \quad (4.6)$$

$$\bar{\Gamma}(x) \cap \bar{\Delta}(x) = \emptyset; \quad (4.7)$$

$$\bar{\Delta}^{-1}(x) \subset \bar{\Gamma}(x). \quad (4.8)$$

Зокрема, із співвідношення (4.6) випливає, що ЛСУ x не може надавати відповідних дій по каналах зворотних зв'язків на себе саму. Співвідношенням (4.7) такі дії забороняється надавати з боку ЛСУ x на всі нижчі (підпорядковані) ЛСУ відносно розглядуваної ЛСУ x . Зміст співвідношення (4.8) полягає в тому, що відповідні дії по каналах зворотних зв'язків із боку ЛСУ x можуть бути зроблені лише на ті ЛСУ, які є координуючими відносно розглядуваної ЛСУ x .

Співвідношення (4.4) - (4.8) реалізують теоретико-множинний підхід до формалізації зворотних зв'язків в ієрархічно організованих керуючих системах. З цих співвідношень випливає, що відображення Δ породжує відношення суворого часткового упорядкування на множині X , яке формалізує координуючі зв'язки ЛСУ в ієрархічно організованій ГСУ. Аналогічно можна показати, що відображення Δ також породжує відношення суворого часткового упорядкування на множині X . Отже, також можливим є підхід до формалізації зворотних зв'язків в ієрархічно організованих керуючих системах у вигляді суворого часткового упорядкування. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що відображення Γ на множині X породжує зв'язний безконтурний моделюючий оргграф G , названий відповідно до [94] графом суворого часткового упорядкування, який формалізує координуючі зв'язки в ієрархічно організованій ГСУ. Аналогічно можна показати, що відображення Δ на множині X породжує не зв'язково зв'язний безконтурний моделюючий оргграф H , що є графом суворого часткового упорядкування, який формалізує зворотні зв'язки в ієрархічно організованій ГСУ. Тому має місце також і теоретико-графовий підхід до формалізації зворотних зв'язків в ієрархічно організованих керуючих системах. Графічна інтерпретація зворотних зв'язків в ієрархічно організованих ГСУ приведена в [79 - 81].

Різним конкретним задачам дослідження та синтезу ієрархічно організованих систем адекватні відповідні можливі підходи до формалізації зворотних зв'язків у таких системах. Зокрема, для розгляду концептуальних питань та проведенню аналітичних досліджень ієрархічно організованих керуючих систем більш зручним є теоретико-множинний підхід. З метою же алгоритмічної та програмної реалізації процесів функціонування ієрархічно

організованих керуючих систем адекватною в більшій мірі формалізація зворотних зв'язків у вигляді відношень суворостасткового упорядкування. З урахуванням специфіки ієрархічно організованих людино-машинних керуючих систем, зворотні зв'язки таких системах більш зручно представити у вигляді моделюючих графів [45, 73, 85, 88].

4.3. Формалізація координуючих дій в ієрархічно організованих керуючих системах

У роботі з ієрархічних систем [88], що стала класичною, а також в інших роботах [90, 133] передбачається, що координуючі дії вищого (координуючих) підсистем на нижчі (координовні) підсистем здійснюються завданням відповідних векторів параметрів. Однак такий підхід до моделювання координуючих дій справедливий лише для визначеного класу ієрархічно організованих керуючих систем. Існують ієрархічні системи, в яких координуючі дії мають більш складну структуру. У цьому випадку для формалізації координуючих дій необхідно розробити моделі, які адекватно відповідають більш складній їхній структурі.

Відповідно до [55] розглянемо концептуалізацію координуючих дій в ієрархічно організованих керуючих системах, яка дозволяє реалізувати більш загальний, ніж у [88, 90], підхід до їхнього моделювання. Координуючі дії визначимо як інформацію, отриману в результаті формування локального рішення вищою (координуючою) підсистемою, що передається розглядуваній нижчій (координовній) підсистемі з метою використання цієї інформації для формування відповідного локального рішення координовною підсистемою.

Одним із можливих шляхів використання такої інформації координовною підсистемою для формування відповідного локального рішення є конкретизація яким-небудь чином змінних (параметрів) розглядуваної підсистеми.

Можливі способи конкретизації змінних (параметрів) підсистем координуючими діями постулюємо таким способом.

1. Завдання певних значень деяких змінних (параметрів).
2. Завдання обмежень, що визначають області можливих значень деяких змінних (параметрів).
3. Завдання взаємозв'язків (взаємозалежностей) між деякими змінними (параметрами).

З метою реалізації запропонованого в даному підрозділі підходу до формалізації координуючих дій в ієрархічно організован

керуючих системах припустимо, що змінні (параметри) x розглядуваної координовної підсистеми є елементами множини X ; $x \in X$. Відповідно до запропонованої концептуалізації координуючих дій, останні різним способом конкретизують елементи $x \in X$. На підставі вищевказаних постулатів, які визначають можливі способи конкретизації елементів $x \in X$, у множині X виділимо наступні підмножини.

1. Множина $X^C \subset X$, елементи якої координуючою дією визначаються чисельно:

$$X^C: \forall x \in X^C, x^c - const. \quad (4.9)$$

2. Множина $X^V \subset X$, на елементи якої координуючою дією накладаються обмеження, які визначають області можливих їхніх змін

$$X^V: \forall x \in X^V, x \in [x^*, x^{**}], x^* \neq x^{**}; \quad (4.10)$$

де x^* та x^{**} - відповідно нижня та верхня межа області можливих змін елемента x .

3. Множина $X^R \subset X$, на елементи якої координуючою дією накладається множина взаємозв'язків R . При цьому окремі взаємозв'язки $r \in R$ визначаються співвідношеннями, яким повинні задовольняти елементи $x \in X^R$:

$$X^R: \forall r \in R, \exists X_r^R \subset X^R; \quad (4.11)$$

де X_r^R - підмножина елементів із множини X^R , зв'язаних співвідношенням $r \in R$.

Виходячи зі співвідношень (4.9) - (4.11), установимо взаємозв'язки між множинами X^C, X^V та X^R .

Якщо деякий елемент $x \in X^C$, то на основі співвідношення (4.9) координуючою дією для нього задається певне значення $x = x^C$. Цим виключається завдання для розглядуваного елемента

області можливих змін $[X^*, X^{**}]$, яке має місце на основі співвідношення (4.10) у випадку $x \in X^V$. І навпаки, якщо деякий елемент $x \in X^V$, то на основі співвідношення (4.10) координуючою

дією для нього визначається область можливих змін $[X^*, X^{**}]$. Цим виключається завдання для розглядуваного елемента певного значення $x = x^C$, яке має місце на основі співвідношення (4.9) у випадку $x \in X^C$.

Отже, множини X^C та X^V не можуть мати спільних елементів, тому справедливе співвідношення:

$$X^C \cap X^V = \emptyset. \quad (4.12)$$

Визначення елементів $x \in X^C$ чисельно співвідношеннями (4.9) та завдання областей можливих змін для елементів $x \in X^V$ співвідношеннями (4.10) не виключають можливості накладення координуючою дією взаємозв'язків (взаємозалежностей) $r \in R$ між такими елементами. Тому на основі співвідношення (4.11) зазначені елементи можуть входити в підмножини $X_r^R \subset X^R$, де $r \in R$. Отже, у загальному випадку можуть мати місце співвідношення:

$$X^C \cap X^R \neq \emptyset; \quad (4.13)$$

$$X^V \cap X^R \neq \emptyset. \quad (4.14)$$

Співвідношення (4.12) - (4.14) формалізують взаємозв'язки між множинами X^C , X^V та X^R .

Множина $X^D \subset X$, елементи якої конкретизовані яким-небудь способом координуючою дією, визначається наступним співвідношенням:

$$X^D = X^C \cup X^V \cup X^R. \quad (4.15)$$

Множини X^C , X^V та X^R , які входять у співвідношення (4.15), відповідно визначені співвідношеннями (4.9) - (4.11).

Співвідношення (4.9) - (4.15) реалізують запропонований підхід до формалізації координуючих дій в ієрархічно організованих керуємих системах. Графічна інтерпретація запропонованого підходу до формалізації координуючих дій в ієрархічно організованих керуємих системах подана в [79 - 81].

Запропонований у даному підрозділі підхід використаний для моделювання координуючих дій у системах, які управляють ієрархічно організованими ІМС. Об'єкти такого класу, що представляють ієрархічно взаємозалежні та взаємодіючі між собою в процесі функціонування ЛМ, розглянуті в розділі 3 даної роботи. Виділимо в ієрархічно організованій ІМС вищу (координуючу) ЛМ, до якої безпосередньо підключені декілька нижчих (координуваних) ЛМ. Використовуючи виділену підсистему, розглянемо координуючі дії, які надаються вищою ЛМ, на одну з підключених до неї нижчих ЛМ.

У цьому зв'язку елементами множини X^C доцільно вважати напори у вхідних вершинах розглядуваної нижчої ЛМ, що чисельно визначаються координуючою дією із боку вищої ЛМ. Наприклад,

$$X^C = \{x_1 = 22,8; x_2 = 22,6; x_3 = 22,4; x_4 = 22,2; x_5 = 22,0; x_6 = 21,8; x_7 = 21,6; x_8 = 21,5; x_9 = 21,7; x_{10} = 21,9; x_{11} = 22,1; x_{12} = 22,3; x_{13} = 22,5; x_{14} = 22,7\}.$$

З метою забезпечення вищою ЛМ припустимих умов функціонування одночасно для декількох підключених до неї нижчих ЛМ істотно, щоб напори у визначених проміжних вершинах підключених мереж знаходилися в заданих областях їхніх можливих значень [136]. У цьому зв'язку елементами множини X^V доцільно вважати такі напори в проміжних вершинах розглядуваної нижчої ЛМ,

які координуючою дією з боку вищої ЛМ передбачається підтримувати в заданих областях їхніх можливих значень. Наприклад,

$$X^V = \{x_{15} \in [21,5; 22,5]; x_{16} \in [21,3; 22,3]\}.$$

Для забезпечення ЦП із боку вищої ЛМ усіх підключених до неї нижчих ЛМ необхідно накласти обмеження на сумарні витрати ЦП на вихідних вершинах кожної із підключених ЛМ. У цьому зв'язі елементами множини X^R доцільно вважати величини витрат ЦП на вихідних вершинах розглядуваної нижчої ЛМ, на суму значень яких координуючою дією з боку вищої ЛМ накладається визначене обмеження. Наприклад,

$$X^R = \{x_i; i = 17, \dots, 62 : \sum_{i=17}^{62} x_i \leq 1134,5\}.$$

Елементами множини X^D доцільно вважати змінні (параметри) розглядуваної нижчої ЛМ, котрі яким-небудь чином конкретизовують координуючою дією з боку вищої ЛМ.

Тому множина X^D включає елементи множин X^C, X^V, X^R :

$$X^D = \{x_i; i = 1, \dots, 62\}..$$

Розглядуваний приклад реалізує один із можливих прикладних аспектів запропонованого в даному підрозділі підходу до моделювання координуючих дій у системах, які управляються ієрархічно організованими ІМС. Такий підхід використаний при розробці процесів управління РМ системи сільськогосподарського водопостачання.

4.4. Висновки

1. Виходячи з відповідної концептуалізації, постульовані умови необхідні для реалізації координуючих та зворотних зв'язків підсистемами в ієрархічно організованих керуючих системах.

У цьому зроблені можливі підходи до формалізації координуючих та зворотних зв'язків: теоретико-множинний, у вигляді часткового упорядкування, а також теоретико-графовий. Визначені прикладні аспекти запропонованих підходів з урахуванням реалізації реальних керуючих систем розглядуваного класу. Визначено підхід до концептуалізації та формалізації координуючих дій в ієрархічно організованих керуючих системах, враховує різні можливі способи конкретизації змінних (параметрів) координуючих підсистем. Запропонований підхід використаний при розробці ГСУ ієрархічно організованими ІМС, до яких зокрема належать мережні системи сільськогосподарського водопостачання та зрошувальні системи.

РЕАЛІЗАЦІЯ ЛОКАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ В ІЄРАРХІЧНО ОРГАНІЗОВАНИХ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖНИХ СИСТЕМАХ

5.1. Кластер-аналіз та функціональні відповідності як реалізаційна основа процесів оперативного управління інженерними мережними системами

Розглянемо один із можливих підходів до реалізації процесів управління ЛМ, в основу якого покладено моделі, методи та процедури сучасного кластер-аналізу та функціональних відповідностей [34, 119]. Адекватність запропонованого підходу обумовлена специфікою реальних ЛМ як об'єктів управління [62, 136]. Для реалізації указанного підходу проведемо відповідну формалізацію як об'єкта управління.

Відповідно до [62, 136] припустимо, що керуючі дії розглядуваній ЛМ здійснюються шляхом зміни станів її АЕ та ПЕ. Виходячи з цього, розглядуваній ЛМ поставимо у відповідність вектори станів (параметрів) її АЕ та ПЕ, які позначимо відповідно Z та R . Також розглядуваній ЛМ поставимо у відповідність вектор керування змінних (параметрів), який позначимо U .

На підставі аналізу реальних ЛМ, який міститься в [62, 136] припустимо, що зазначені вектори Z , U та R знаходяться у певних заданих областях їхніх припустимих значень, які позначимо відповідно $\Omega(Z)$, $\Omega(U)$ та $\Omega(R)$. Відповідно до цільової настанови процесу управління розглядуваною ЛМ [62, 136] вважатимемо відомим (заданим) індекс i кластера $\Omega_i^r(Z)$ потрібних значень вектора Z , котрий належить області його припустимих значень $\Omega(Z)$. При цьому вважатимемо, що $i \in I$, де I - множина індексів кластерів потрібних значень вектора Z .

Розділ

Потрібним значенням Z^r вектора Z будемо називати будь-яке значення цього вектора, яке належить до заданого кластера $\Omega_i^r(Z)$ потрібних його значень:

$$Z^r \in \Omega_i^r(Z). \quad (5.1)$$

Припустимо, що вимірне поточне значення Z^t вектора Z , яке у загальному випадку не задовольняє співвідношенню (5.1), належить певному кластеру $\Omega_j^t(Z)$ поточних значень указанного вектора, яке знаходиться в області припустимих його значень $\Omega(Z)$:

$$Z^t \in \Omega_j^t(Z). \quad (5.2)$$

При цьому вважатимемо, що $j \in J$, де J - множина індексів кластерів поточних значень вектора Z .

Припустимо, що вимірне поточне значення U^t вектора U належить певному кластеру $\Omega_k^t(U)$ поточних значень указанного вектора, який знаходиться в області припустимих його значень $\Omega(U)$:

$$U^t \in \Omega_k^t(U). \quad (5.3)$$

При цьому вважатимемо, що $k \in K$, де K - множина індексів кластерів поточних значень вектора U .

Припустимо, що вимірне поточне значення R^t вектора R належить певному кластеру $\Omega_i^t(R)$ поточних значень указанного вектора, який знаходиться в області припустимих його значень $\Omega(R)$:

$$R^t \in \Omega_i^t(R). \quad (5.4)$$

При цьому вважатимемо, що $l \in L$, де L - множина індексів кластерів поточних значень вектора R .

Припустимо, що шукане потрібне значення U^r вектора U , яке визначається в ході реалізації процесу управління розглядуваною ЛМ, належить певному кластеру $\Omega_m^r(U)$ потрібних значень указанного вектора, котрий знаходиться в області припустимих його значень $\Omega(U)$:

$$U^r \in \Omega_m^r(U). \quad (5.1)$$

При цьому вважатимемо, що $m \in M$, де M - множина індексів кластерів поточних значень вектора U .

Припустимо, що шукане потрібне значення R^r вектора R , яке визначається в ході реалізації процесу управління розглядуваною ЛМ, належить певному кластеру $\Omega_n^r(R)$ потрібних значень указанного вектора, котрий знаходиться в області припустимих його значень $\Omega(R)$:

$$R^r \in \Omega_n^r(R). \quad (5.2)$$

При цьому вважатимемо, що $n \in N$, де N - множина індексів кластерів поточних значень вектора R .

Припустимо, що на вказаних множинах індексів I, J, K, L, M, N визначені (задані) наступні функціональні відповідності (відображення):

$$P: I \times J \times K \times L \rightarrow M; \quad (5.3)$$

$$Q: I \times J \times K \times L \rightarrow N. \quad (5.4)$$

Відповідно до вказаних відображень P та Q , кожному упорядкованому набору індексів (i, j, k, l) відповідають визначені індекси m та n :

$$(i, j, k, l) \rightarrow m, \quad (5.5)$$

$$(i, j, k, l) \rightarrow n, \quad (5.6)$$

де $i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, m \in M, n \in N$.

Співвідношення (5.1) - (5.10) формалізують ЛМ як об'єкт управління.

На підставі даної формалізації побудуємо алгоритм, який аналізує процес управління розглядуваним об'єктом.

1. Відповідно до цільової настанови процесу управління розглядуваною ЛМ визначається індекс i , який ідентифікує кластер

$\Omega_i(Z)$, що містить необхідні значення Z^r вектора Z .

2. Для виміряного поточного значення Z^t вектора Z виконується перевірка виконання умови, визначеної співвідношенням (5.1). Якщо вказана умова виконується, то здійснюється перехід до пункту 1. У протилежному випадку виконується наступний пункт.

3. Виходячи зі співвідношення (5.2), визначається індекс j кластера $\Omega_j^t(Z)$, що містить виміряне поточне значення Z^t вектора Z .

4. Виходячи зі співвідношення (5.3), визначається індекс k кластера $\Omega_k^t(U)$, що містить виміряне поточне значення U^t вектора U .

5. Виходячи зі співвідношення (5.4), визначається індекс l кластера $\Omega_l^t(R)$, що містить виміряне поточне значення R^t вектора R .

6. Виходячи зі співвідношень (5.7) та (5.9), визначається індекс m вказаного кластера $\Omega_m^r(U)$ потрібних значень U^r вектора U .

7. Виходячи зі співвідношень (5.8) та (5.10), визначається індекс n вказаного кластера $\Omega_n^r(R)$ потрібних значень R^r вектора R .

8. Виходячи зі співвідношення (5.5), визначається потрібне значення U^r вектора U .

9. Виходячи зі співвідношення (5.6), визначається потрібне значення R^r вектора R .

10. У розглядуваній ЛМ здійснюється реалізація потрібних значень U^r та R^r векторів U та R .

11. Здійснюється перехід до пункту 1 даного алгоритму.

Для перевірки приналежності вимірюваного поточного значення

Z^t вектора Z певному кластеру $\Omega_i^t(Z)$ потрібних його значень у пункті 2 даного алгоритму передбачається використання алгоритму пошуку індексу підобласті, яка містить задане значення вектора [34, 119]. Вказаний алгоритм передбачається також використовувати як стандартну службову процедуру для пошуку

індексів j , k та l відповідних кластерів $\Omega_j^t(Z)$, $\Omega_k^t(U)$ та $\Omega_l^t(R)$,

які містять виміряні поточні значення Z^t , U^t та R^t векторів Z , U та R в пунктах 3, 4 та 5 даного алгоритму.

Для реалізації функціональних відповідностей (відображень) в пунктах 6 та 7 даного алгоритму передбачається використання відомий метод шаблонних розв'язків, застосовуваний в експертних системах прийняття рішень [90, 91, 102].

Даний алгоритм використаний для реалізації процесу управління МК зрошувальної системи, а також РМ системи сільськогосподарського водопостачання.

5.2. Методи автоматичної класифікації при реалізації процесів оперативного управління інженерними мережними системами

Відповідно до [30 - 33, 62, 136], для реалізації процесу оперативного управління ЛМ необхідно мати робочу інформацію про поточні значення векторів станів (параметрів) АЕ та ПЕ, а також векторів керованих та збурювальних змінних (параметрів) розглядуваної ЛМ. Відповідно до [75, 100, 119], одним із можливих підходів до одержання зазначеної інформації є використання методів автоматичної класифікації (АК), заснованих на постановці задачі виділення у відповідних багатовимірних векторних просторах

компактних груп точок (кластерів). Слідуючи [68, 100, 119], для організації процедури АК будемо використовувати евристичний алгоритм A еталонів, модифікований з урахуванням специфіки процесу управління розглядуваного класу в послідовну процедуру. Основна ідея такого алгоритму полягає в тому, що сукупність значень векторів, які знаходяться на однаковій відстані від кожного з еталонів (ядер), утворює компакту групу (кластер). В результаті зазначеної процедури певному обмірюваному поточному значенню вектора ставиться у відповідність код (індекс) визначеного кластера, який містить значення векторів, у певному змісті близьких до даного поточного значення. Вважатимемо, що визначений за допомогою цього алгоритму код кластера i є тією шуканою робочою інформацією про обмірюване поточне значення розглядуваного вектора.

Нехай класифікації підлягає обмірюване поточне значення X_i p -вимірного вектора X , визначеного наступним співвідношенням:

$$X_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip}).$$

Змістовно вектором X може бути будь-який із зазначених векторів, поставлених у відповідність розглядуваній ЛМ.

Враховуючи [68, 100, 119], припустимо, що в p -мірному векторному просторі X^p визначена (задана) функція $d(X_i, X_j)$

відстані або ступеня близькості значень X_i та X_j вектора X .

Припустимо, що як функція відстані (ступеня близькості) між значеннями X_i та X_j розглядуваного вектора X використовується заважена евклідова відстань [100]:

$$d(X_i, X_j) = \sqrt{\omega_1(x_{i1} - x_{j1})^2 + \dots + \omega_p(x_{ip} - x_{jp})^2}. \quad (5.11)$$

При цьому передбачається, що кожній координаті x_{im} вектора X поставлений у відповідність деякий невід'ємний ваговий коефіцієнт

ω_m , який відбиває ступінь її важливості при вирішенні питання про

віднесення обмірюваного поточного значення вектора визначеного класу.

З урахуванням введених позначень та понять розглядуваного алгоритму АК полягає в наступному.

1. Вибираються k еталонів X_1^*, \dots, X_k^* та граничне значення d_o функції відстані $d(X_i, X_j)$, визначеної співвідношенням (5.11)

2. Обмірюваному поточному значенню X_i вектора X ставиться відповідність код ε_i із k двійкових чисел (символів), визначених наступним співвідношенням: $\varepsilon_i = (\varepsilon_{i1}, \dots, \varepsilon_{ik})$. При цьому $\varepsilon_{il} = 1$ якщо $d(X_i, X_l^*) \leq d_o$, та $\varepsilon_{il} = 0$ у протилежному випадку.

3. Встановлюється приналежність обмірюваного поточного значення X_i розглядуваного вектора X визначеному кластеру відповідно до його коду ε_i . У залежності від величини граничного значення d_o та обмірюваних поточних значень X_i число таких кластерів може бути від 1 до 2^k .

У результаті аналізу отриманої інформації про поточні значення розглядуваного вектора X у формі відповідної класифікації можливе уточнення вибору еталонів та перехід до наступної ітерації даного алгоритму. Якщо за еталон беруться визначені обмірювані поточні значення розглядуваного вектора X , то як вхідну інформацію для даного алгоритму досить використовувати матрицю взаємних попарних відстаней U відповідності зі способом вибору (визначення) еталонів можливі такі модифікації даного алгоритму АК [100].

$$\{ \rho_{i,j} = d(X_i, X_j) \}.$$

1. Як еталони можуть бути використані k випадково обраних точок у p -мірному векторному просторі X^p .

2. Еталони можуть бути визначені на підставі експертних оцінок або іншої апріорної інформації про типові представники класів.

3. Як еталони можуть бути використані значення векторів, що належать різним класам, але не обов'язково типових у своєму класі.

Розроблена на підставі даного підходу стандартна службова процедура АК використана для управління МК зрошувальної системи.

5.3. Використання нечіткого підходу для реалізації процесів оперативного управління інженерними мережними системами

Проведений аналіз характерних властивостей та особливостей реальних ЛМ як об'єктів управління, що входять до складу ієрархічно організованих ІМС, дозволяє зробити висновок, що вони є нечіткими об'єктами управління, які функціонують у нечіткому середовищі [92, 93]. Тому такі способи реалізації процесів управління ЛМ, які базуються на відомих методах розрахунку потокорозподілів, у більшості випадків є малоефективними [30 - 33, 67].

З урахуванням специфіки реальних ЛМ для управління такими системами розглядуваного класу вважається адекватним підхід, який використовує концептуалізацію та математичний апарат нечітких множин (НМ) [92, 93]. Наприклад, у [63] розроблений нечіткий регулятор (НЛР) рівня води в магістральному каналі (МК) зрошувальної системи.

Смисловий аспект управління МК полягає в наступному. Для випадку стохастичного характеру споживання води з МК зрошувальної системи з боку підключених до нього РМ має місце тенденція до зміни рівня води в розглядуваному МК. Однак для забезпечення припустимих умов функціонування РМ, підключених до розглядуваного МК, необхідна підтримка відносної сталості такого рівня. У цьому зв'язку необхідна реалізація процесу регулювання рівня води в МК [63]. Враховуючи [63], метою такого процесу є надати підтримку визначеного заданого значення рівня води (заданої постанови) у заданому перетині розглядуваного МК. Аналіз реальних МК, який міститься в [63], дозволяє зробити висновок, що вони є нечіткими об'єктами управління, котрі функціонують у нечіткому середовищі.

НЛР, який реалізує процес регулювання рівня води в МК зрошувальної системи, використовує евристичні правила формування рішень. При цьому визначення керуючих дій у розглядуваному НЛР включає наступні чотири основні етапи.

1. Одержання відхилень фізичних величин, які є поточними значеннями вхідних змінних розглядуваного НЛР.

2. Перетворення цих значень до нечіткого вигляду.

3. Визначення нечітких значень вихідних змінних розглядуваного НЛР за допомогою використання композиційних правил виведення.

4. Пошук детермінованих значень вихідних змінних розглядуваного НЛР, необхідних для реалізації керуючих дій об'єкт управління.

Розглянемо реалізацію НЛР рівня води в МК реальної зрошувальної системи.

Відповідно до нечіткого підходу до управління ІМС, для реалізації НЛР будемо використовувати наступні змінні, які формалізують процес управління МК. Зокрема, вважатимемо відомою величину відхилення рівня P , яку визначимо як різницю між поточним значенням рівня та обраним заздалегідь значенням рівня, що відповідає нормі (настановою). Також вважатимемо відомою величину зміни відхилення рівня C , яку визначимо як різницю між поточним відхиленням та відхиленням, отриманим у попередньому вимірі. Величини P і C є вхідними змінними розглядуваного НЛР. Шуканою вважатимемо величину відносного переміщення затвора H , яку визначимо як різницю між поточним та необхідним його положенням. Величина H є вихідною змінною розглядуваного НЛР.

У відповідності зі специфікою розглядуваного процесу управління визначимо роль кожної із введених змінних.

Величина відхилення рівня P є керованою змінною, оскільки вона визначає ступінь досягнення цілі управління об'єктом розглядуваного класу - МК. Величина зміни відхилення рівня C є збурювальною змінною, оскільки характеризує зовнішні дії стосовно МК, які порушують цільову настанову управління цим об'єктом. Зокрема, такими діями можуть бути зміни споживання води в підключеними до розглядуваного МК, зміна режимів функціонування головного водозабору, який здійснює подачу води в розглядуваний МК, зміна метеорологічних чинників, а також виникнення аварійних ситуацій. Величина відносного переміщення затвора H є керуючою величиною, оскільки вона визначає дії, спрямовані на досягнення цільового функціонування об'єктом управління розглядуваного класу. Сутність цих дій полягає в такій зміні надходження води з головного забірної вузла шляхом зміни ступеня відкриття затвора, яка направлена на відносне відновлення рівня води у визначеному перетині відповідно до заданої настанови.

Враховуючи [63, 67, 92, 93], формалізуємо значення введених змінних, які характеризують розглядуваний процес управління МК, за допомогою множини (НМ). Вважатимемо, що значення розглядуваних змінних нормовані, і внаслідок цього відповідні НМ визначені на універсумі $[-1, 1]$. Вважатимемо, що кожна змінна розглядуваного процесу управління може приймати наступні лінгвістичні значення: PB - велике позитивне, PM - середнє позитивне, PS - мале позитивне, PO - близьке до нуля позитивне, NO - близьке до нуля негативне, NS - мале негативне, NM - середнє негативне, NB - велике негативне. На підставі аналізу значень МК як об'єктів управління може бути установлена відповідність між лінгвістичними значеннями змінних процесу управління та серединами інтервалів їхньої зміни.

Вважатимемо, що для позитивних лінгвістичних значень змінних процесу управління така відповідність задана в [79 - 81]. Також вважатимемо, що негативним лінгвістичним значенням відповідають симетричні значення середин інтервалів їхньої зміни.

Враховуючи увагу [63, 67, 92, 93], вважатимемо, що функції належності НМ, які відповідають прийнятим лінгвістичним значенням змінних процесу управління, визначені в [79 - 81]. При цьому передбачається, що величини x у формулах функцій належності представляють нормовані поточні значення вхідних змінних та шукане значення вихідної змінної розглядуваного процесу управління.

Використовуючи НМ, породжувані лінгвістичними значеннями змінних процесу управління, сформулюємо лінгвістичні правила, які формалізують стратегію управління НЛР. Такі правила формуються у вигляді умовних пропозицій, котрі не містять кількісних значень. Така стратегія, заснована на композиційних правилах, є евристичною, оскільки формалізує досвід операторів по управлінню об'єктами розглядуваного класу. Відповідно до [79 - 81] взагалі стратегія управління полягає в тому, щоб вибрати таке шукане значення відносного переміщення затвора H , яке б шляхом зміни подачі води в головний водозабірний вузол в розглядуваний МК компенсувало поточне відхилення рівня P від заданого значення (настанови), та і тенденцію до його зміни, обумовлену поточною величиною зміни відхилення C .

Розглядуваний керуючий алгоритм, реалізований НЛР, складається із сукупності композиційних правил, кожне з яких - це

складне висловлення, формалізоване за допомогою операцій нечіткої логіки [63, 67, 92, 93]. При цьому кожне таке композиційне правило, записане як рядок розглядуваного керуючого алгоритму, виражає відповідність між визначеними лінгвістичними значеннями відомих вхідних змінних P і C та шуканою вихідною змінною H . Така відповідність здійснюється за допомогою реалізації визначеної сукупності операцій нечіткої логіки (зв'язок) І, АБО, НЕ. Зазначені операції інтегруються як пошук \min , \max , а також віднімання від одиниці, виконувани над функціями приналежності відповідних НМ. Також передбачається, що в розглядуваному алгоритмі два або більше композиційних правила з'єднані між собою зв'язкою ІНАКШЕ, що інтерпретується як операція \max [63, 67, 92, 93].

З урахуванням зроблених зауважень керуючий алгоритм реалізований розглядуваним НЛР, має наступний вигляд:

ЯКЩО $P = NB$, ТО (ЯКЩО $C = NE$ (NB АБО NM), ТО $H = PB$);
 ЯКЩО $P = (NB$ АБО NM), ТО (ЯКЩО $C = PS$, ТО $H = PM$);
 ЯКЩО $P = NS$, ТО (ЯКЩО $C = (PS$ АБО NO), ТО $H = PM$);
 ЯКЩО $P = NO$, ТО (ЯКЩО $C = (PB$ АБО PM), ТО $H = PM$);
 ЯКЩО $P = NO$, ТО (ЯКЩО $C = (NB$ АБО NM), ТО $H = NM$);
 ЯКЩО $P = (PO$ АБО NO), ТО (ЯКЩО $C = NO$, ТО $H = NO$);
 ЯКЩО $P = PO$, ТО (ЯКЩО $C = (NB$ АБО NM), ТО $H = PM$);
 ЯКЩО $P = PO$, ТО (ЯКЩО $C = (PB$ АБО PM), ТО $H = NM$);
 ЯКЩО $P = PS$, ТО (ЯКЩО $C = (PS$ АБО NO), ТО $H = NM$);
 ЯКЩО $P = (PB$ АБО PM), ТО (ЯКЩО $C = NS$, ТО $H = NM$);
 ЯКЩО $P = PB$, ТО (ЯКЩО $C = NE$ (NB АБО NM), ТО $H = NB$);
 ЯКЩО $P = NO$, ТО (ЯКЩО $C = PS$, ТО $H = PS$);
 ЯКЩО $P = NO$, ТО (ЯКЩО $C = NS$, ТО $H = NS$);
 ЯКЩО $P = PO$, ТО (ЯКЩО $C = NS$, ТО $H = PS$);
 ЯКЩО $P = PO$, ТО (ЯКЩО $C = PS$, ТО $H = NS$).

Такий алгоритм, записаний у вигляді відповідної програми, використаний для реалізації процесу регулювання рівня води в зрошувальній системі.

5.4. Висновки

1. На підставі використання моделей і методів сучасного кластер-аналізу та функціональних відповідностей зроблено

класифікація ЛМ, які входять до складу ієрархічно організованих об'єктів оперативного управління. Даний підхід послужив основою для алгоритмізації процесів оперативного управління цими об'єктами.

Для одержання робочої інформації про стани ЛМ ієрархічно організованих ІМС використана процедура АК, яка є послідовною реалізацією алгоритму k еталонів. Апробація такої процедури показала ефективність її використання для реалізації процесів управління ЛМ ієрархічно організованих ІМС.

Показано, що реальні ЛМ, котрі входять до складу ієрархічно організованих ІМС, до яких, зокрема, відносяться зрошувальні системи, а також мережні системи сільськогосподарського призначення, є нечіткими об'єктами управління, що функціонують в певному середовищі. Тому для реалізації процесів управління цими системами розглядуваного класу використані моделі та методи теорії нечіткої логіки. Використовуючи зазначений підхід, розроблений НЛР рівня води в зрошувальній системі.

ВИСНОВКИ

На основі досліджень, проведених в даній роботі, виконавці розв'язання наукової проблеми автоматизації технологічних процесів розподілу ЦП шляхом реалізації процесів оперативного управління ієрархічно організованими ІМС з неповною інформацією про об'єкти управління та середовище їхнього функціонування, що має важливе народногосподарське та соціальне значення.

Основні результати, отримані в даній роботі, полягають в наступному.

1. Використовуючи спеціально розроблений комбінаторно-графовий підхід до управління ІМ, формалізовані задачі, пов'язані з визначенням ефективності керуючих дій в ІМ, а також оцінку надійності та керованості для таких об'єктів. Для їхнього розв'язання використані такі відомі задачі мережної оптимізації, як задача про багатополісний найкоротший ланцюг, а також задача про найкоротші шляхи, ефективно реалізовані за допомогою ППМ мережної оптимізації.

2. Для формалізації реальних ІМ як об'єктів управління з урахуванням специфіки їхньої топологічної структури та процесу функціонування використаний ієрархічний кластерний параболічний множинний регресивний аналіз. Такий підхід дозволяє формалізувати задачу управління ІМ як задачу сепарабельного програмування. На підставі зазначеного підходу побудовано ефективний керуючий алгоритм для реальних об'єктів управління розглядуваного класу.

3. На підставі відповідної концептуалізації встановлено ієрархічну організацію реальних ІМС та проаналізовано зміни найважливіших властивостей і особливостей, характерних для окремих ЛМ, в залежності від їхнього рівня ієрархії в ІМС.

4. На підставі спеціально розробленого підходу формалізовано умови, які реалізують принцип координованості ЛЦ і породжують новими ЛЗ для нижчих ЛМ стосовно відповідних ЛЦ та ЛЗ для безпосередньо вищих ЛМ в ієрархічно організованих ІМ. Формалізовано також умови, які реалізують принцип координованості ЛЦ та ЛЗ для ЛМ найнижчого рівня ієрархії стосовно відповідних ЛЦ та ЛЗ для ієрархічно організованих ІМС.

5. Для оптимізації топологічної структури оперативно керованих ІМ даного рівня ієрархії, які входять до складу реальних ІМС, використані такі відомі задачі мережної оптимізації, як задача про найкоротший ланцюг, а також задача про найкоротше дерево, поставлені на мережах можливих варіантів топологічної структури оперативно керованих ЛМ. Ефективність запропонованого підходу обумовлена наявністю машинних програм, які чисельно реалізують зазначені задачі, що входять до ППМ мережної оптимізації.

6. Виходячи з відповідної концептуалізації, постульовані умови, необхідні для реалізації вертикальних взаємозв'язків між окремими системами ієрархічно організованих керуючих систем. На підставі цих умов зроблено можливі підходи до формалізації вертикальних взаємозв'язків та визначені прикладні аспекти запропонованих підходів з урахуванням специфіки реальних керуючих систем розглядуваного класу.

7. На підставі відповідного концептуального підходу формалізовані координуючі дії в системах, які управляють ієрархічно організованими ІМС.

8. З використанням моделей та методів сучасного кластерного і функціональних відповідностей, а також теорії НМ формалізовані локальні процеси оперативного управління окремими ЛМ, що входять до складу ієрархічно організованих ІМС. На підставі цього розроблено ефективні в прикладному аспекті керуючі алгоритми, які реалізують такі процеси.

9. Результати, отримані в даній роботі, знайшли практичне застосування при моделюванні ГСУ та алгоритмізації процесів оперативного управління зрошувальними системами, а також керуваннями системами сільськогосподарського водопостачання. Розроблені моделі, методи та алгоритми, котрі є в даній роботі, використані Інститутом гідротехніки і меліорації УААН (м. Київ), обласним обласним виробничим управлінням меліорації і водного господарства, Обласним державним комунальним підприємством «Львівський канал» при розробці та реалізації керуючих систем і алгоритмів оперативного управління зрошувальними системами, а також керуваннями мережними системами сільськогосподарського водопостачання.

10. Економічний ефект від впровадження матеріалів, розробок та алгоритмів даної роботи був отриманий за рахунок скорочення виробничих витрат ЦП та електроенергії, а також підвищення

надійності та якості функціонування об'єктів управління розглядуваного класу.

11. Концептуальні аспекти, моделі, методи, процедури та алгоритми, що містяться в даній роботі, використані в навчальному процесі при підготовці та читанні курсів, пов'язаних з управлінням зрошувальними системами, а також мережними системами сільськогосподарського водопостачання, у технічних та аграрних університетах для студентів спеціальностей "Механізація сільського господарства" та "Промислове і цивільне будівництво". Вони також можуть бути корисними для викладачів, аспірантів, наукових та інженерно-технічних працівників.

ЛІТЕРАТУРА

1. Абрамов Н.Н. Водоснабжение. - М.: Стройиздат, 1982. - 276 с.
2. Абрамов Н.Н. Надежность систем водоснабжения. - М.: Наука, 1985. - 278 с.
3. Абрамов Н.Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. - М.: Стройиздат, 1972. - 297 с.
4. Александров В.В. Надежность систем дальнего газоснабжения. - М.: Недра, 1976. - 320 с.
5. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. - М.: Недра, 1970. - 216 с.
6. Багров Н.М., Кружилин И.П. Оросительные системы и их эксплуатация. - М.: Агропромиздат, 1988. - 255 с.
7. Баховец Б.А., Ткачук Я.В. Основы автоматики и автоматизация производственных процессов в гидромелиорации. - Львов: Выща шк., 1989. - 336 с.
8. Байсанов Д.Б. Автоматизированные системы управления трубопроводными объектами коммунального хозяйства. - М.: Стройиздат, 1974. - 312 с.
9. Байсанов Д.Б., Быков З.Я. Расчет и проектирование городских газовых сетей среднего и высокого давления. - М.: Стройиздат, 1972. - 270 с.
10. Байсанов Д.Б., Гурвич Г.М. Автоматическое регулирование и управление в городских газовых сетях. - М.: Стройиздат, 1970. - 192 с.
11. Байсанов Д.Б., Чонин А.А. Распределительные системы газоснабжения. - М.: Стройиздат, 1977. - 406 с.
12. Бендат Д., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 540 с.
13. Берж К. Теория графов и её применение: Пер. с фр. - М.: Мир, 1962. - 312 с.
14. Бобровский С.А. Трубопроводный транспорт газа. - М.: Недра, 1976. - 495 с.
15. Бобровский С.А., Яковлев Е.И. Газовые сети и газохранилища. - М.: Недра, 1980. - 413 с.
16. Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. - М.: Стройиздат, 1972. - 552 с.
17. Введение в нелинейное программирование: Пер. с нем. / К.-Х. Эльстер, Р. Рейнгардт, М. Шойбле, Г. Донат / Под ред. И.И. Ерёмкина - М.: Наука, 1985. - 264 с.
18. Вентцель Е.С. Исследование операций. - М.: Сов. радио, 1972. - 552 с.

19. Вильнер Я.М., Ковалев Н.Т., Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. - Минск: Высшая шк., 1976. - 415 с.
20. Водяник П.Ф. Автоматизация управления газоснабжением городов. - К.: Будивельник, 1979. - 136 с.
21. Вольский Э.Л., Константинова И.И. Режим работы магистрального газопровода. - М.: Недра, 1970. - 168 с.
22. Временная методика проектирования оперативного управления водопроводом. - М.: Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, 1977. - 77 с.
23. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ: Пер. с болгарск. - М.: Финансы и статистика, 1987. - 239с.
24. Гарляускас А.И. Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа. - М.: Недра, 1975. - 205 с.
25. Гинзбург Я.Н., Лезнов Б.С. Современные методы регулирования режимов работы систем водоснабжения крупных городов. - М.: Стройиздат, 1972. - 552 с.
26. Гудман С., Хидентиеми С. Введение в разработку и анализ алгоритмов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1981. - 368 с.
27. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Проблемы системологии (проблемы теории сложных систем). - М.: Сов. радио, 1976. - 296 с.
28. Дубовицкий Н.М., Леви Л.И. Поиск и экономическая эффективность рационального распределения ресурсов // Оценка производственного потенциала в хозяйственном механизме АПК: Сб. науч. тр. - Харьков: Изд-во ХСХИ, 1990. - С.80 - 82.
29. Дупляк В.Д. Научно-технический прогресс в орошении. - К.: Урожай, 1989. - 248 с.
30. Евдокимов А.Г. Минимизация функций и её приложения к задачам автоматизированного управления инженерными сетями. - Харьков: Выща шк., Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. - 228 с.
31. Евдокимов А.Г. Оптимальные задачи на инженерных сетях. - Харьков: Выща шк., Изд-во при Харьк. ун-те, 1976. - 153 с.
32. Евдокимов А.Г., Дубровский В.В., Тевяшев А.Д. Потокораспределение в инженерных сетях. - М.: Стройиздат, 1979. - 199 с.
33. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. - Харьков: Выща шк., Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. - 142 с.
34. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия: Пер. с фр. -М.: Финансы и статистика, 1988. - 342 с.
35. Зангвилл У. Нелинейное программирование. Единый подход: Пер. с англ. - М.: Сов. радио, 1973. - 312 с.
36. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М.: Машиностроение, 1975. - 559 с.
37. Информационно-советующая система управления орошением / Остапчик В.П., Костромин В.А., Коваль А.М. и др. / Под ред. Остапчика В.П. - К.: Урожай, 1989. -248 с.
38. Ионин А.А. Газоснабжение. - М.: Стройиздат, 1981. - 415 с.
39. Кавешников Н.Т. Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений. - М.: Агропромиздат, 1989. - 272 с.
40. Караев Р.А., Левин А.А. Сбор и передача информации в АСУ трубопроводами. - М.: Энергия, 1975. - 104 с.
41. Карлин С. Основы теории случайных процессов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1971. - 536 с.
42. Кулик Ю.В. Проектирование систем газоснабжения с учетом качества их функционирования // Наука и техника в городском хозяйстве. - 1990. - №73. - С. 205 - 217.
43. Кулик Ю.В. Оптимизационный подход к проектированию систем газоснабжения // Нефтяная и газовая промышленность. - 1991. - №1. - С.46 - 49.
44. Киенчук А.Ф. Водораспределение на оросительных системах. - К.: Урожай, 1989. - 176 с.
45. Клир Д. Системология. Автоматизация решения системных задач: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1990. - 544 с.
46. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. - М.: Наука, 1981. - 544 с.
47. Краус М., Кучбах Э., Вошни О.Г. Сбор данных в управляющих вычислительных системах: Пер. с нем. - М.: Мир, 1987. - 294 с.
48. Кузьмин И.В., Кедров В.А. Основы теории информации и кодирования. - К.: Выща шк., 1977. - 279 с.
49. Кулик Ю.В. Автоматизированное проектирование и управление режимами работы развивающихся трубопроводных систем: Дис... д-ра техн. наук: 05. 13. 07. - К., 1991. - 331 с.
50. Кулик Ю.В., Михайленко В.М. Цели и критерии управления развивающихся трубопроводных систем // Автоматика. - 1990. - № 4. - С.77 - 80.
51. Кулик Ю.В., Михайленко В.М. К вопросу управления трубопроводными системами в случае стохастической модели потокораспределения // Автоматика. - 1990. - № 5. - С. 81 - 83.
52. Кулик Ю.В., Михайленко В.М. Анализ устойчивости режимов работы активных элементов трубопроводных систем // Автоматика. - 1991. - № 2. - С. 89 - 91.
53. Кулик Ю.В., Михайленко В.М. Гидравлический расчет проектируемых трубопроводных систем в случае вероятностного потокораспределения // Электронное моделирование. - 1991. - № 2. - С. 67 - 71.

54. Леви Л.И. Универсальные локальные задачи в изменяющихся иерархических структурах // АСУ и приборы автоматики. - Харьков: Выща шк., 1988.- Вып. 87. - С.102 - 105.
55. Леви Л.И. Координирующие воздействия в иерархических системах // АСУ и приборы автоматики. - Харьков: Выща шк., 1989. - Вып. 91. - С. 73 - 76.
56. Леви Л.И. Эвристический подход к управлению инженерными сетями // АСУ и приборы автоматики. - Харьков: Выща шк., 1989. - Вып. 92. - С.87 - 90.
57. Леви Л.И. Об одном подходе к оценкам надёжности и управляемости инженерных сетей // АСУ и приборы автоматики. - Харьков: Основа, 1992. - Вып. 97. - С. 44 - 47.
58. Леви Л.И. Координируемость локальных целей функционирования и задач управления в инженерных сетевых системах // АСУ и приборы автоматики. - Харьков: Основа, 1992. - Вып. 98. - С. 36 - 40.
59. Леви Л.И. Об определении эффективности управляющих воздействий в инженерных сетях // АСУ и приборы автоматики. - Харьков: Основа, 1992.- Вып. 98. - С. 56 - 58.
60. Леви Л.И. Координируемость по отношению к глобальной цели функционирования и задаче управления в инженерных сетевых системах// АСУ и приборы автоматики. - Харьков: Основа, 1993. - Вып. 99. - С. 69 - 73.
61. Леви Л.И. Статистические методы в управлении инженерными сетями // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1991.- Вып. 75. - С. 68 - 72.
62. Леви Л.И. Свойства локальных сетей в инженерных сетевых системах // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1992. - Вып. 76. - С.38 - 41.
63. Леви Л.И. Нечёткий логический регулятор уровня воды в магистральном канале оросительной системы // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1992. - Вып. 76. - С. 49 - 52.
64. Леви Л.И. Минимизация объемов оперативной информации о состояниях объектов орошения // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1992. - Вып. 77. - С. 23 - 27.
65. Леви Л.И. Оптимизация проектируемых локальных сетей инженерных сетевых систем // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1993.- Вып. 78. - С. 70 - 72.
66. Леви Л.И. Сбор данных в системах управления орошением // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1993. - Вып. 79. - С. 24 - 27.
67. Леви Л.И. Нечеткий подход к управлению инженерными сетевыми системами // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1993.- Вып. 79. - С.75 - 78.
68. Леви Л.И. Автоматическая классификация в управлении инженерными сетевыми системами // Моделирование и автоматизация технологических процессов сельскохозяйственного производства: Сб. научн. тр. МИИСП. -М.: Изд-во МИИСП, 1991. - С. 39 - 42.
69. Леви Л.И. Реализация локальных процессов управления в инженерных сетевых системах // Автоматика, вычислительная техника и моделирование в сельском хозяйстве: Сб. научн. тр. МГАУ. - М.: Изд-во МГАУ, 1993. - С. 59 - 65.
70. Леви Л.И. Средства и методы реализации процесса сбора данных в системах управления орошением // Автоматика, вычислительная техника и моделирование в сельском хозяйстве: Сб. научн. тр. МГАУ. - М.: Изд-во МГАУ, 1993.- С. 87 - 92.
71. Леви Л.И. Иерархическая декомпозиция и распараллеливание процессов управления инженерными сетевыми системами // Моделирование, автоматика и вычислительная техника в сельском хозяйстве: Сб. научн. тр. МГАУ. - М.: Изд-во МГАУ, 1994. - С. 54 - 57.
72. Леви Л.И. Моделирование координирующих связей в иерархически организованных управляющих системах // Материалы отчётной научно-технической конференции сотрудников ЛСХИ по итогам 1993 года. Часть II. - Луганск: Изд-во ЛСХИ, 1994. - С. 31 - 32.
73. Леви Л.И. Моделирование обратных связей в иерархически организованных управляющих системах // Материалы отчётной научно-технической конференции сотрудников ЛСХИ по итогам 1994 года. - Луганск: Изд-во ЛСХИ, 1995. - С. 33.
74. Леви Л.И. Формализм нечетких множеств в моделировании и алгоритмизации процессов оперативного управления инженерными сетевыми системами // Сб. научн. тр. ЛСХИ. Часть 3. - Луганск: Изд-во ЛСХИ, 1997. - С. 39 - 40.
75. Леви Л.И., Скрипкина А.С. Кластер-анализ и функциональные соответствия в управлении ИСС // Збірник наукових праць Луганського державного аграрного університету. - Луганськ: Вид-во ЛДАУ, 1999. - №4/13. - С. 240 - 243.
76. Леви Л.И., Скрипкина А.С. Декомпозиция управляющих систем с изменяющейся иерархической структурой // Збірник наукових праць Луганського державного аграрного університету. - Луганськ: Вид-во ЛДАУ, 2000. - № 6(16). - С. 57 - 60.
77. Леви Л.И. Комбинаторно-графовый подход к управлению инженерными сетями // Збірник наукових праць Луганського державного аграрного університету. - Луганськ: Вид-во ЛДАУ, 2000. - № 8. - С. 52 - 54.
78. Леви Л.И. Планирование исходных потокораспределений в инженерных сетях // Вісник Східноукр. нац. ун-ту. - 2000. - № 9. - С. 133 - 138.
79. Леви Л.И. Декомпозиция в задачах моделирования процессов оперативного управления иерархически организованными инженерными сетевыми системами: Монография. - Луганск: Изд-во Восточноукр. гос. ун-та, 1996. - 122 с.
80. Леви Л.И. Иерархическая декомпозиция в задачах оперативного управления инженерными сетевыми системами. Дис... д-ра техн. наук: 05.13.07 – Луганск, 1999. – 342 с.

81. Леви Л.И. Оперативное управление инженерными сетевыми системами: Монография. – Луганск: Изд-во Восточноукр. нац. ун-та, 2001. – 176 с.
82. Леви Л.И. Формализация и решение универсальных локальных задач в автоматических системах управления с изменяющейся иерархической структурой // Вісник Східноукр. нац. ун-ту. - 2001. - №3(37). - С. 207 - 211.
83. Макухин А.Г., Малый В.В., Леви Л.И. Об одной задаче автоматизированного проектирования структурно-модульных систем // Ворошиловградский машиностроительный институт. - Ворошиловград, 1987. - 8 с. - Деп. в УкрНИИТИ 12.09.87, №2466 -Ук. 87.
84. Малый В.В., Макухин А.Г., Леви Л.И. Моделирование структурных элементов технических систем модульного типа с унифицированными каналами сопряжения // Ворошиловградский машиностроительный институт. - Ворошиловград, 1988. - 10 с. -Деп. в УкрНИИТИ 22.08.88, №2074-Ук.88.
85. Мангейм М.Л. Иерархические структуры. Модель процессов проектирования и планирования: Пер. с англ. - М.: Мир, 1970. - 180 с.
86. Мандель И.Д. Кластерный анализ. - М.: Финансы и статистика, 1988. - 176 с.
87. Мейдональд Д. Вычислительные алгоритмы в прикладной статистике: Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика, 1988. - 350 с.
88. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем: Пер. с англ. - М.: Мир, 1973. - 344 с.
89. Михайленко В.М. Методы расчета шахтных вентиляционных систем с применением ЭВМ. - К.: Техника, 1974. - 112 с.
90. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. - М.: Наука, 1982. - 286 с.
91. Нейман Д., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение: Пер. с англ. - М.: Наука, 1970. - 708 с.
92. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф. и др. - М.: Наука, 1986. – 312 с.
93. Обработка нечёткой информации в системах принятия решений / Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В. и др. - М.: Радио и связь, 1989. - 304 с.
94. Оре О. Теория графов: Пер. с англ. - М.: Наука, 1980. - 336 с.
95. Островский А.С. Комплексная автоматизация и телемеханизация систем водоснабжения промышленных предприятий. - М.- Л.: Госэнергоиздат, 1961. - 168 с.
96. Палишкин Н.А. Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение. - М.: Агропромиздат, 1990. - 351 с.
97. Панкратов В.С., Дубинский А.В., Сиперштейн Б.И. Информационно-вычислительные системы в диспетчерском управлении газопроводами. - Л.: Недра, 1988. - 246 с.
98. Первозванский А.А., Вайцгорн В.Г. Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. - М.: Наука, 1979. - 342 с.
99. Повх И.Л. Техническая гидродинамика. -Л.: Машиностроение, 1976. - 502 с.
100. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд./ С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин / Под ред. С.А. Айвазяна - М.: Финансы и статистика, 1989. - 607 с.
101. Романенко В.Д. Синтез многомерных регуляторов состояния с компенсацией медленно изменяющихся возмущений при разнотемповой дискретизации // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Техн. кибернетика. -1991. - Вып. 15. - С. 3 - 11.
102. Романенко В.Д., Игнатенко Б.В. Адаптивное управление технологическими процессами на базе микроЭВМ. - К.: Выща шк. - 1990. - 334 с.
103. Сеа Ж. Оптимизация. Теория и алгоритмы: Пер. с фр. - М.: Мир, 1973.-244 с.
104. Сегединов А.А. Инженерное обеспечение города. - М.: Моск. рабочий, 1986.-312 с.
105. Сельскохозяйственные гидротехнические мелиорации / Богушевский А.А., Голованов А.И., Кутергин В.А. и др./ Под ред. Маркова Е.С. - М.: Колос, 1981. - 375 с.
106. Сешу С., Рид М.Б. Линейные графы и электрические цепи: Пер. с англ. -М.: Высш. шк., 1971. - 448с.
107. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление: Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1986. - 496 с.
108. Сироткин В.П. Схемы и расчет водоводов и водопроводных сетей. - М.: Высш. шк., 1968. - 271с.
109. Системы параллельной обработки: Пер. с англ. / Под ред. Ивенса Д. - М.: Мир, 1985. - 416 с.
110. Смирнов В.А, Герчиков С.В. Применение современной вычислительной техники в городском водоснабжении. - М.: Стройиздат, 1970. - 168 с.
111. Сумароков С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. - 167 с.
112. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Расчёты систем транспорта газа с помощью вычислительных машин. - М.: Недра, 1971. - 206 с.
113. Тевяшев А.Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях в условиях неопределённости: Дис. ... д-ра техн. наук: 05. 13. 01. -Харьков, 1984. - 541 с.
114. Темпель Ф.Г. Моделирование газоснабжающих систем. - Л.: Недра, 1986. - 184 с.
115. Торчинский Я.М. Оптимизация проектируемых и эксплуатируемых газораспределительных систем. - Л.: Недра, 1988. - 239 с.

116. Турк В.И., Минаев А.В., Карелин В.Я. Насосы и насосные станции. - М.: Стройиздат, 1977. - 296 с.
117. Ткаченко С.В., Бирючинская З.Н., Кулик Ю.В. Оценка целесообразности строительства ведомственных АЗС // Нефтяная и газовая промышленность. - 1990. - №3. - С. 44 - 45.
118. Усаковский В.М. Водоснабжение в сельском хозяйстве. - М.: Агропромиздат, 1989. - 280 с.
119. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ. / Ким Д.О., Мюллер Ч.У., Клекка У.Р. и др. / Под ред. Енюкова И.С. - М.: Финансы и статистика, 1989. - 215 с.
120. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения: В 2 т. : Пер. с англ. - М.: Мир, 1967. - Т.1. - 498 с.
121. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. - М.: Наука, 1971. - 744 с.
122. Фиакко А., Мак-Кормик Г. Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации: Пер. с англ. - М.: Мир, 1972. - 240 с.
123. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 496 с.
124. Фильчаков П.Ф. Численные и практические методы прикладной математики. -К.: Наукова думка, 1970. - 800 с.
125. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: В 3 т. - М.: Наука, 1970. - Т.1.- 800 с.
126. Форд Л.Р., Фалкерсон Д. Потоки в сетях: Пер. с англ. - М.: Мир, 1966. -276 с.
127. Фритч В. Применение микропроцессоров в системах управления: Пер. с нем. - М.: Мир, 1984.- 464 с.
128. Фрэнк Г., Фриш И. Сети, связь и потоки: Пер. с англ. - М.: Связь, 1978. -448 с.
129. Харари Ф. Теория графов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1973.- 300 с.
130. Цой С. Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. - Алма-Ата: Наука, 1975.- 335 с.
131. Цой С., Рогов Е.И. Основы теории вентиляционных систем. - Алма-Ата: Наука, 1976. - 283 с.
132. Чапковский В.Л. Автоматика в системах водоснабжения и канализации. - М.: Стройиздат, 1965. - 60 с.
133. Чернышев М.К., Гаджиев М.Ю. Математическое моделирование иерархических систем с приложениями к биологии и экономике. - М.: Наука, 1983. - 192 с.
134. Шарадкин А.М., Молчанов А.А. Дискретизация информационных сигналов. - К.: Выща шк., 1991. - 186 с.
135. Шварц Л. Анализ: В 2 т.: Пер. с фр. - М.: Мир, 1972. - Т.1. - 824 с.
136. Шумаков Б.Б., Губанков Л.Н., Леви Л.И. Об иерархической организации оросительных систем // Доклады ВАСХНИЛ.- 1983. - №11. - С. 34 - 35.
137. Шумаков Б.Б., Губанков Л.Н., Леви Л.И. Оптимальное проектирование магистральных каналов оросительных систем // Доклады ВАСХНИЛ. -1988. - №2. - С. 41- 43.
138. Шумаков Б.Б., Губанков Л.Н., Леви Л.И. Система параметров для оценки алгоритмов, управляющих оросительными системами // Вестник сельскохозяйственной науки. - 1985. - №11.- С. 131 - 132.
139. Эдвардс Р. Функциональный анализ. Теория и приложения: Пер. с англ. - М.: Мир, 1969. - 1071 с.
140. Bennington G.E. An Efficient Minimal Cost Flow Algorithm // Management Science. - 1973.- Vol. 19. - P. 1042 - 1051.
141. Bennington G.E. Applying Network Analysis // Journal of Industrial Engineering. - 1974.- Vol. 6. - P. 17 - 25.
142. Edmonds J., Karp R.M. Theoretical Improvements in algorithmic Efficiency for Network Flow Problems // Journal of the Association of Computing Machinery. - 1972. - Vol. 19. - P. 248 - 264.
143. Haykin S. Neural Network. A Comprehensive Foundation. - New York: Macmillan College Publishing Company, 1994. - 691 p.
144. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence. - London: Bradford book edition, 1994 - 211 p.
145. Maurras J.F. Optimisation of the Flow through Networks with Gains // Mathematical Programming. - 1972. - Vol. 3. -P. 135 - 144.
146. Narendra K.S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical system using neural networks // IEEE Trans. on Neur. Net. - 1990. - Vol. 1. N 1. - P. 4 - 27.
147. Schaffer J.D., Whitley D., Eshelman L.J. Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks: A Survey of the State of the Art // In: Procs. Of the Int. Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks (Eds. L.D. Whitley, J.D. Schaffer). - Baltimore, Maryland, 1992. - P. 1 - 37.
148. Shier D.A. Iterative Methods for Determining the K Shortest Paths in a Network // Networks. - 1976. - Vol. 6. - P. 205 - 230.
149. Park J., Sandberg I.W. Universal approximation using radial basis function networks // Neural Computation. - 1991. - Vol. 3. - P. 246 - 257.
150. Truemper K. An Efficient Scaling Procedure for Gains Networks // Networks. - 1976. - Vol. 6. - P. 151 - 160.
151. Zadeh N. A Bad Network Problem for the Simplex Method and Other Minimum Cost Flow Algorithms // Mathematical Programming. - 1973. -Vol. 5. - P. 255 - 266.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	3
ВСТУП	5
Розділ 1	
АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ТА КЕРОВНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ	14
1.1. Комбінаторно-графовий підхід до оперативного управління інженерними мережами	14
1.2. Методика оцінювання ефективності керуючих дій на інженерні мережі	18
1.3. Методика оцінювання надійності та керовності інженерних мереж	22
1.4. Статистичний підхід до оперативного управління інженерними мережами	25
1.5. Висновки	30
Розділ 2	
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖНИХ СИСТЕМ ЯК ІЄРАРХІЧНО ОРГАНІЗОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ	31
2.1. Концептуальна модель ієрархічної організації інженерних мережних систем	31
2.2. Оптимізація трасування магістральних каналів оперативно керованих зрошувальних систем	35
2.3. Оптимізація топологічної структури розподільних мереж оперативно керованих систем сільськогосподарського водопостачання	37
2.4. Висновки	40
Розділ 3	
КООРДИНОВНІСТЬ В ІЄРАРХІЧНО ОРГАНІЗОВАНИХ ОПЕРАТИВНО КЕРОВАНИХ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖНИХ СИСТЕМАХ	41
3.1. Ієрархічна декомпозиція топологічної структури інженерних мережних систем	41

3.2. Координовність локальних цілей функціонування та локальних задач оперативного управління в багаторівневих інженерних мережних системах	44
3.3. Координовність локальних цілей та локальних задач стосовно глобальної цілі та глобальної задачі в багаторівневих інженерних мережних системах	48
3.4. Висновки	51

Розділ 4

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ІЄРАРХІЧНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ІНЖЕНЕРНИМИ МЕРЕЖНИМИ СИСТЕМАМИ	53
4.1. Формалізація координуючих зв'язків в ієрархічно організованих керуючих системах	53
4.2. Формалізація зворотних зв'язків в ієрархічно організованих керуючих системах	56
4.3. Формалізація координуючих дій в ієрархічно організованих керуючих системах	60
4.4. Висновки	64

Розділ 5

РЕАЛІЗАЦІЯ ЛОКАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ В ІЄРАРХІЧНО ОРГАНІЗОВАНИХ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖНИХ СИСТЕМАХ	66
5.1. Кластер-аналіз та функціональні відповідності як реалізаційна основа процесів оперативного управління інженерними мережними системами	66
5.2. Методи автоматичної класифікації при реалізації процесів оперативного управління інженерними мережними системами	70
5.3. Використання нечіткого підходу для реалізації процесів оперативного управління інженерними мережними системами	73
5.4. Висновки	76
ВИСНОВКИ	78
ЛІТЕРАТУРА	81
Зміст	90

Навчальне видання

ЛСВІ Леонід Ісаакович

**ОПЕРАТИВНЕ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ
ТА ЗРОШУВАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ**

Редактор *З.І. Андрінова*
Техн. редактор *Т.М. Дроговоз*
Оригінал-макет *Т.В. Погорєлова*

Підписано до друку 12.11.2001.
Формат 60x84¹/₁₆. Папір типогр. Гарнітура Arial.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 5,4. Обл. вид. арк. 6,1.
Тираж 1000 екз. Вид. № 563. Замов. № Ціна договірна.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а

Адреса редакції: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а
Телефон: 8 (0642) 46-13-04. Факс: 8 (0642) 46-13-64.
E-mail: uni@vugu.lugansk.ua
<http://vugu.lugansk.ua>