

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____ Дідик О.К.

«__» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Інформаційне та програмне забезпечення системи
підтримки прийняття рішень транспортними потоками в
умовах комбінованої невизначеності»**

**«Information and software support system for decision-making
on transport flows in conditions of combined uncertainty»**

Виконав здобувач вищої освіти ІІ курсу групи
АК-24М

174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»

_____ Єнев Б.В.

«__» _____ 2025 р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

_____ Мірошніченко М.С.

«__» _____ 2025 р.

Рецензент

_____ 2025 р.

м. Кропивницький 2025

ЗМІСТ

Вступ

1 Аналіз методів прийняття рішень при управлінні розподіленими динамічними системами

1.1. Аналіз проблем керування розподіленими системами

1.2. Аналіз підходів до керування в умовах комбінованої невизначеності

2 Моделі рішень в розподілених динамічних системах

2.1. Розробка структури моделі прийняття рішень при управлінні розподіленою динамічною системою

2.2. Розробка моделі розподіленої системи

2.3. Удосконалення моделі динаміки розподіленої динамічної системи при керуванні рішеннями

3 Практична реалізація інформаційної технології прийняття рішень

3.1. Програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень керування розподіленою динамічною системою

3.2. Прийняття рішень при керуванні транспортними потоками міста

4 Прийняття рішень при керуванні елеваторами

4.1. Структурна схема системи управління елеватором

4.2. Модель прийняття рішення в управлінні елеватором

4.3. Реалізація прийняття рішення в управлінні елеватором

4.4. Дослідження ефективності інформаційної технології

Висновки

Літера тура

Додатки

Додаток А

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку цифрових технологій особливої актуальності набуває створення та впровадження інформаційних систем керування складними розподіленими об'єктами. До таких об'єктів належать системи теплопостачання, транспортна інфраструктура, а також технологічні процеси виробництва, зберігання та транспортування продукції. Незважаючи на те, що потреба в ефективному керуванні цими системами виникла давно, лише сучасний рівень розвитку інформаційних технологій, обчислювальних засобів і телекомунікацій дозволив реалізувати складні алгоритми управління в реальному часі.

Однією з найважливіших проблем керування розподіленими динамічними системами є розробка адекватних моделей прийняття рішень, здатних забезпечити високу точність, надійність і своєчасність управлінських рішень за умов неповної інформації, невизначеності параметрів та змінної динаміки керованих процесів. Це зумовлює необхідність застосування сучасних методів математичного моделювання, інтелектуального аналізу даних та адаптивних алгоритмів керування.

Однією з перших спроб формалізованого опису процесів у розподілених системах стала теорія ієрархічних систем, засновником якої вважається М. Д. Месарович. У межах цього підходу складні системи розглядаються як багаторівневі структури з чітко визначеними взаємозв'язками між рівнями управління. Базові положення теорії ієрархічних систем були розвинені та поглиблені в подальших наукових дослідженнях, що дозволило застосовувати їх для аналізу та синтезу складних керованих об'єктів.

Іншим поширеним підходом до моделювання розподілених систем є теорія ігор, у межах якої окремі елементи системи розглядаються як незалежні гравці з власними цілями та стратегіями поведінки. Основною задачею такого підходу є пошук точки рівноваги, яка за можливості забезпечує компромісне задоволення інтересів усіх учасників системи. Окремі положення теорії ігор знайшли подальший розвиток у теорії активних систем, що розробляється вченими Інституту проблем управління імені В. А. Трапезнікова, зокрема В. М. Бурковим, Д. О. Но-

віковим, та іншими дослідниками. Основна ідея цього підходу полягає в класифікації елементів системи за рівнями ієрархії та узгодженні їх локальних інтересів відповідно до глобального критерію управління.

Безперервний розвиток методів прийняття рішень зумовлений появою нових задач, що виникають у різних галузях науки й техніки. Так, потреби розпізнавання сигналів та образів стали підґрунтям для формування теорії статистичних рішень. Значний внесок у розвиток цього напрямку зробили українські вчені Т. К. Вінчук І. В. Кузьмін та М. І. Шлезингер, результати робіт яких заклали теоретичну основу для створення сучасних методів аналізу інформації та прийняття рішень в умовах невизначеності.

Значний внесок у розвиток теорії та методів прийняття рішень зробили зарубіжні та вітчизняні вчені, зокрема Д. Белл, Р. Беллман, Р. Кіні, О. І. Ларічев, В. В. Подіновський. В Україні дослідження у сфері прийняття рішень активно проводять Ю. П. Зайченко, В. І. Іваненко, В. М. Кунцевич, А. П. Ладанюк, С. В. Юхимчук та інші науковці. Їхні праці заклали теоретичні та методологічні основи сучасних підходів до підтримки прийняття рішень у складних системах.

Разом із тим, попри суттєві досягнення теорії прийняття рішень, застосування її методів у розподілених динамічних системах часто не забезпечує необхідної якості управлінських рішень. Це зумовлено тим, що більшість сучасних підходів орієнтована переважно на задачі прийняття рішень в організаційних та соціально-економічних системах. На відміну від них, технічні розподілені системи характеризуються високою динамічністю процесів, необхідністю обробки різномірної інформації, а також принциповою неможливістю повного спостереження всіх істотних параметрів у реальному масштабі часу.

Зазначені особливості зумовлюють актуальність даної роботи, яка спрямована на розробку та дослідження ефективної інформаційної технології прийняття рішень у розподілених динамічних системах з урахуванням невизначеності, обмеженості інформації та змінної динаміки керованих процесів.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ УПРАВЛІННІ РОЗПОДІЛЕНИМИ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Процес прийняття рішень у розподілених динамічних системах характеризується низкою специфічних особливостей, серед яких ключовими є необхідність урахування взаємодії між окремими елементами системи, наявність невизначеності щодо частини її параметрів, а також потреба в узгодженні локальних рішень відповідно до загальної мети функціонування. На сьогодні розроблено значну кількість методів прийняття рішень для складних систем, однак застосування кожного з них має як певні переваги, так і обмеження. У зв'язку з цим виникає необхідність комплексного аналізу та порівняльної оцінки методів прийняття рішень, що використовуються в розподілених динамічних системах, з метою визначення найбільш ефективних підходів для практичного застосування.

1.1 Аналіз проблем керування розподіленими системами

Розглянемо основні характеристики розподілених динамічних систем та проблеми, пов'язані з управлінням такими системами.

1.1.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження. Об'єктом дослідження даної роботи є процес прийняття рішень в управлінні розподіленими динамічними системами.

Розподілені системи являють собою широкий клас складних систем, елементи яких просторово рознесені та виконують окремі функції, сукупність яких спрямована на досягнення спільної мети функціонування всієї системи. Такий підхід дозволяє ефективно описувати та аналізувати системи з великою кількістю взаємопов'язаних компонентів.

Серед різноманіття розподілених систем доцільно виокремити два основні класи:

- системи з розподіленими параметрами;
- системи із зосередженими параметрами.

Системи з розподіленими параметрами можуть бути подані у вигляді сукупності агрегатів, кожен з яких описується тими самими параметрами, що й система в цілому. При цьому кожен агрегат, у свою чергу, може бути поділений на менші елементи, що дозволяє здійснювати багаторівневе моделювання. Перехід у моделюванні таких систем до граничного рівня подрібнення приводить до побудови математичних моделей у вигляді диференціальних рівнянь у частинних похідних.

На відміну від них, системи із зосередженими параметрами складаються з агрегатів, які або не підлягають подальшому поділу, або характеризуються параметрами та законами функціонування, відмінними від параметрів системи в цілому. У практичних задачах також зустрічаються комбіновані системи, в яких окремі агрегати можуть розглядатися як підсистеми з розподіленими параметрами, тоді як інші — як підсистеми із зосередженими параметрами.

Зазначена класифікація є важливою з точки зору вибору адекватних методів математичного моделювання та подальшого аналізу динаміки розподілених систем.

У даній роботі основну увагу зосереджено на дослідженні проблеми прийняття рішень у лінійних динамічних розподілених системах із зосередженими параметрами. Такі системи характеризуються низкою специфічних особливостей, які суттєво ускладнюють процес управління.

До основних характеристик систем цього класу належать:

- наявність у окремих елементів системи власних критеріїв прийняття рішень;
- затримки під час передавання інформаційних та керуючих впливів між елементами системи;
- невизначеність параметрів системи, яка може бути описана різними підходами залежно від способу отримання інформації, зокрема шляхом вимірювань або експертних оцінок;

– ієрархічна структура, що зумовлює багаторівневий характер процесу управління.

До розподілених динамічних систем такого типу належать мережі газо-, водо- та теплопостачання, транспортні мережі, а також технологічні процеси зберігання продукції та інші подібні об'єкти.

Урахування зазначених особливостей свідчить про високу складність процесу прийняття рішень у керуванні розподіленими динамічними системами та обумовлює необхідність розробки спеціалізованих методів і інформаційних технологій підтримки прийняття рішень.

Перші системні та концептуально важливі результати у дослідженні розподілених систем були отримані в працях М. Д. Месаровича та його наукової школи [7]. У цих роботах було запропоновано універсальний математичний інструментарій для опису складних багатокomпонентних систем, а також розроблено підходи до формалізації їх структури й організації взаємодії між окремими підсистемами. Водночас орієнтація зазначених досліджень на загальні закономірності функціонування систем зумовила недостатню увагу до окремих практично важливих аспектів, зокрема до врахування невизначеності, притаманної реальним процесам, і до аналізу змінних впливів між елементами системи.

Альтернативним напрямом у задачах прийняття рішень для розподілених систем є використання апарату теорії ігор [3], у межах якого кожна підсистема розглядається як автономний учасник із власним набором можливих стратегій. Результат прийняття рішень у цьому випадку визначається сукупністю обраних стратегій або ймовірностями їх реалізації, а основною метою є досягнення певного стану рівноваги. Однак практичне застосування ігрових моделей у розподілених динамічних системах є обмеженим через складність формального опису часової еволюції системи, наявність затримок та змінність умов її функціонування.

Подальший розвиток підходів до моделювання складних систем пов'язаний із формуванням теорії активних систем, у якій система подається як сукупність взаємодіючих агентів, впорядкованих за ієрархічним принципом [6]. Цей підхід отримав широке застосування в управлінні соціально-економічними об'єктами,

такими як організаційні структури, проектні системи та адміністративні утворення. Водночас перенесення ідей теорії активних систем на технічні об'єкти керування ускладнюється необхідністю детальної формалізації взаємодії між елементами, що суттєво обмежує можливості її використання в задачах прийняття рішень у розподілених динамічних системах.

Отже, аналіз існуючих підходів свідчить про те, що проблема прийняття рішень у процесі управління розподіленими динамічними системами залишається відкритою та актуальною. Це обумовлює необхідність розробки нової або вдосконаленої інформаційної технології прийняття рішень, орієнтованої на роботу в умовах невизначеності, динамічної зміни параметрів і складної взаємодії між компонентами системи.

1.1.2. Прийняття рішень при управлінні транспортними потоками міста. Характерним прикладом РДС є транспортна мережа міста.

Транспортний потік доцільно розглядати як сукупність транспортних засобів, що здійснюють рух у межах двовимірної транспортної мережі. За своєю природою він має спільні риси з іншими поточковими процесами, зокрема з інформаційними потоками, а також потоками рідин і газів. Водночас транспортний потік характеризується низкою специфічних властивостей, які суттєво відрізняють його від інших типів потоків і повинні враховуватися під час проектування систем керування дорожнім рухом.

У роботі [8] виділено такі характерні особливості транспортного потоку:

- змінність у часі, що проявляється у добових, тижневих та сезонних коливаннях інтенсивності руху;
- значна залежність процесу руху транспортних засобів від зовнішніх чинників, до яких належать технічний стан дорожнього покриття, метеорологічні умови, дорожньо-транспортні пригоди та інші непередбачувані події;
- обмежені можливості безпосереднього управління транспортним потоком, зумовлені людським фактором, оскільки водії не завжди дотримуються керуючих впливів, що унеможлиблює реалізацію повністю оптимальних режимів управлін-

ня;

- наявність множини цілей управління, що приводить до формулювання задач багатокритеріальної оптимізації;

- практична неможливість проведення повномасштабних експериментальних досліджень у реальних умовах через загрозу безпеці учасників дорожнього руху та значні матеріальні витрати.

Окрім наведених особливостей, процес керування транспортним потоком відбувається в умовах суттєвої невизначеності, основними джерелами якої є:

- мінливість інтенсивності руху на окремих ділянках транспортної мережі;
- невизначеність часових затримок між подіями, що виникають у транспортній системі.

Таким чином, попри наявність спільних характеристик із іншими потоковими процесами, транспортний потік має принципові відмінності, які необхідно враховувати при розробці та впровадженні ефективних систем керування дорожнім рухом.

Сучасні системи контролю транспортних потоків використовують різноманітні джерела інформації, зокрема сенсорні лічильники, відеоспостереження та експертні оцінки [5]. Такі системи управління умовно можна поділити на дві основні групи.

До першої групи належать системи, які оперують статистичними даними. У цих системах інформація подається у вигляді законів розподілу ймовірностей або усереднених характеристик транспортних потоків.

Другу групу складають системи, що базуються на нечітких даних. У таких випадках прийняття рішень здійснюється на основі методів нечіткого логічного висновку [4], що дозволяє враховувати невизначеність і неповноту інформації.

У процесі керування транспортним потоком необхідно приймати рішення різного рівня:

- щодо зміни пропускної здатності на окремому перехресті;
- щодо координації та управління на рівні групи перехресть;
- щодо регулювання пропускної здатності групи перехресть у певному на-

прямку;

– щодо коригування параметрів роботи всієї транспортної мережі, наприклад зміни кількості транспортних засобів на окремих ділянках.

Розподілений характер транспортної системи потребує одночасного керування в різних точках мережі, що інколи призводить до конфліктів між критеріями прийняття рішень на окремих перехрестях. Наслідком таких конфліктів може бути погіршення умов руху та утворення заторів [3].

Особливістю системи керування транспортною мережею є різниця у структурі управління перехрестями та групами перехресть [7]. Це пояснюється змінністю транспортного потоку та економічною доцільністю застосування певних методів контролю. На ділянках із різкими коливаннями інтенсивності руху доцільно здійснювати вимірювання через певні часові інтервали, використовуючи сенсори руху та канали передачі даних. Натомість для ділянок зі стабільним рухом можна застосовувати стохастичні або експертні оцінки.

До основних характеристик транспортного потоку відносяться середня швидкість руху, інтенсивність потоку та його щільність [8].

Інтенсивність руху показує кількість ТЗ, які проходять через будь-яку точку дороги за одиницю часу t . Щільність потоку – це кількість автомобілів, що знаходяться на одиниці довжини шляху в будь-який момент часу t .

Якщо всі автомобілі мають однакові швидкості, то

$$\lambda = q \cdot V. \quad (1.1)$$

Лінійна залежність між основними характеристиками потоку може бути описана наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \lambda &= q_0 \cdot V \cdot \left(1 - \frac{V}{V_0}\right); \\ \lambda &= V_0 \cdot q \cdot \left(1 - \frac{q}{q_0}\right), \end{aligned} \quad (1.2)$$

де q_0 – максимальна щільність потоку; V_0 – швидкість при $q = 0$.

Інші види залежності можуть бути отримані шляхом підстановки (1.1) в наступне рівняння:

$$V = V_0 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{q}{q_0} \right)^{(n+1)/2} \right\}, \quad \text{при } n \geq 0. \quad (1.3)$$

Залежність між інтенсивністю та щільністю потоку називається транспортною діаграмою. В роботі [8] розглянуті різні способи отримання цієї залежності, їх результати наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Види залежності між щільністю та інтенсивністю ТП

Рівняння	Метод отримання	Позначення
$\lambda = C \cdot (1 - q/q_c)$	Закон слідування	
$\lambda = C \cdot \log(q_c/q)$	Гідродинамічна аналогія	C – оптимальна швидкість
$\lambda = m_0 \cdot k \cdot e^{-C \cdot q}$	Закон слідування	C – оптимальний проміжок часу між двома сусідніми ТЗ
$\lambda = \frac{A \cdot q \cdot (q_0 - q)}{B \cdot q_0 + C \cdot q}$	Статистичний	$A = B \cdot m_0$
$\lambda = q \cdot m_0 \cdot (1 - q/q_c)$	Дослідний	
$\lambda = \frac{q \cdot m_0 \cdot (q_0 - q)^{1/2}}{A \cdot m_0 \cdot q^2 + (q_0 - q)^{1/2}}$	Дослідний	

Примітка: у таблиці A, B, C – деякі сталі; m_0 – коефіцієнт нормування швидкості.

У теорії транспортних потоків виділяють два основні підходи до керування [8]: комплексне управління транспортною мережею та автономне управління окремим перехрестям. Автономне керування доцільне у випадках, коли транспортний потік на конкретному перехресті практично не залежить від стану суміжних ділянок мережі. Такі умови виникають, коли відстані між перехрестями значні або швидкість руху транспортних засобів відносно мала.

Якщо ж стан руху на одному перехресті суттєво впливає на сусідні, застосовують синхронізоване управління світлофорами для координації транспортних потоків. Класифікація основних методів керування транспортними потоками представлена на рисунку



Рис. 1.1. Класифікація методів керування транспортними потоками

Очевидно, що управління транспортною мережею в цілому дозволяє досягти кращих значень критеріїв ефективності, таких як загальний час руху транспортних засобів, витрати палива та інші показники. Головним недоліком цього підходу є складність контролю параметрів усіх транспортних потоків мережі у відведений для прийняття рішення час. Водночас застосування методів прогнозування та оцінки дозволяє отримати необхідні характеристики транспортного потоку та скоротити витрати на технічні засоби вимірювання.

Особливу перспективу представляють методи управління транспортними потоками, що враховують величину взаємного впливу між потоками та визначають затримки при передачі інформації. Такі підходи дозволяють підвищити точність прийнятих рішень та покращити загальну ефективність системи.

Отже, зважаючи на розподілений характер системи, наявність множини критеріїв керування та високу динамічність транспортного потоку, постає задача прийняття рішень в умовах комбінованої невизначеності. Її розв'язання вимагає розробки методів прийняття рішень у системах керування транспортними потоками, які базуються на управлінні всією мережею, враховують динаміку процесів, невизначеність вхідних даних та використовують як миттєві, так і усереднені значення довжини черг на перехрестях.

1.1.3. Прийняття рішень при управлінні елеватором.

Ще одним прикладом розподіленої динамічної системи є силосний елеватор для зберігання зернових культур [5].

Елеватор складається з комплексу силосів, з'єднаних системою транспортних механізмів для переміщення зерна, та включає установки для сушіння, зволоження і зважування. Основні технологічні процеси зберігання зерна включають сушіння, активне вентилявання, видалення домішок, знезараження та хімічне консервування [4].

Розподілений характер елеватора проявляється у взаємодії численних агрегатів, що функціонують одночасно, та в необхідності координації технологічних процесів для забезпечення ефективного зберігання та перерозподілу зерна між силосами.

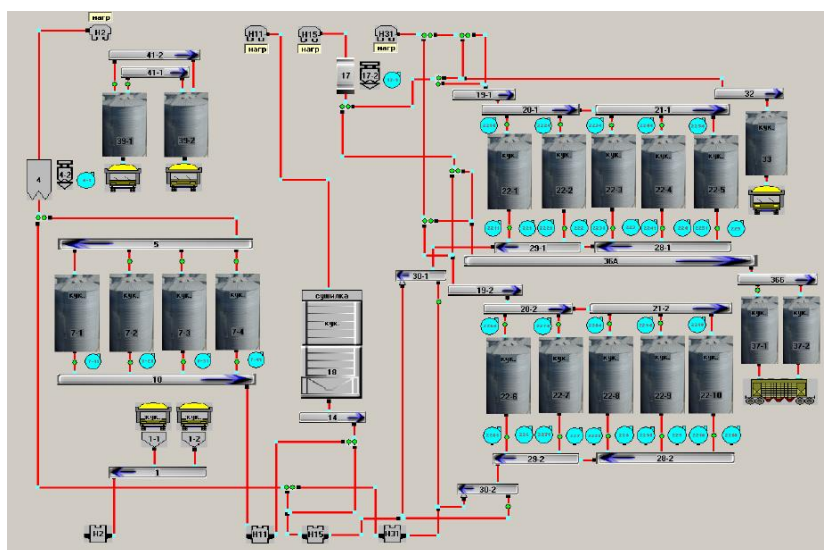


Рис. 1.2. Схема елеватора

Під час зберігання зерно піддається дії фізичних та біологічних процесів, серед яких особливу важливість має самонагрівання – локальне підвищення температури в окремих ділянках силосу. Контроль та своєчасне усунення цього явища є ключовим завданням для підтримання якості зерна.

Залежно від конструкції силосу для охолодження зернової маси застосовують два основні підходи: вентиляцію силосу або пересипання зерна в інший силос, що забезпечує його перемішування і сушіння. Окрім самонагрівання, на якість зерна впливають й інші фактори, взаємозв'язок яких наведено на рис. 1.3.

У різних режимах зберігання зерно може перебувати у сухому стані, охолодженому або при обмеженому доступі повітря.

Система керування елеватором приймає рішення з таких можливих дій:

- пересипати зерно;
- увімкнути систему кондиціонування;
- не втручатися у процес зберігання.



Рис. 1.3. Характеристики зернової маси

Рішення керування зерновим елеватором мають динамічний характер, оскільки параметри зернової маси змінюються протягом виконання обраної дії. Залежність змін параметрів від конкретного рішення проявляється по-різному: у випадку кондиціонування ключовими параметрами є тривалість процесу та об'єм повітря, що подається в силос за одиницю часу; при пересипанні – маршрут транспортування зерна, оскільки від шляху переміщення визначається час його взаємодії з повітрям.

Найявні автоматизовані системи управління на українських елеваторах, як правило, контролюють лише температуру зернової маси, і тому прийняття управлінських рішень здійснюється переважно на основі цього одного показника [5]. Водночас інтеграція даних про інші фактори та динаміку змін під час транспортування зерна могла б підвищити точність рішень та ефективність використання ресурсів елеватора.

Таким чином, складна структура елеваторного комплексу та вплив багатьох взаємопов'язаних факторів на процес зберігання зерна підкреслюють необхідність розробки спеціалізованих моделей і алгоритмів прийняття рішень для підтримки заданих параметрів якості та безпеки зберігання.

1.1. Аналіз підходів до керування в умовах комбінованої невизначеності

Сучасні методи опису функціонування складних систем все частіше спираються на використання даних різної природи. Зазвичай результати спостережень та вимірювань випадкових величин доповнюються експертними оцінками. Оскільки відсутні загальноприйняті стандарти обробки таких комбінованих даних, підходи до врахування комбінованої невизначеності можуть суттєво відрізнитися [1, 3].

1.2.1. Методи прогнозування в умовах комбінованої невизначеності.

Одним із важливих завдань прийняття рішень у розподілених динамічних системах є прогнозування за обмеженою кількістю часових спостережень. Більшість методів розв'язання цієї задачі ґрунтується на розширенні інформації про об'єкт прогнозування шляхом залучення експертних оцінок. Зокрема, у [5] запро-

поновано підхід, який передбачає формування додаткових обмежень на основі експертної інформації та подальше розв'язання задачі математичного програмування.

Процедура прогнозування у цьому підході включає кілька послідовних етапів. На першому етапі здійснюється вибір класу моделей, що адекватно описують динаміку об'єкта прогнозування. Для прогнозування тренду використовується модель, що описується формулою

$$F(t; \Theta) = \Theta^T \varphi(t), \quad (1.4)$$

де Θ – вектор параметрів моделі;

$\varphi(t)$ – вектор-функція, компонентами якої є задані функції часу.

Наступним етапом є формування набору обмежень на основі експертних оцінок. Передбачається, що експерти можуть визначати мінімальні та максимальні значення прогнозованої послідовності, її характер змін та інші властивості. За результатами опитування формується система обмежень, переважно лінійних, які накладаються на прогнозовані величини. Останній етап полягає у знаходженні вектора параметрів моделі Θ , що мінімізують вираз

$$J(\Theta) = \sum \Phi(y_t - \Theta^T \varphi(t)), \quad (1.5)$$

де $J(\Theta)$ – функціонал оцінки близькості моделі і результатів спостереження;

Φ – строго опукла функція; – результат спостереження.

Особливістю розглянутого методу прогнозування є те, що під час розв'язання задачі оптимізації пріоритет надається дотриманню встановлених обмежень, тоді як відповідність отриманих результатів спостереженням враховується вторинно.

Ще одним підходом до прогнозування коротких часових послідовностей є метод аналогів [7], який передбачає використання додаткової інформації про схожі об'єкти прогнозування. Суть методу полягає у визначенні експертами класу об'єктів, що мають спільні властивості з прогнозованим об'єктом. Обрані об'єкти-аналоги подаються у вигляді послідовностей або їх відрізків достатньої довжини. Кожен об'єкт-аналог характеризується двома показниками: коефіцієнтом схожос-

ті та коефіцієнтом масштабу. Якщо експерт не вказав конкретні значення цих коефіцієнтів, їм надається стандартне значення, рівне одиниці.

Після визначення об'єктів-аналогів та їх характеристик значення величини, що прогнозується, в момент часу t визначається за формулою

$$\hat{y}(t) = \frac{1}{L} \sum_k \alpha_k l_k s_k x_k(t), \quad (1.6)$$

де $L = \sum_k l_k$; α_k – ваговий коефіцієнт; l_k – коефіцієнт схожості k -го аналога; s_k – коефіцієнт масштабу k -го аналога; $x_k(t)$ – значення k -го об'єкта-аналога в момент часу t .

За наявності інформації про об'єкт прогнозування y , значення коефіцієнтів α_k визначається шляхом мінімізації виразу

$$\sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{L} \sum_k \alpha_k l_k s_k x_k(t) \right)^2, \quad (1.7)$$

де N – кількість спостережень величини y .

У випадку відсутності будь-яких значень величини y усі коефіцієнти α_k приймаються рівними одиниці.

Оскільки метод аналогів базується на використанні експертних знань, він передбачає процедуру оцінки та уточнення вибраного класу об'єктів-аналогів. Суть цієї процедури полягає у кластеризації об'єктів-аналогів та визначенні центрів відповідних кластерів.

Таким чином, метод аналогів дає змогу отримати додаткову інформацію про прогнозований об'єкт шляхом виявлення схожих об'єктів. Водночас він має певні обмеження: метод не дозволяє прогнозувати унікальні об'єкти та вимагає коригування параметрів класу об'єктів-аналогів для підвищення точності прогнозу.

1.2.2. Метод узагальнюючих функцій. В РДС з комбінованою нечіткою і стохастичною невизначеністю прийняття для рішень можна використати систему узагальнюючих функцій [5].

Формальна система узагальнюючих функцій (СУФ) складається з наступних елементів:

- Алфавіт, що включає позначення констант, змінних, узагальнюючих функцій, операцій та операторів;
- Правила побудови формул, які застосовуються у просторі невизначених даних та у просторі узагальнюючих функцій;
- Правила переходу між формальними системами чисел, випадкових величин та нечітких чисел до системи G і навпаки, які включають правила узагальнення даних та правил узагальнення формул;
- Система аксіом;
- Правила виводу.

Константи – це тип даних із постійним значенням, яке може бути визначеним або невизначеним. Визначені константи мають конкретне числове значення і позначаються як C . Невизначені константи описуються узагальненими функціями належності і позначаються як $\beta(c)$.

Змінні – це тип даних, значення яких може змінюватися або визначатися під час розв’язання конкретної задачі. Аналогічно константам, змінні можуть бути визначеними та невизначеними; при цьому невизначені змінні описуються функціями належності.

Оператори

Оператори в моделюванні систем керування за умов невизначеності є узагальненням звичайних операцій для роботи з невизначеними даними. Вони перетворюють невизначені вхідні дані, задані у вигляді узагальнюючих функцій (УФ), у невизначений результат також у формі УФ, зберігаючи логіку обробки даних у рамках системи G .

Позначення операторів: унарні $\Phi^{(1)}$, бінарні $\Phi^{(2)}$, граничні $\Phi^{(n)}$.

УФ – це додатньо визначена функція на проміжку можливих значень аргументу, яка характеризує можливість π або ймовірність P прийняття аргументом значення з певного інтервалу $[x_1, x_2]$, $x_1 \in B$, $x_2 \in B$, за правилами:

$$P = \frac{\int_{x_1}^{x_2} [\beta(x)] dx}{\int_B [\beta(x)] dx}, \quad (1.8)$$

$$\pi = \frac{\int_{x_1}^{x_2} [\beta(x)] dx}{\max_B \int_{[x_{i-1}, x_i]} [\beta(x)] dx}, \quad (1.9)$$

де $x_{i-1}, x_i \in B$, $i = 1 \dots n$, n – кількість інтервалів розбиття B .

Узагальнююча функція $\beta(x)$ визначається наступним чином:

Для чіткого x , значення якого визначається статистично з похибкою Δx , збігається за властивостями із щільністю (диференціальним законом) розподілу ймовірностей

$$\beta(x) = f_X(x); \quad (1.10)$$

Для чіткого x , значення якого визначається точно

$$\beta(x) = \delta(x), \quad (1.11)$$

де $\delta(x)$ – дельта-функція Дірака;

3. Для нечіткого x , значення якого задається функцією належності

$$\beta(x) = \mu_n(x), \quad (1.12)$$

де $\mu_n(x)$ – нормована функція належності

$$\mu_n(x) = \frac{\mu(x)}{\int_x \mu(x) dx}, \quad (1.13)$$

Зворотне перетворення УМФ у функцію належності виконується за правилом (1.14):

$$\mu(x) = \beta(x) / \beta_{\max}(x), \quad (1.14)$$

а в закон розподілу ймовірностей за правилом (1.15):

$$f_X(x) = \frac{\beta(x)}{\int_x^{\infty} \beta(x) dx}. \quad (1.15)$$

Узагальнююча функція (УФ), визначена таким чином, є математичним об'єктом, властивості якого подібні до властивостей закону розподілу ймовірностей. Функцію належності результату операції над аргументами можна визначити як результат інтегрального операторного перетворення у вигляді

$$\beta_Y(y) = \Phi_{XY}(\beta_X(\bar{x}), A, W) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} \beta_X(\bar{x}) \varphi(x, y, A, W) d\bar{x} \quad (1.16)$$

Результати порівняльного аналізу методів прийняття рішень в РДС наведено у табл. 1.4.

Таблиця 1.4.

Метод	Обсяг необхідної інформації	Складність Реалізації	Оптимальність	Універсальність
Статистичні методи	Великий	Середня	Висока	Середня
Експертні методи	Середній	Середня	Середня	Середня
Метод УФН	Великий	Висока	Висока	Висока

2 МОДЕЛІ РІШЕНЬ В РОЗПОДІЛЕНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМАХ

При прийнятті рішень у розподілених динамічних системах необхідно враховувати взаємодію між елементами та невизначеність окремих параметрів системи, що підкреслює актуальність розробки спеціалізованих моделей прийняття рішень для таких систем.

2.1. Розробка структури моделі прийняття рішень при управлінні розподіленою динамічною системою

В основі ІТ прийняття рішень при керуванні РДС лежить комплекс математичних моделей, ієрархію яких показано на рис. 2.1.

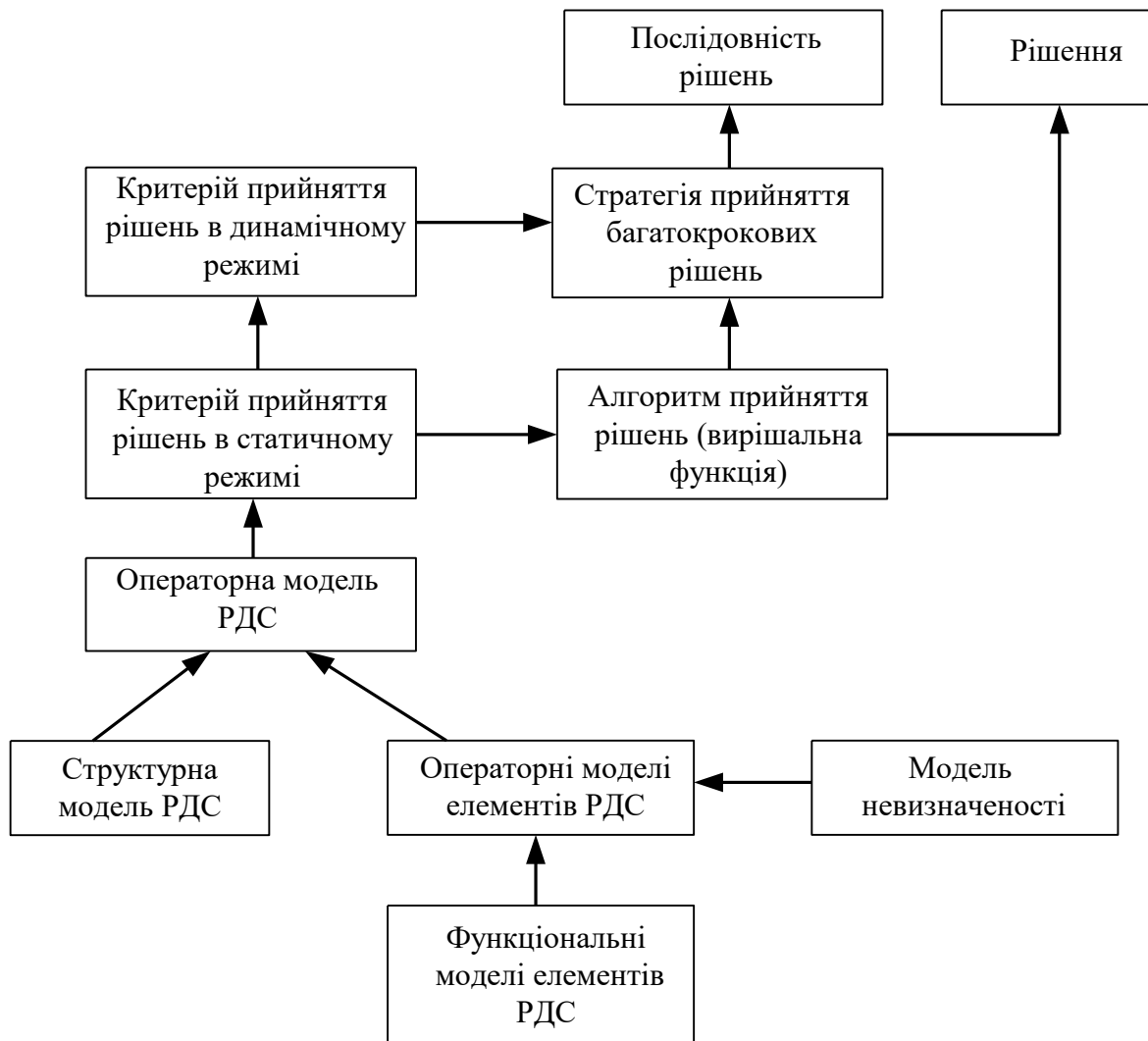


Рис. 2.1. Ієрархія моделей прийняття рішень

В інформаційній технології прийняття рішень виокремлюють дві взаємопов'язані групи моделей: моделі, що описують саму розподілену систему, та моделі, за допомогою яких здійснюється прийняття рішень.

Модель розподіленої системи являє собою комплекс описів, які відображають будову системи, закономірності її функціонування та механізми взаємодії між окремими елементами.

До другої групи належать моделі, що безпосередньо застосовуються в алгоритмах формування керуючих рішень і забезпечують вибір дій у ситуаціях невизначеності.

Поведінка елементів системи за умов невизначених параметрів описується функціональними моделями в операторній формі. Конкретний вигляд операторних перетворень визначається обраною моделлю невизначеності, яка задає правила виконання математичних операцій над даними, поданими в різних формах.

Структурна модель відображає систему зв'язків між елементами. Для більшості розподілених систем вона формується на основі графових подань і реалізується у вигляді матриць.

Модель взаємодії використовується для кількісної оцінки впливів між елементами системи, що дозволяє більш точно визначити їхній поточний стан у момент формування рішення.

Застосування зазначених моделей на відповідних стадіях процесу прийняття рішень забезпечує поетапне формування необхідної інформації та слугує основою для побудови моделей наступних рівнів управління.

2.2. Розробка моделі розподіленої системи

2.2.1. Функціональна та інформаційна архітектури. Керування розподіленою системою за допомогою прийняття рішень може бути зображене як взаємодія двох шарів (рис. 2.2).

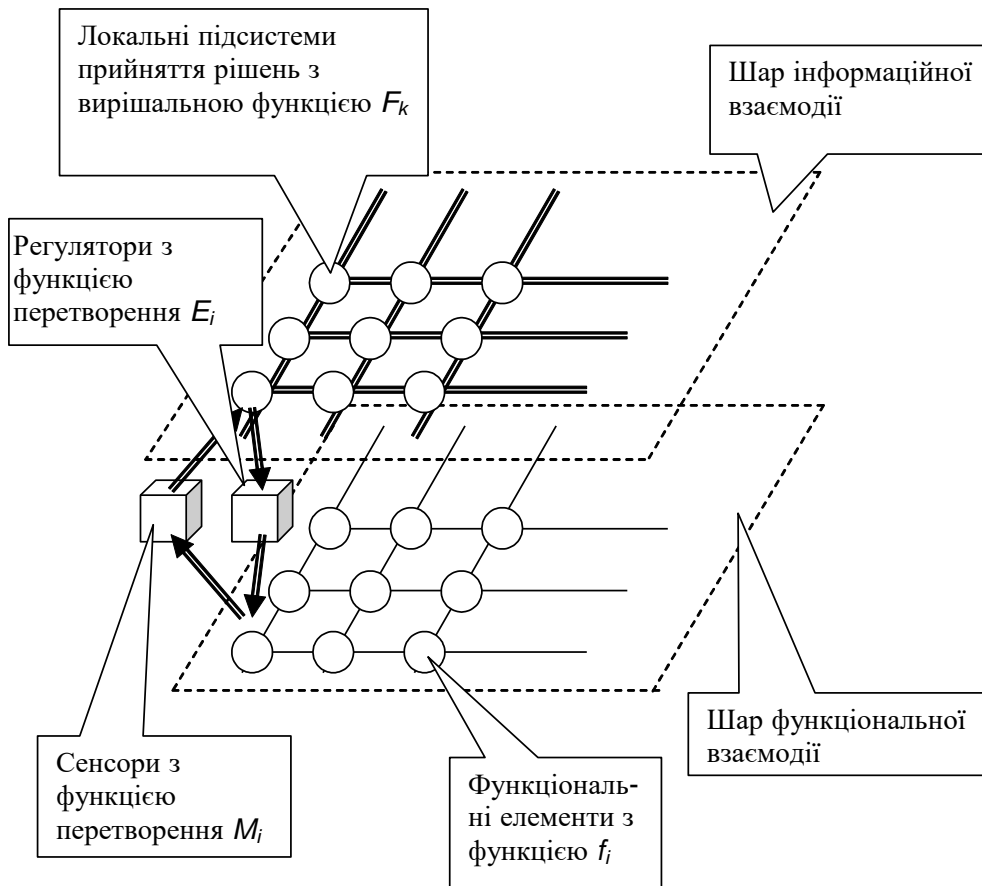


Рис.2.2. Схема взаємодії системи управління з керованою розподіленою системою

Модель системи рис. 2.2 складається з моделей архітектур функціонального та інформаційного шарів і моделі їх взаємодії.

Зміст f_i, M_i, E_i, F_k розшифрований на рис. 2.2.

У загальному випадку розподілена система може бути представлена у вигляді графа $\Gamma(S, L)$, де S – множина підсистем (вершин графа); L – множина зв'язків (ребер графа).

Розглянемо один елемент (підсистему) розподіленої системи, зображений на рис. 2.3.а.

З метою побудови формальної моделі здійснимо декомпозицію елемента за його виходами (рис. 2.3, б). Кожній підсистемі S_i відповідає функціональна модель у вигляді системи у загальному випадку операторних рівнянь

$$\forall l_{ij} \in L_{i \text{ вих}} \rightarrow x_{ij} = f_{ij}(x_{ik} / l_{ik} \in L_{i \text{ вх}}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (2.1)$$

де $L_{i\text{вх}}$ – підмножина ребер, які входять у вершину S_i ; $L_{i\text{вих}}$ – підмножина ребер, які виходять з вершини S_i ; n – кількість входів елемента; m – кількість виходів елемента.

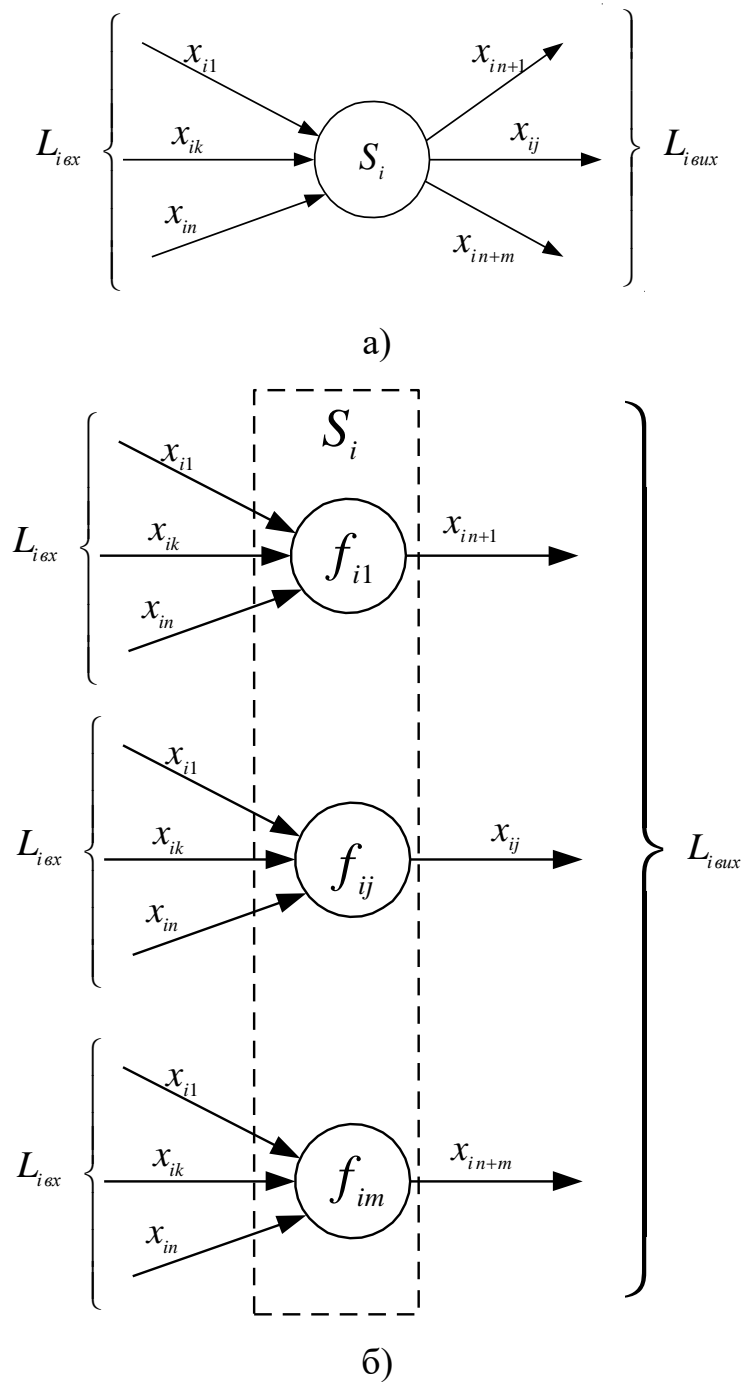


Рис. 2.3. Декомпозиція елемента системи по виходам: а) елемент системи;

б) декомпозиція елемента

Об'єднаємо моделі всіх підсистем для отримання моделі розподіленої системи. Для цього доповнимо систему рівнянь (2.1) додатковими рівняннями, які визначають зв'язки між підсистемами у вигляді

$$\forall i, j \rightarrow x_{ij} = x_{vk}, \quad (2.2)$$

де x_{ij} – j -й вихід i -ї підсистеми; x_{vk} – k -й вхід v -ї підсистеми.

Розглянемо модель лінійної розподіленої системи, в якій всі оператори f_{ij} у рівняннях (2.1) є лінійними

$$\forall i, j \rightarrow x_{ij} = \sum_k a_{ij} x_{ik} + b_{ij} \text{ або } x_{ij} - \sum_k a_{ij} x_{ik} = b_{ij}. \quad (2.3)$$

З використанням матричного подання модель (2.1) лінійної розподіленої системи матиме вигляд:

$$X \cdot A = B. \quad (2.4)$$

Матриці A і B є блочними

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Перетворимо рівняння (2.3) до вигляду

$$\forall i, j \rightarrow x_{ij} - \sum_{k, l_{ik} \in L_{i \text{ вх}}} a_{ijk} x_{ik} + \sum_{k, l_{ik} \notin L_{i \text{ вх}}} 0 \cdot x_{ik} = b_{ij}. \quad (2.6)$$

Матриця A_1 утворюється з коефіцієнтів лівої частини рівнянь (2.6) і матиме розмір $[M, M]$, де M – кількість ребер. Матриця B_1 – матриця-стовпець, утворена з вільних членів (правої частини) рівнянь (2.3).

Для з'ясування змісту матриць A_2 і B_2 перетворимо рівняння (2.2) на вигляд

$$\forall i, j \rightarrow 0 \cdot x_{11} + 0 \cdot x_{12} + \dots + 1 \cdot x_{ij} + \dots - 1 \cdot x_{vk} + \dots = 0. \quad (2.7)$$

Ліва частина рівняння (2.7) містить M доданків. У матричному поданні система рівнянь (2.7) матиме вигляд

$$X \cdot A_2 = B_2, \quad (2.8)$$

де A_2 – матриця розміром $[M, M]$ з двома ненульовими елементами, один з яких відповідає пронумерованому кінцю ребра (входу відповідної підсистеми) і дорівнює 1, інший – пронумерованому початку того ж ребра (виходу іншої підсистеми);

B_2 – нульова матриця-стовпець розміром $[M, 1]$.

Таким чином, розміри матриць у рівнянні: $A[2M, M]$; $B[2M, 1]$.

Опишемо функціонування розподіленої динамічної системи у термінах потоків інформації.

Процес прийняття рішень щодо керування системою базується на даних, що поступають у підсистему прийняття рішень у реальному часі. Якість ухвалених рішень за обраним критерієм визначається співвідношенням між швидкістю зростання невизначеності ситуації та обсягом інформаційного потоку про стан системи.

Невизначеність ситуації виникає з таких причин:

похибки перетворення параметрів стану, що спостерігаються X_1 на вхідні дані Y_1 ; неспостережність деяких параметрів стану X_2 і заміна даних про ці параметри експертними оцінками або статистичними даними Y_2 ; непередбачена зміна стану системи від моменту його оцінювання t_0 до моменту реалізації рішення $t_0+\tau$ (вплив динаміки процесу); неузгодженість рішень, що приймаються іншими ППР.

Враховуючи можливість одночасної дії всіх зазначених причин невизначеності та їх різнотипний характер, використаємо для характеристики загального рівня невизначеності узагальнену ентропію, оскільки вона є адитивною мірою невизначеності. Тоді

$$H_{\nu 0} = \sum_{i=1}^4 b_{\nu i} H_{\nu i}, \quad (2.9)$$

де ν – індекс локальної підсистеми;

$H_{\nu i}$ – ентропія, зумовлена окремою причиною невизначеності;

$b_{\nu i}$ – вагові коефіцієнти.

Складова загальної ентропії, яка зумовлена невизначеністю впливів з боку суміжних підсистем РДС, є частиною ентропії від неспостережності параметрів стану

$$H_{v2} = H'_{v2} + H''_{v2}, \quad (2.10)$$

де H'_{v2} - ентропія від неспостережності параметрів v -ї підсистеми;

H''_{v2} - ентропія неспостережності стану суміжних підсистем.

Ентропія H''_{v2} залежить від зв'язності графа РДС.

Під зв'язністю будемо розуміти відношення кількості ребер, які можна видалити з графа без порушення його зв'язності, до мінімальної кількості ребер, необхідної для забезпечення зв'язності. Мінімальну зв'язаність має ієрархічна система, яка має $m=n-1$ ребер (n – кількість вершин графа). Таким чином, коефіцієнт зв'язності

$$k_3 = \frac{n - m - 1}{m}. \quad (2.11)$$

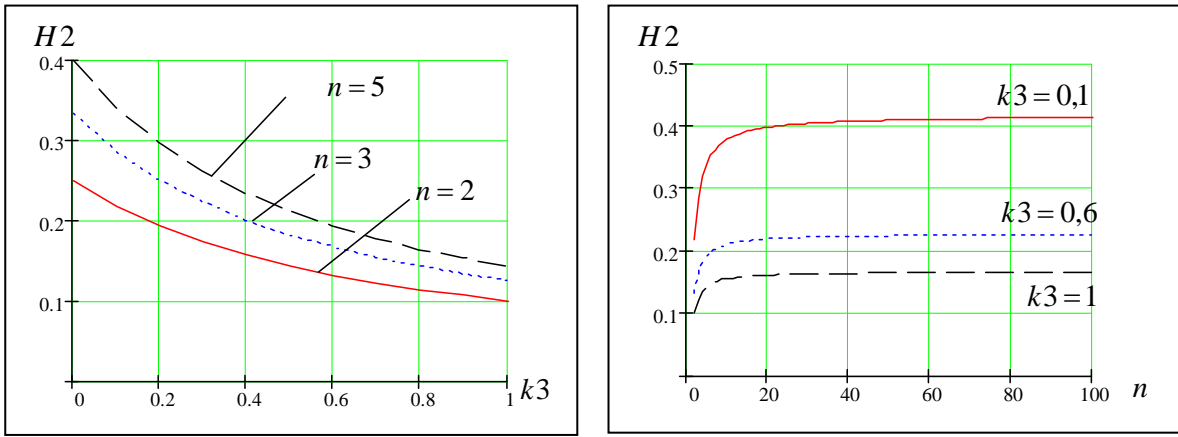
Якщо у загальній ентропії H_0 ентропія H_2'' складає в середньому частку H_2''/H_0 , то інформація, що надходить від суміжних підсистем, містить відповідну частку інформації про стан підсистеми, які суміжні з ними (опосередкована суміжність). Кількість шляхів надходження такої інформації в середньому дорівнює k_3 .

Отже,

$$H_2'' = \eta \cdot H_0 \left(1 - \frac{H_2''}{H_0} \cdot k_3 \right), \quad (2.12)$$

де η – середня степінь вершини графа.

Графік залежності (2.12) зображений на рис. 2.4



а)

б)

Рис. 2.4. Залежність невизначеності стану від кількості елементів РДС: а) при $k_3 = 0 \dots 1$; б) при $n = 2 \dots 100$

Таким чином, ентропія зростає із зростанням кількості вершин графа і зменшується із збільшенням коефіцієнта зв'язності.

2.2.2. Марковська модель розповсюдження впливів в розподіленій системі.

Розглянемо розподілену динамічну систему, що складається з n елементів e_1, e_2, \dots, e_n . Подамо цю систему у вигляді графа, де вершинами є елементи системи, а дугами — зв'язки між ними. Приклад такого графового подання наведено на

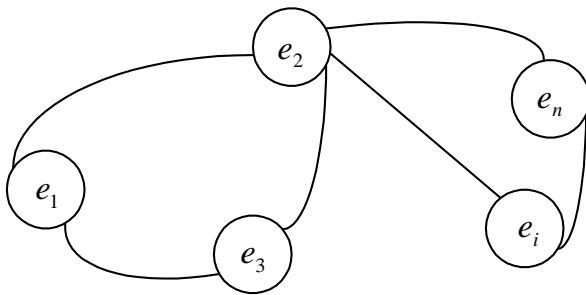


Рис. 2.5. Приклад РДС

Нехай кожен елемент системи може перебувати в одному зі станів, які утворюють множину допустимих станів цього елемента. Множина станів визначається відповідно до функційного призначення елемента в системі. Якщо стан елемента

залежить лише від його попереднього стану і не залежить від попередньої історії, то послідовність станів утворює марковський ланцюг [4].

Нехай m – максимальна кількість станів елементів в системі. Позначимо через p_{ij} ймовірність переходу елементу із стану Q_i в стан Q_j . Тоді ймовірності переходів елементу з одного стану в інший описується матрицею

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mm} \end{pmatrix}. \quad (2.13)$$

Особливістю цього марковського ланцюга є його неоднорідність, що зумовлена взаємним впливом елементів системи. Для неоднорідного ланцюга матриця (2.13) у фіксовані моменти часу має різні значення $P^{(1)}, P^{(2)}, \dots, P^{(k)}$. Для системи, наведеної на рис. 2.6, перехідні ймовірності елемента e_1 залежатимуть від станів елементів e_2 і e_3 :

$$p_{1ij} = f(Q_{2\tau_{21}}, Q_{3\tau_{31}}), \quad (2.14)$$

де p_{1ij} – ймовірність переходу 1-го елемента із стану i в стан j ;

$Q_{i\tau_{i1}}$ – стан i -го елемента системи, віддалений на τ_{i1} назад від поточного моменту; τ_{i1} – час передавання впливу від i -го елемента до 1-го елемента, виміряний у кроках роботи системи.

Запишемо рівняння (2.14) через ймовірності станів

$$p_{1ij} = \varphi(\tilde{p}_{2\tau_{21}}, \tilde{p}_{3\tau_{31}}). \quad (2.15)$$

Ймовірність переходу в загальному вигляді описується функцією

$$p_{vij} = \psi(\tilde{P}^{(k)}, \tilde{P}^{(k-1)}, \dots, \tilde{P}^{(0)}, C_v, T), \quad v=1\dots n, \quad i, j=1\dots m, \quad (2.16)$$

де $\tilde{P}^{(k)}$ – матриця ймовірностей станів елементів системи на k -му кроці;

C_v – 4-вимірний масив вагових коефіцієнтів $[n, m, n+1, m+1]$;

T – матриця затримок передавання впливів розміром $n \times n$.

Елемент матриці $c_{vij}^{lh} \in C_v$ визначає вплив h -го стану l -го елемента на ймові-

рність переходу v -го елемента з i -го в j -й стан. Елемент c_{vij}^{00} – ймовірність переходу v -го елемента з i -го в j -й стан без урахування впливу інших елементів. Оскільки вплив \tilde{p}_{ij} на стани інших елементів буде різним, матриця C задається для кожного елемента системи.

Елементи матриці $\tau_{ij} \in T$ – цілі числа, які показують через скільки кроків стан i -го елемента впливатиме на стан j -го елемента.

Зміст індексів пояснює схема рис. 2.6.

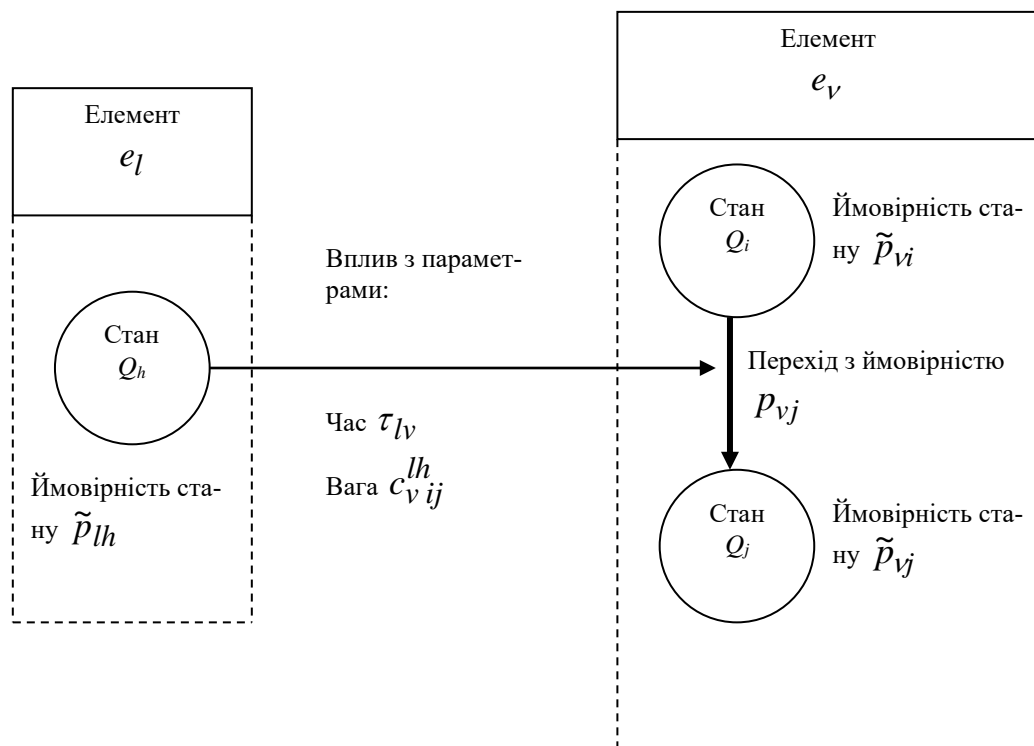


Рис. 2.6. Схема зв'язку параметрів марковської моделі

Враховуючи схему рис. 2.6, запишемо залежність для переходу v -го елемента з i -го в j -й стан (2.15) у лінеаризованому вигляді

$$p_{vij}^{(k)} = c_{vij}^{00} + \sum_{l=1}^n \sum_{h=1}^m \left(c_{vlh}^{lh} \cdot \tilde{p}_{lh}^{(k-\tau_{lh})} \right). \quad (2.17)$$

Для неоднорідного марковського ланцюга ймовірність того, що v -й елемент системи після k кроків буде знаходитись в j -му стані, визначається з формули

$$\tilde{p}_{vj}^{(k)} = \sum_{i=1}^m \tilde{p}_{vi}^{(k-1)} p_{vij}^{(k)}, \quad (2.18)$$

або, враховуючи (2.17)

$$\tilde{p}_{vj}^{(k)} = \sum_{i=1}^m \left\{ \tilde{p}_{vi}^{(k-1)} \cdot \left[c_{vij}^{00} + \sum_{l=1}^n \sum_{h=1}^m \left(c_{vij}^{lh} \cdot \tilde{p}_{lh}^{(k-\tau_{ij})} \right) \right] \right\}. \quad (2.19)$$

Запишемо рівняння аналогічні (2.18) для станів кожного елемента системи.

Утворена система буде містити $n \times m$ рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{p}_{11}^{(k)} = \sum_{i=1}^m \tilde{p}_{1i}^{(k-1)} p_{1i1}^{(k)}; \\ \tilde{p}_{vj}^{(k)} = \sum_{i=1}^m \tilde{p}_{vi}^{(k-1)} p_{vij}^{(k)}; \\ \dots \dots \dots \\ \tilde{p}_{nm}^{(k)} = \sum_{i=1}^m \tilde{p}_{ni}^{(k-1)} p_{nim}^{(k)}. \end{array} \right. \quad (2.20)$$

Якщо ймовірність переходу елемента в наступний стан на k -му кроці залежить тільки від станів на попередніх кроках, то рівняння системи будуть незалежними і розв'язуються окремо одне від одного.

У випадку, коли стан елемента на k -му кроці залежатиме від того, в який стан перейдуть інші елементи на цьому кроці, права частина рівнянь системи (2.19) буде містити ймовірності з лівої частини інших рівнянь.

Виділимо в рівнянні (2.19) доданок, що залежить від k -го кроку. Отримаємо

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{vj}^{(k)} = & \sum_{i=1}^m \left(\tilde{p}_{vi}^{(k-1)} \cdot \left[c_{vij}^{00} + \sum_{\substack{l=1 \\ \tau_{lv} > 0}}^n \sum_{h=1}^m \left(c_{vij}^{lh} \cdot \tilde{p}_{lh}^{(k-\tau_{lv})} \right) \right] \right) + \\ & + \sum_{i=1}^m \left(\tilde{p}_{vi}^{(k-1)} \cdot \left[c_{vij}^{00} + \sum_{\substack{l=1 \\ \tau_{lv} = 0}}^n \sum_{h=1}^m \left(c_{vij}^{lh} \cdot \tilde{p}_{lh}^{(k)} \right) \right] \right). \end{aligned} \quad (2.21)$$

Перетворимо другий доданок (2.21)

леної системи.

2.2.3. Потокова модель з незбалансованими потоками.

Взаємодію елементів розподіленої динамічної системи доцільно моделювати через поняття потоків між ними, таких як потоки даних, матеріалів, транспортних засобів, енергії чи продукції.

Лінійна потокова модель представляється системою рівнянь і обмежень [6] :

$$\forall(i, j \in V): \lambda_{ij} \leq c_{ij}; \quad (2.25)$$

$$\forall(i, j \in V): \lambda_{ij} = \lambda_{ji}; \quad (2.26)$$

$$\forall(s, i \in V): \sum_i \lambda_{si} \geq \sum_i \lambda_{is}; \quad (2.27)$$

$$\forall(t, i \in V): \sum_i \lambda_{it} \geq \sum_i \lambda_{ti}; \quad (2.28)$$

$$\forall(i \neq s, t): \sum_j \lambda_{ij} = \sum_j \lambda_{ji}; \quad (2.29)$$

$$\forall(s, t, i \in V): \sum_s \sum_i \lambda_{si} = \sum_t \sum_i \lambda_{it}, \quad (2.30)$$

де λ – інтенсивність потоку; c_{ij} – пропускна спроможність ребра між вузлами i і j ; V – множина вузлів мережі; s – зосереджені витoki потоку; t – зосереджені стоки потоку.

Більшість існуючих поточкових моделей не враховує специфічні особливості реальних розподілених динамічних систем, зокрема:

1. розподілені витoki та стоки потоків уздовж ребер мережі;
2. вплив ступеня завантаженості ребер на розподіл потоків у вузлах;
3. наявність часових варіацій параметрів потоків, зокрема добових, тижневих та сезонних змін.

Враховуючи першу з наведених вище особливостей потоків (зміни потоку у ребрах), введемо у рівняння (2.26) додатковий параметр k

$$\forall(i, j \in V): \lambda_{ij} = -k(T) \cdot \lambda_{ji}, \quad (2.31)$$

який визначає, як змінюється потік у ребрі. Очевидно, що значення параметра k для розподіленої системи не є сталим, а змінюється в залежності від часу та ситуації в мережі. Враховуючи складність визначення цього коефіцієнта, розглянемо

параметр k як величину, що описується УФН $\beta(k)$. Тоді рівняння (2.31) можна переписати у вигляді

$$\forall(i, j \in V): \lambda_{ij} = -\lambda_{ij} \cdot k = -\lambda', \quad (2.32)$$

де λ' – величина із законом $\beta(\lambda')$.

Рівняння, що описують модель мають вигляд:

$$\forall(i, j \in V): \lambda'_{ij} \leq c_{ij}, \quad (2.33)$$

$$\forall(i, j \in V): \lambda_{ij} = -\lambda_{ij} \cdot k = -\lambda', \quad (2.34)$$

$$\forall(s, i \in V): \Lambda_{si} \geq \Lambda_{is}, \quad (2.35)$$

$$\forall(t, i \in V): \Lambda_{it} \geq \Lambda_{ti}, \quad (2.36)$$

$$\forall(i \neq s, t): \Lambda_{ij} = \Lambda_{ji}, \quad (2.37)$$

$$\forall(s, t, i \in V): \Lambda_s = \Lambda_t, \quad (2.38)$$

де $\Lambda_{si}, \Lambda_{is}$ – випадкові величини, що є сумою вхідних і вихідних інтенсивностей у зосереджених витоках потоку; $\Lambda_{it}, \Lambda_{ti}$ – випадкові величини, що є сумою вхідних і вихідних інтенсивностей у зосереджених стоках потоку; $\Lambda_{ij}, \Lambda_{ji}$ – випадкові величини, що є сумою вхідних і вихідних інтенсивностей у вузлах мережі; Λ_s – сума інтенсивностей, що виходять із зосереджених витоків; Λ_t – сума інтенсивностей, що входять у зосереджені стоки витоків.

Очевидно, що для виконання нерівності (2.33), необхідно, щоб максимальне значення величини λ' не перевищувало значення пропускної спроможності c . Дана умова накладає обмеження на значення коефіцієнта k та параметри його закону розподілу.

Окрім змін величини потоку на ребрах мережі, важливою особливістю розподілених динамічних систем є інтелектуальна маршрутизація, характерна для систем, де рух потоків контролює людина. Прикладом такої системи є міська транспортна мережа.

Оскільки вибір маршруту визначається на основі експертної оцінки, ступінь оптимальності цього вибору доцільно описувати за допомогою функції належності. Отже, якщо i -й вузол має n інцидентних ребер, то вхідний потік з кожного ребра

$\lambda_{ji} (j \in n)$ розподіляється на n напрямків.

Витрати часу на подолання шляху від поточного вузла до кінцевого є критерієм оптимальності. Час руху τ_{jn} до стоку t_j , за маршрутом, який проходить через кожне з n ребр, може бути визначений за алгоритмом Дейкстри. Отже значення функції належності обрання оптимального маршруту

$$\mu_{jn} = \tau_{j \min} / \tau_{jn}. \quad (2.39).$$

Будемо вважати, що в кожному вузлі величина потоку, метою якого є сток t_j , пропорційна $\sum_i \lambda_{it_j}$. Отже, інтенсивність потоку в i -му вузлі, метою якого є сток t_j , буде $\sum_j \lambda_{ji} \cdot \sum_i \lambda_{it_j}$. Відповідно, частина потоку, яка обере n -й напрямок,

$$\frac{\mu_{jn}}{\sum_n \mu_{jn}} \sum_j \lambda_{ji} \cdot \sum_i \lambda_{it_j}.$$

Таким чином, отримуємо додаткове рівняння до моделі (2.33)–(2.38)

$$\lambda_{ij} (j \in n) = \sum_{t_j} \left[\frac{\mu_{jn}}{\sum_n \mu_{jn}} \sum_j \left(\lambda_{ji} \sum_i \lambda_{it_j} \right) \right], \quad (2.40)$$

яке можна використати для моделювання стану потоків у РДС.

2.3. Удосконалення моделі динаміки розподіленої динамічної системи при керуванні рішеннями

У більшості розподілених динамічних систем фактор динаміки має ключове значення для процесу прийняття рішень, оскільки врахування змін параметрів системи підвищує адекватність моделі та сприяє оптимальності ухвалених рішень.

2.3.1. Дискретна модель динаміки. Запропонована метрика рішень дозволяє отримати формальну модель динаміки системи, керованої рішеннями.

Прийняття рішення є дискретним процесом, тому модель динаміки також повинна бути дискретною. У загальному вигляді дискретна модель динаміки роз-

поділеної системи може бути представлена у формі системи рів-

$$\text{нянь. } \begin{cases} d_{j0} = F_j [(d_{ji}, i = 1 \dots - n); (y_{ji}, i = 0 \dots - m); (x_{ji}, i = 0 \dots - k)]; \\ y_{j1} = M_j [(d_{ji}, i = 0 \dots - n); (y_{ji}, i = 0 \dots - m); (x_{ji}, i = 0 \dots - k)]; \\ \tau_{j0} = \theta_j [F_j, M_j, \{d_j\}, \{y_j\}, \{x_j\}] \end{cases} \quad (2.41)$$

де j – індекс локальної підсистеми РДС; i – індекс циклу “прийняття рішень – керування” (рахуються від поточного моменту, який вважається нульовим, у минуле – від’ємні індекси, і у майбутнє – додатні індекси); d_j – рішення, які приймаються в j -й підсистемі; y_j – стани j -ї підсистеми; x_j – впливи на j -ту підсистему з боку інших підсистем; τ_j – час прийняття рішення.

Кожне з рівнянь системи (2.41) може бути нелінійним.

Сформуємо дискретну модель динаміки для конкретного випадку лінійної системи., яка керується рішеннями $d \in R^n$ і представляється операторним рівнянням загального типу

$$S(p) \cdot Y(p) = Q(p) \cdot D(p) + R(p) \cdot X(p)$$

або

$$Y(p) = \frac{Q(p)}{S(p)} D(p) + \frac{R(p)}{S(p)} X(p). \quad (2.42)$$

Розглянемо випадок ізольованої підсистеми, тобто такої, на яку не впливають зміни станів інших підсистем розподіленої динамічної системи. У такому випадку $X(p) \equiv 0$ і динаміка описується передаточною функцією

$$W(p) = \frac{Y(p)}{D(p)} = \frac{a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0}{b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0}, \quad (2.43)$$

де $Y(p)$, $D(p)$ – зображення за Лапласом стану лінійної системи і керуючих рішень. З (2.43) знаходимо:

$$b_m p^m y + \dots + b_1 p y + b_0 y = a_n p^n d + \dots + a_1 p d + a_0 d. \quad (2.44)$$

Відповідно до перетворення Лапласа:

$$p^k Z(p) \leftrightarrow \frac{d^k Z(t)}{dt^k}. \quad (2.45)$$

У загальному випадку

$$z^{(k)}(t_0) = \frac{1}{\Delta t^k} \sum_{i=0}^k (-1)^i C_k^i z_{-i}, \quad (2.46)$$

де t_0 – момент надходження останнього даного, поточний момент часу;
 Δt – інтервал дискретизації.

Підставляючи (2.46) в (2.44), отримуємо дискретний вираз передавальної функції

$$\sum_{j=0}^m \left[\frac{b_j}{\Delta t^j} \sum_{i=0}^j (-1)^i C_j^i y_{-i} \right] = \sum_{j=0}^n \left[\frac{a_j}{\Delta t^j} \sum_{i=0}^j (-1)^i C_j^i d_{-i} \right]. \quad (2.47)$$

Змінюючи порядок підрахунку сум у чисельнику отримуємо

$$y = \frac{\sum_{j=0}^n \left[\sum_{i=0}^j (-1)^i C_j^i \frac{a_i}{\Delta t^j} \right] d_{-i} - \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^j (-1)^i C_j^i \frac{b_i}{\Delta t^j} \right] y_{-i}}{\sum_{j=0}^m \frac{b_j}{\Delta t^j}}$$

або

$$y = \sum_{i=0}^n K_{d_i} d_{-i} + \sum_{i=1}^m K_{y_i} y_{-i}, \quad (2.48)$$

$$K_{y_i} = \frac{(-1)^{i+1} \sum_{j=i}^m C_j^i \frac{b_j}{\Delta t^j}}{\sum_{j=0}^m \frac{b_j}{\Delta t^j}}. \quad (2.49)$$

Модель (2.49) рекурсивна, оскільки поточне значення стану Y обчислюється з використанням попередніх значень. Початкові значення змінних рекурсивного виразу: $\forall d_i = 0, i = 0, -1, \dots, -n; \forall y_i = 0, i = 0, -1, \dots, -m$.

Модель (2.49) дозволяє визначити властивості стратегії прийняття рішень та отримати вирішувальну функцію для керування лінійною динамічною системою.

Твердження: Стратегія прийняття рішень у лінійній динамічній системі є багатокроковою, причому кількість кроків відповідає порядку чисельника передаточної функції керованої системи.

Враховуючи вираз коефіцієнтів (2.49), отримуємо

$$K'_{y_i} = \frac{K_{y_i}}{K_{d_0}} = - \frac{\sum_{j=i}^m C_j^i \frac{b_j}{\Delta t^j}}{\sum_{j=0}^n \frac{a_j}{\Delta t^j}}; \quad (2.50)$$

Звідки остаточний вираз вирішувальної функції

$$d_0 = \sum_{i=0}^m K'_{y_i} y_{-i} + \sum_{i=1}^n K'_{d_i} d_{-i}. \quad (2.51)$$

Отже, висунуте твердження підтверджується.

Особливістю моделі (2.51) є те, що доданки в правій частині подані у різних формах. Для більшості систем рішення u є числовим значенням, яке задає нове положення регулятора системи. Водночас вектор параметрів системи p включає невизначеність, яка, у загальному випадку, описується узагальнюючою функцією G .

Визначимо операції перетворень у просторах рішень U та станів X . Система перетворень складатиметься з чотирьох основних операторів — двох прямого та двох оберненого перетворення.

$$\begin{aligned} D &\xrightarrow{K_d} R \\ Y &\xrightarrow{K_y} R \\ R &\xrightarrow{K_y^{-1}} Y \\ R &\xrightarrow{K_d^{-1}} D \end{aligned}$$

Для знаходження рішення d_0 , перетворимо рішення d_i з рівняння (2.51) в узагальнюючі функції. Тоді оптимальне рішення у вигляді узагальнюючої функції буде визначатися як результат інтегрального операторного перетворення.

Зворотнє перетворення K_d^{-1} рішення d_0 із узагальнюючої функції в число відбувається за правилом

$$d_0 = \int_D d_\xi \beta(d_\xi) dd_\xi, \quad (2.52)$$

де d_ξ – рішення з множини D .

В зв'язку з усередненням при отриманні рішення d_0 можлива ситуація, коли рішення d_i , знайдене на i -му кроці з перетворення (2.52), буде відрізнятись від оптимального рішення для даного стану системи d_{iopt} . При цьому величина відхилення між рішеннями може суттєво коливатися. Неоптимальне рішення призводить до формування неточних вхідних даних для обчислення наступного рішення, що спричиняє накопичення похибки у стратегії. Щоб уникнути цього, рекомендується перевіряти отримане рішення за його наслідками.

$$|R(y_{i-1}) - R(y_0)| < |R(\tilde{y}) - R(y_0)|, \quad (2.53)$$

то рішення d_i гірше, ніж рішення d_{i-1} , прийняте на $i-1$ кроці. Враховуючи даний факт, потрібно здійснити коригування рішення d_i , використовуючи додаткові дані або інший алгоритм прийняття рішення. Якщо коригування d_i неможливе, необхідно виключити його із загальної стратегії з метою зменшення накопичення похибок в обчисленні наступних рішень.

Багатокроковий процес прийняття рішень можна подати у вигляді графа, де умови наступних кроків залежать від прогнозів попередніх.

Критерії оптимальності:

- мінімальна кількість кроків до мети;
- мінімальні сумарні втрати чи ризик;
- мінімальна залишкова невизначеність стану;
- мінімальна невизначеність траєкторії досягнення мети.

Враховуючи (2.51) і (2.53) запишемо:

$$\begin{cases} d_j = \sum_{i=j}^{j+m} K'_{y_i} y_{-i} + \sum_{i=j+1}^{j+n} K'_{d_i} d_{-i}, j = 0 \dots n-1; \\ y_{j+1} = \sum_{i=j}^{j+n} K_{d_i} d_{-i} + \sum_{i=j+1}^{j+m} K_{y_i} y_{-i}, j = 0 \dots n-1; \\ y_i = \bar{y}_n + \Delta_n; \\ y_0 = \bar{y}_0 + \Delta_0. \end{cases} \quad (2.54)$$

2.3.2. Стійкість розподілених систем. Використовуючи дискретну модель динаміки керованого об'єкта, проаналізуємо стійкість системи керування загалом. Узагальнена структурна схема такої системи представлена на рис.

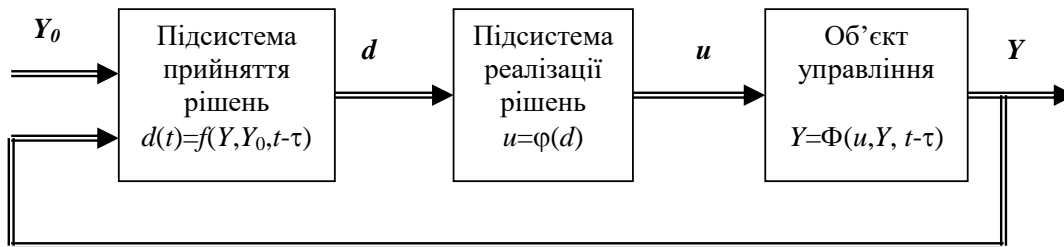


Рис. 2.7. Узагальнена структурна схема системи керування

Рішення d приймається на підставі вектора умов $\vec{x} = \{Y, Y_0\}$, які для РДС визначаються як у поточний момент t , так і у попередні моменти $(t-\tau)$, де $\tau = \Delta t \cdot [1, \dots, \max(n, m)]$. Модель системи рис. 2.7 складається з трьох рівнянь

$$\begin{cases} d(t) = f(Y, Y_0, t - \tau); \\ u(t) = \phi(d); \\ Y(t) = \Phi(u, Y, t - \tau). \end{cases} \quad (2.55)$$

Затримки при прийнятті і реалізації рішень приводять до перетворення системи у немінимальнофазову.

Визначення сусідства двох рішень може здійснюватися шляхом розв'язання відповідного рівняння.

$$F_i^{-1}(\vec{x}, \varepsilon) = F_j^{-1}(\vec{x}, \varepsilon), \quad (2.56)$$

де F_i^{-1}, F_j^{-1} – обернені з точністю до ε вирішальні функції для i -го і j -го рішень відповідно, відносно вектора умов прийняття рішень \vec{x} .

Множину розв'язків $X_\varepsilon(d_i, d_j)$ рівняння (2.56) назвемо ε -межею рішень d_i і d_j .

Грунтуючись на відомих критеріях стійкості замкнених систем управління [8], можна сформулювати критерій стійкості системи в умовах невизначеності, керованої рішеннями:

- замкнена система, керована рішеннями, буде стійкою, якщо при $Y(t - \Delta t) = Y_0(t - \Delta t)$ розв'язки систем

$$\left\{ \begin{array}{l} d(t) = f(Y, Y_0, t - \tau); \\ u(t) = \phi(d); \\ Y(t) = \Phi(u, Y, t - \tau). \end{array} \right. \quad \text{і} \quad \left\{ \begin{array}{l} d(t + \Delta t) = f(Y, Y_0, t + \Delta t - \tau); \\ u(t + \Delta t) = \phi(d); \\ Y(t + \Delta t) = \Phi(u, Y, t + \Delta t - \tau). \end{array} \right.$$

задовольняють умові

$$|R[d(t)] - R[d(t + \Delta t)]| < \varepsilon; \quad (2.57)$$

- замкнена система, керована рішеннями, буде нестійкою, якщо при $Y(t - \Delta t) = Y_0(t - \Delta t)$ розв'язки систем

$$\left\{ \begin{array}{l} d(t) = f(Y, Y_0, t - \tau); \\ u(t) = \phi(d); \\ Y(t) = \Phi(u, Y, t - \tau). \end{array} \right. \quad \text{і} \quad \left\{ \begin{array}{l} d(t + \Delta t) = f(Y, Y_0, t + \Delta t - \tau); \\ u(t + \Delta t) = \phi(d); \\ Y(t + \Delta t) = \Phi(u, Y, t + \Delta t - \tau). \end{array} \right.$$

задовольняють умові

$$|R[d(t)] - R[d(t + \Delta t)]| > \varepsilon; \quad (2.58)$$

- замкнена система, керована рішеннями, буде на межі стійкості, якщо при $Y(t - \Delta t) = Y_0(t - \Delta t)$ розв'язки систем

$$\left\{ \begin{array}{l} d(t) = f(Y, Y_0, t - \tau); \\ u(t) = \phi(d); \\ Y(t) = \Phi(u, Y, t - \tau). \end{array} \right. \quad \text{і} \quad \left\{ \begin{array}{l} d(t + \Delta t) = f(Y, Y_0, t + \Delta t - \tau); \\ u(t + \Delta t) = \phi(d); \\ Y(t + \Delta t) = \Phi(u, Y, t + \Delta t - \tau). \end{array} \right.$$

задовольняє умові

$$Y(t + \Delta t) \subset X_\varepsilon. \quad (2.59)$$

Очевидно, стійкість системи залежить від часу прийняття рішень Δt , критерію R , вирішальної функції F , величини ε -околу і параметрів об'єкта керування.

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Реальне застосування розроблених і модифікованих методів, моделей та алгоритмів, які утворюють інформаційну технологію прийняття рішень у задачах керування розподіленими динамічними системами, передбачає їх програмну та інформаційну реалізацію, а також подальшу деталізацію й адаптацію відповідно до особливостей функціонування конкретних РДС.

3.1. Програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень керування розподіленою динамічною системою

Програмне та інформаційне забезпечення експериментальної системи підтримки прийняття рішень має модульну побудову і включає уніфіковане ядро, спільне для підсистем усіх ієрархічних рівнів, а також надбудову, що відрізняє підсистеми залежно від рівня управління. Структуру ядра СППР подано на рис. 3.1.

Ядро системи об'єднує три основні компоненти: базу моделей, базу алгоритмів та базу даних.

У базі моделей зосереджено сукупність моделей, які застосовуються під час формування управлінських рішень. Конкретний вибір моделі визначається обраним алгоритмом прийняття рішень. До складу бази моделей входять, зокрема, марковська модель взаємодії елементів розподіленої динамічної системи, модель багатокрокової стратегії прийняття рішень, а також модель з незбалансованими потоками.

Оскільки керування динамічними розподіленими системами ґрунтується на використанні багатокрокових стратегій, для накопичення та збереження інформації про попередні стани системи і прийняті рішення використовується база даних. Окрім даних, отриманих у процесі функціонування системи, база даних містить параметри моделей прийняття рішень, критерії оптимальності та інформацію про наявні ресурси.

Під час керування локальними елементами системи може використовуватися лише інформація про власний стан параметрів елемента без урахування станів інших компонентів та без процедури узгодження рішень. У зв'язку з цим управління окремими елементами доцільно реалізовувати на базі мікроконтролерів із відповідним прикладним програмним забезпеченням.

Натомість при керуванні елементами вищих ієрархічних рівнів необхідно враховувати взаємний вплив елементів системи та забезпечувати узгодженість прийнятих рішень. Програмне забезпечення таких рівнів передбачає використання бази даних, що містить інформацію про стани елементів системи в різні моменти часу.

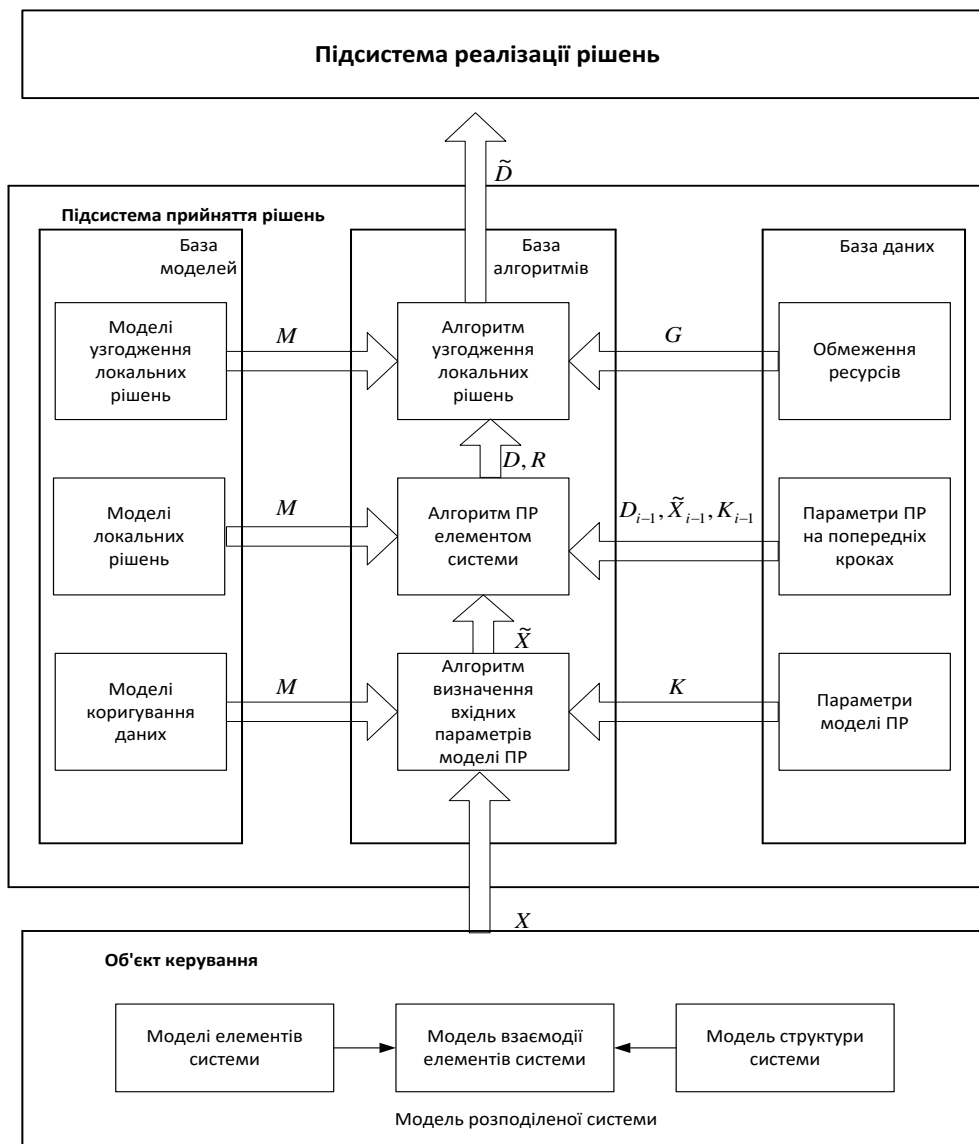


Рис. 3.1. Структура СППР керування РДС

Для реалізації запропонованої ІТ створено базу даних та відповідне програмне забезпечення. На рис. 3.2. наведено UML-діаграму класів, на якій представлено основні класи програми та зв'язки між ними.

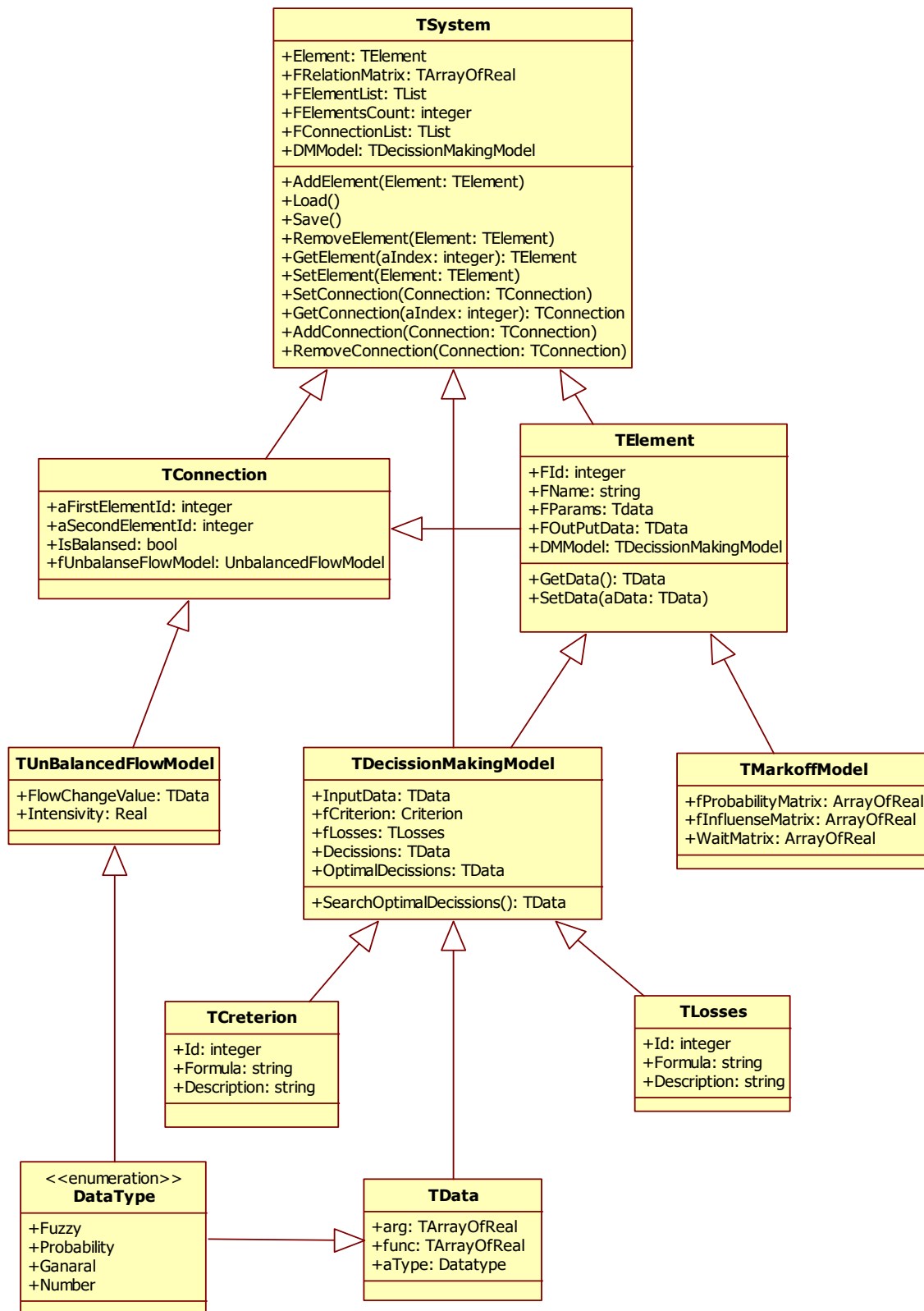


Рис. 3.2. Діаграма класів ядра програмного забезпечення

Програмний засіб «Рішення в керуванні РДС» реалізовано як автономний модуль, що працює під керуванням операційної системи Windows. Програмну реалізацію виконано з використанням середовища розробки Borland Delphi 7.0.

Головне вікно програми подано на рис. 3.3. У ньому відображається інформація про поточні параметри системи в цілому, а також характеристики окремих її елементів.

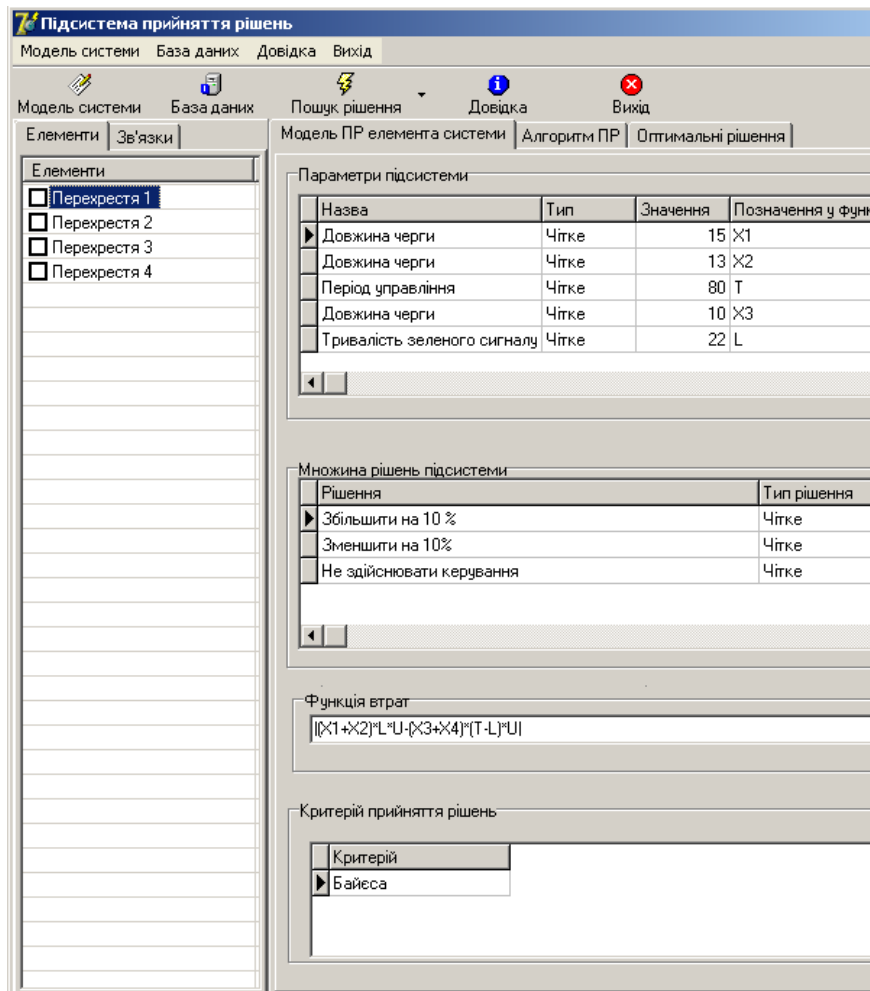
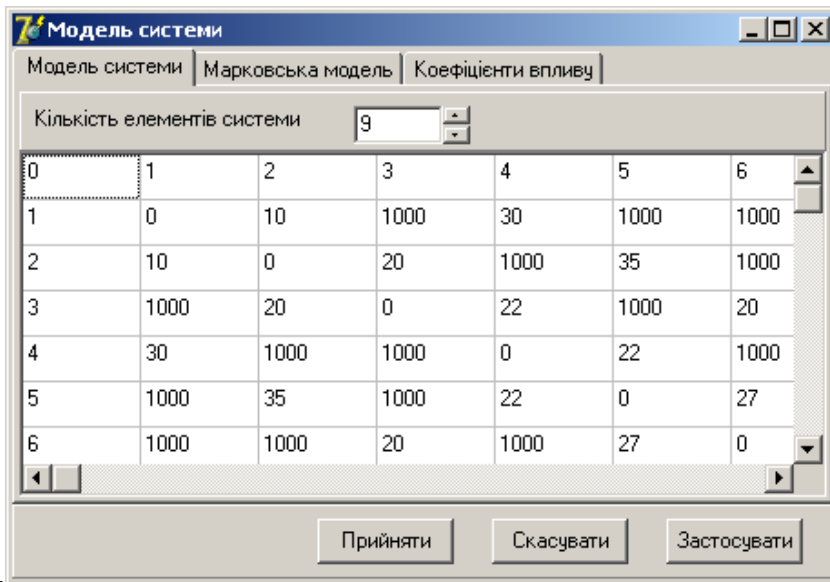


Рис. 3.3. Головне вікно програми

Для задання структурної та марковської моделей системи, а також введення коефіцієнтів впливу між підсистемами розроблено спеціальну форму, зображену на рис. 3.4. Адміністратор системи встановлює параметри створених моделей відповідно до особливостей конкретного об'єкта керуван-



ня.

Рис. 3.4. Вікно введення параметрів моделі

Програмний комплекс забезпечує взаємодію з базами даних через інтерфейс OleDb, що надає можливість використовувати більшість реляційних СУБД для зберігання та обробки інформації.

Як систему керування базами даних обрано InterBase, оскільки вона підтримує розподілену архітектуру, має розвинені засоби роботи з даними, не потребує значних обчислювальних ресурсів і поширюється на безоплатній основі. Реалізацію запропонованої концептуальної моделі бази даних виконано з використанням програмного засобу IBExpert (рис. 3.5).

Одним із способів надходження інформації для процесу прийняття рішень є використання даних, що зберігаються безпосередньо в базі даних. Для цього передбачено спеціальний редактор БД, зображений на рис. 3.6, який дає змогу змінювати вміст таблиць із подальшим збереженням результатів. Щоб оновлені дані стали доступними для використання в програмі, необхідно скористатися пунктом меню «Оновити дані» у головному вікні.

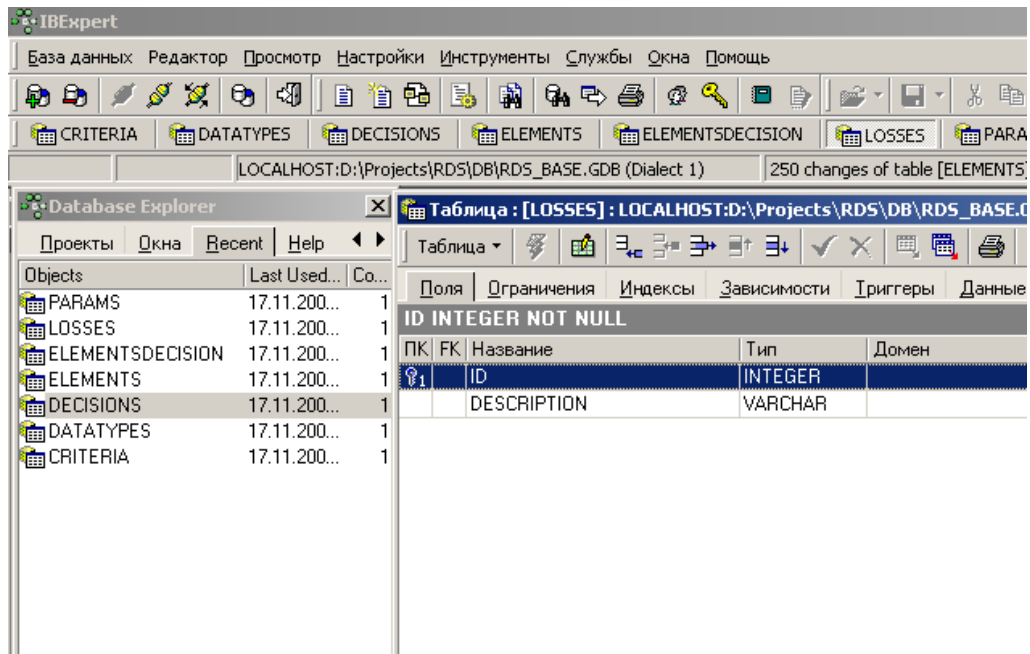


Рис. 3.5. Створення БД за допомогою програми IVExpert

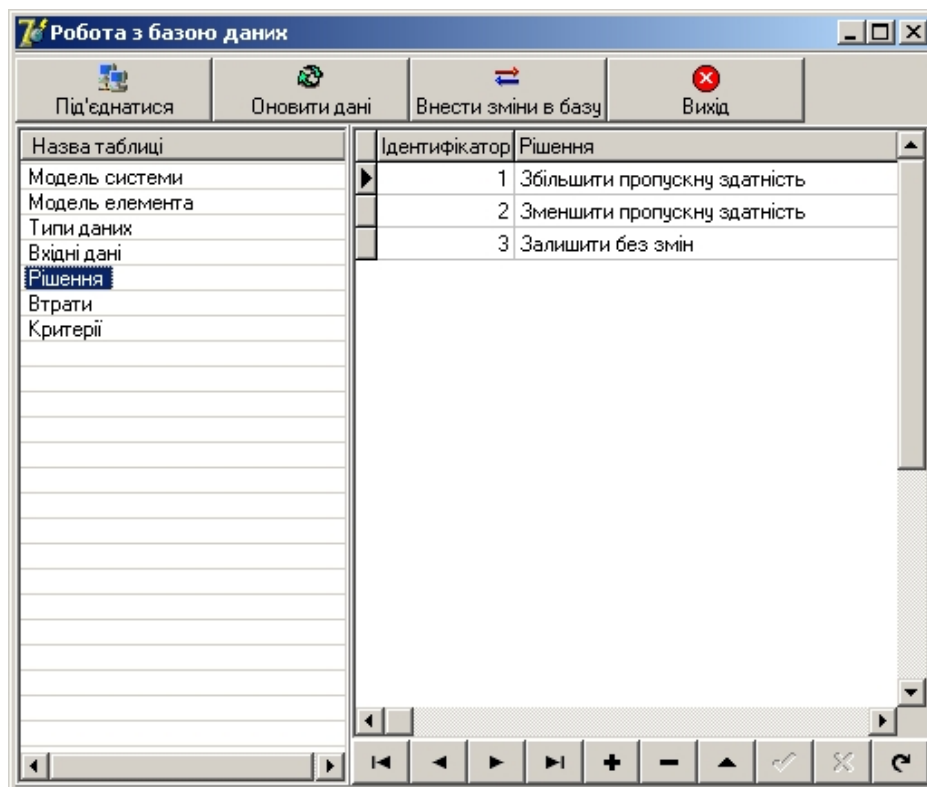


Рис. 3.6. Редактор БД

Результат ПР відображається на закладці «Оптимальні рішення» головного вікна програми (рис. 3.7).

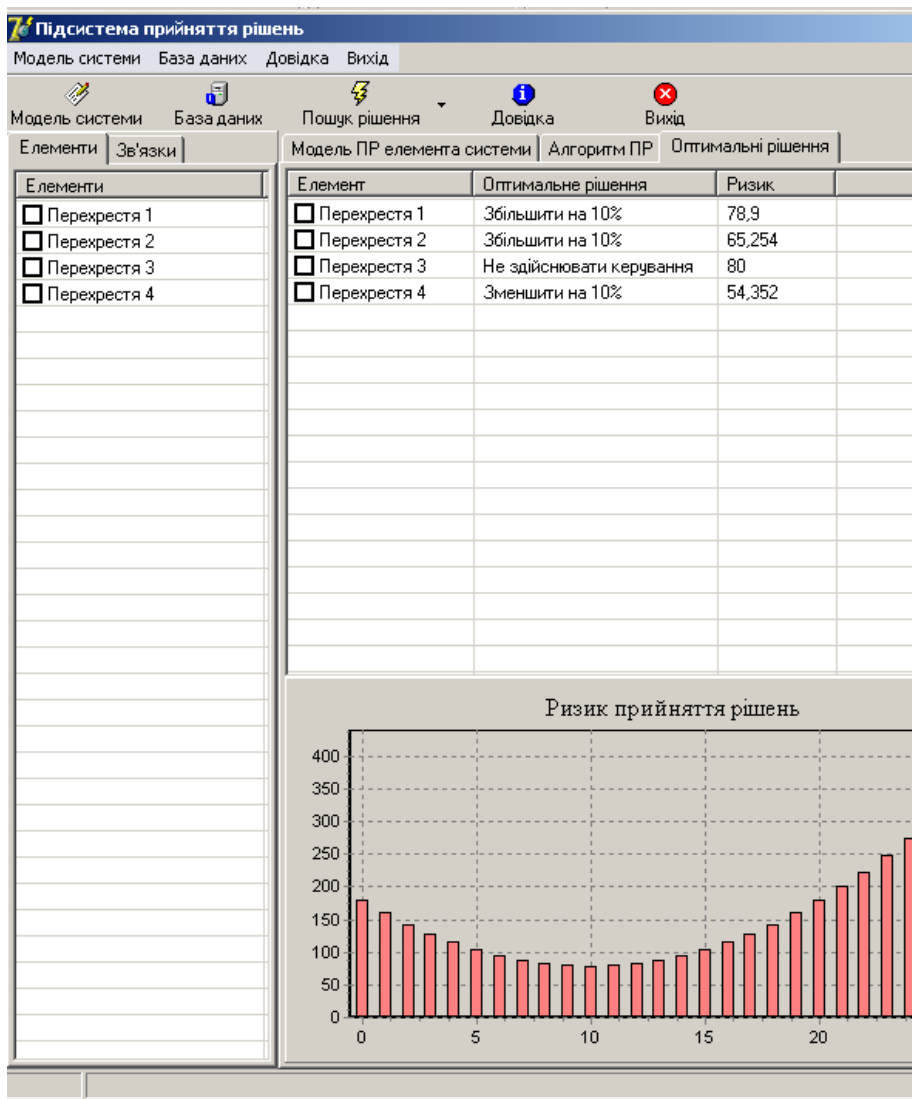


Рис. 3.7. Оптимальне рішення

Отже, створене програмне забезпечення забезпечує практичну реалізацію запропонованої інформаційної технології прийняття рішень у розподілених динамічних системах і надає можливість визначати оптимальні керуючі рішення як для окремих елементів розподіленої системи, так і для системи в цілому.

3.2. Прийняття рішень при керуванні транспортними потоками міста

3.2.1. Структурна схема системи управління транспортними потоками.

Структурну схему системи керування транспортними потоками подано на рис. 3.8.

Запропонована система має ієрархічну організацію, оскільки керування

здійснюється на кількох рівнях — від окремого перехрестя до всієї транспортної мережі. Регулювання транспортних потоків реалізується шляхом зміни пропускної спроможності перехресть у відповідних напрямках руху.

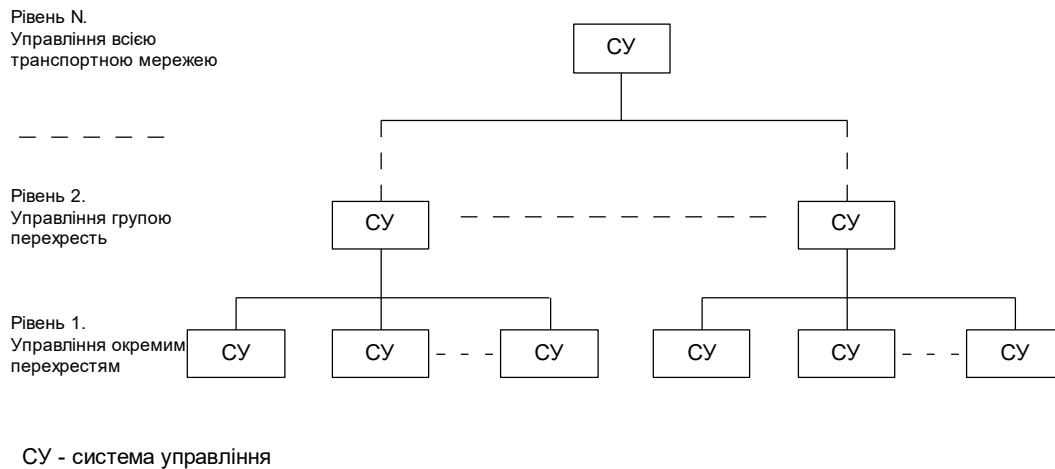


Рис. 3.8. Структурна схема ієрархічної системи управління ТП

Визначимо основні складові задачі керування транспортними потоками шляхом вибору режимів роботи світлофорів, розглядаючи її як задачу прийняття рішень. Множина можливих рішень D визначається, виходячи з послідовності зміни станів світлофора. Нехай маємо послідовність зміни станів $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ з відповідними тривалостями $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$. Тривалості сигналів світлофорів повинні задовольняти обмеженням $\alpha_i \geq A_i$, де гранична тривалість A_i визначається часом подолання перехрестя транспортним засобом з мінімальною рекомендованою швидкістю (тривалість A_i станів, при яких дозволений рух пішоходів, визначається часом переходу через проїжджу частину). З урахуванням обмежень множина D включає рішення для кожного з n станів: «залишити без змін», «збільшити на $p\%$ » та «зменшити на $p\%$ ». У якості функції втрат приймаємо сумарний час затримки транспортних засобів на перехрестях. Якщо РДС складається з M перехресть, середня довжина черги на кожному перехресті \bar{v}_i , середній час очікування $\bar{\omega}_i$, то функція втрат

$$g = \sum_{i=1}^M \bar{v}_i \cdot \bar{\omega}_i. \quad (3.1)$$

Параметрами стану розподіленої динамічної системи є інтенсивності транс-

портних потоків між перехрестями та довжини черг на перехрестях.

3.2.2. Знаходження коефіцієнтів впливу марковської моделі транспортної мережі. Побудуємо функціональну модель перехрестя для визначення вагових коефіцієнтів марковської моделі c_{vij}^{lh} .

Систему керування перехрестям можна моделювати як сукупність систем масового обслуговування (СМО), де кожна СМО обслуговує власний транспортний потік. Кількість потоків з одного напрямку відповідає числу можливих маневрів: поворот праворуч, поворот ліворуч, рух прямо.

Для довільного перехрестя інтенсивність вихідного потоку окремого напрямку визначається як сума інтенсивностей відповідних вхідних потоків.

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^n \lambda_{ij}, \quad (3.2)$$

де λ_j – кількість транспортних засобів, які за цикл керування світлофора проїдуть в напрямку j -го суміжного перехрестя; λ_{ij} – кількість транспортних засобів, які за цикл керування світлофора обслуговуються i -м каналом; n – кількість каналів, що обслуговує запити до j -го перехрестя.

Інтенсивність вихідного потоку коригується у сторону зменшення за допомогою інтенсивностей обслуговування

$$\mu_i = \frac{t_i}{t_{np} \cdot T}, \quad (3.3)$$

де t_i – тривалість зеленого сигналу для i -го напрямку; t_{np} – середній час, необхідний для проїзду перехрестя транспортним засобом; T – одиниця часу.

Вважатимемо, що значення t_{np} є однаковим для кожного з напрямків. Інтенсивності обслуговування потоків на одному перехресті відповідають обмеженням:

$$\begin{cases} 1 \leq \mu_A \leq \frac{T - t_B - t_C}{T \cdot t_{npA}}; \\ 1 \leq \mu_B \leq \frac{T - t_A - t_C}{T \cdot t_{npB}}; \\ 1 \leq \mu_C \leq \frac{T - t_A - t_B}{T \cdot t_{npC}}; \\ t_A + t_B + t_C = T. \end{cases} \quad (3.4)$$

Незважаючи на те, що на практиці потоки транспорту між перехрестями можуть коливатися, здебільшого їхня інтенсивність залишається стабільною. Відповідно, зміна інтенсивності обслуговування на одному перехресті прямо впливає на вхідний потік на сусідніх перехрестях, що дозволяє ефективно контролювати довжину черг та параметри руху на віддалених ділянках транспортної мережі. Для одноканальної СМО середній час очікування заявки у черзі $\bar{\omega}$ і середня довжина черги \bar{v} визначається співвідношеннями [4]:

$$\bar{\omega} = \frac{\frac{\lambda}{\mu}}{1 - \frac{\lambda}{\mu}}; \quad \bar{v} = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2}{1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)}. \quad (3.5)$$

Тоді середня довжина черги і час очікування для перехрестя визначатиметься як сума відповідних величин для кожного напрямку:

$$\bar{\omega}_n = \sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i; \quad \bar{v}_n = \sum_{i=1}^n \bar{v}_i, \quad (3.6)$$

де $\bar{\omega}_n$ – середній час очікування транспортного засобу на перехресті; \bar{v}_n – середня кількість транспортних засобів на перехресті; n – кількість напрямків перехрестя.

Відмітимо, що для даної СМО закон розподілу довжин черги за формою подібний до експоненційного і описується формулою

$$p_v = \rho^v \cdot (1 - \rho), \quad (3.7)$$

де p_v – ймовірність знаходження у черзі i -ї кількості ТЗ; $\rho = \lambda / \mu$.

Марковський процес зміни стану v_n є процесом загибелі та розмноження [4]. Модель такого процесу дозволяє виразити p_v через інтенсивності потоків, що дозволяє знайти коефіцієнти c_{vij}^{lh} .

3.2.3. Розрахунок параметрів алгоритму прийняття рішення при управлінні транспортними потоками.

Алгоритм прийняття рішень (ПР) для керування транспортними потоками міста базується на узагальненому алгоритмі ПР для розподілених динамічних систем (РДС). Розглянемо етапи, специфічні для транспортних систем.

1. Визначення часу поширення взаємного впливу підсистем РДС. Підсистемами транспортної мережі є перехрестя, які взаємодіють через транспортні потоки. Для побудови марковської моделі необхідно визначити параметри впливу, зокрема затримку розповсюдження впливу τ .

2. Прогнозування інтенсивності прибуття транспортних засобів. Для прогнозу інтенсивності вхідного потоку на перехрестя в певному напрямку враховують попередні значення цього параметра та впливові фактори, зокрема інтенсивності потоків на суміжних і більш віддалених перехрестях. Для оцінки інтенсивності прибуття транспортних засобів застосовується регресійна модель, що дозволяє передбачити зміну потоку на основі історичних даних та стану мережі.

$$\lambda(t) = \tilde{\lambda}(t) + \varepsilon, \quad (3.8)$$

де $\lambda(t)$ – реальне значення інтенсивності; $\tilde{\lambda}(t)$ – значення інтенсивності, отримане за допомогою рівняння регресії; ε – випадкова величина, що характеризує вплив неврахованих факторів.

Оскільки на інтенсивність потоку на даному перехресті впливають потоки на інших перехрестях, взаємозв'язок між ними описується за допомогою моделі багатовимірної регресії, яку можна подати у вигляді:

$$\tilde{\lambda}(t) = b_0 + b_1 \cdot \lambda_1(t - \tau_1) + b_2 \cdot \lambda_2(t - \tau_2) \dots + b_m \cdot \lambda_m(t - \tau_m), \quad (3.9)$$

де b_0, \dots, b_m – параметри регресії; $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ – інтенсивності руху інших перехрестях; $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ – тривалість руху за обраним маршрутом від врахованих пере-

ність потоку між перехрестями l і ν , які контролюються технічними засобами або знаходяться методом оцінювання.

Побудова багатокрокової стратегії прийняття рішень

Розглянемо систему керування двома суміжними перехрестями, представлену на рис 3.9.

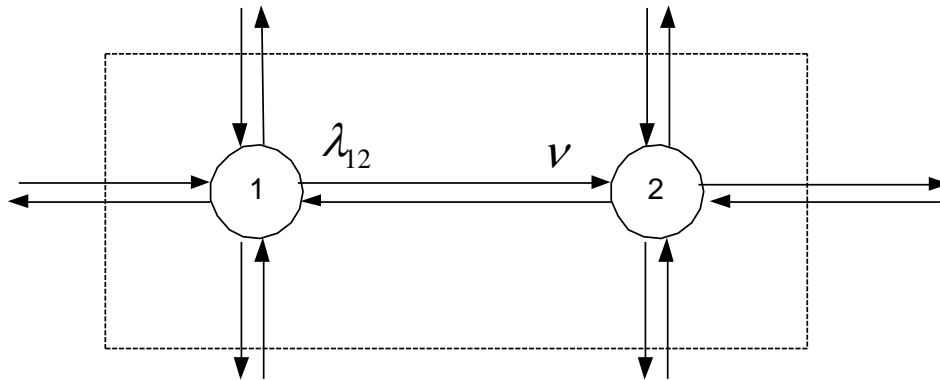


Рис. 3.9. Схема системи керування суміжними перехрестями

Структурну схему системи керування двома перехрестями можна представити у вигляді, показаному на рис. 3.10.

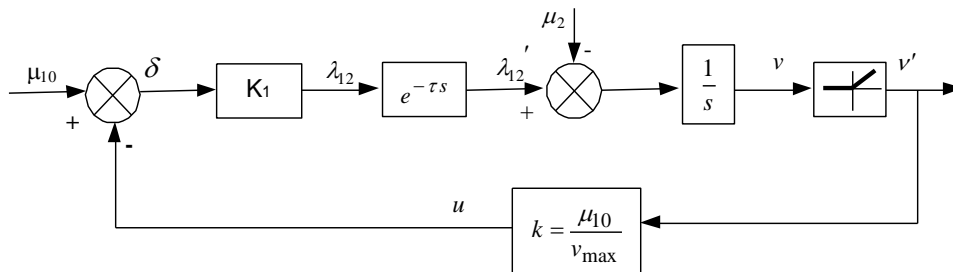


Рис. 3.10. Структурна схема системи керування

Вхідною величиною системи керування є початкова інтенсивність обслуговування на першому перехресті μ_{10} , яка безпосередньо впливає на інтенсивність вихідного потоку першого перехрестя. У випадку перехрестя з трьома напрямками вихідна величина розраховується за формулою

$$\lambda_{12} = \lambda_1 + \lambda_2 \leq \frac{t_1}{t_{np} \cdot T} + \frac{T - t_1}{t_{np} \cdot T}, \quad (3.14)$$

де T – тривалість циклу керування;

Для перехрестя з кількома напрямками час, відведений на проїзд, може змінюватися обернено пропорційно до зміни величини L з урахуванням умови

$$T = \sum_{i=1}^n t_i . \quad (3.15)$$

Відрізок транспортної мережі між перехрестями можна моделювати як ланку з чистим запізнюванням. Така ланка затримує подачу вхідної величини в часі, не змінюючи її значення. У більшості випадків ланка з запізнюванням досить точно відображає динаміку транспортного потоку.

$$W(s) = e^{-\tau s} , \quad (3.16)$$

де τ – час затримки.

Для другого перехрестя системи на схемі передбачені суматор, інтегрувальна ланка та нелінійний елемент.

Вихідним параметром другого перехрестя є довжина черги перед перехрестям, яка визначається як інтеграл різниці між інтенсивністю прибуття транспортних засобів та інтенсивністю їх обслуговування.

$$v = \int_0^t (\lambda_{12} - \mu_2) dt . \quad (3.17)$$

На основі величини черги здійснюється керування на першому перехресті. Для цього використовується пропорційний регулятор, в якому поточна довжина черги множиться на коефіцієнт пропорційності

$$u = v \cdot \frac{\mu_{10}}{v_{\max}} , \quad (3.18)$$

де v_{\max} – максимально допустима величина черги.

Очевидно, що максимально допустима величина черги не може перевищувати відстані між перехрестями. Якщо довжина черги дорівнює нулю, то управління теж дорівнює нулю. При максимальній довжині черги управління дорівнює

інтенсивності обслуговування на першому перехресті. В цій ситуації нове значення інтенсивності обслуговування дорівнює нулю. Оскільки довжина черги не може бути від'ємною, то для відсікання від'ємних значень інтегрального елемента використовується нелінійний елемент з функцією, наведеною на рис. 3.11.

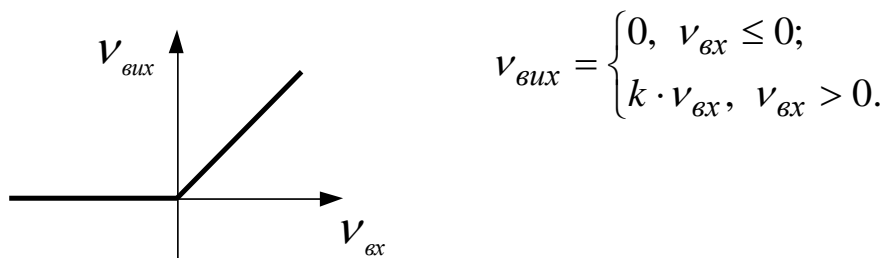


Рис. 3.11. Залежність між вхідною і вихідною величиною нелінійного елемента

Для розглянутої системи керування $k = 1$.

Один із шляхів отримання передаточної функції полягає у розв'язанні системи рівнянь

$$\begin{cases} \delta = \mu_{10} - u; \\ \lambda_{12} = k_1 \cdot \delta; \\ \lambda'_{12} = \lambda_{12} \cdot e^{-\tau s}; \\ v = (\lambda'_{12} - \mu_2) \cdot \frac{1}{s}; \\ v' = k \cdot v; \\ u = v' \cdot \frac{\mu_{10}}{V_{\max}}. \end{cases} \quad (3.19)$$

Оскільки нестійкість системи виникає лише при наявності черги, для визначення границі стійкості нелінійний елемент можна не враховувати.

Отже, для системи з двох перехресть стратегія прийняття рішень може спиратися на одне рішення відповідно до моделі динаміки.

Аналіз стійкості системи.

Через наявність у передаточній функції ланки з запізнюванням показникової функції алгебраїчні критерії не застосовні. Для оцінки стійкості систем управління із запізнюванням використовуються метод τ -розбиття та частотні критерії Ми-

хайлова і Найквіста.

Згідно з критерієм Найквіста, для стійкості замкнутої системи з запізнюванням необхідно і достатньо, щоб амплітудно-фазова характеристика стійкої розімкнутої системи не охоплювала критичну точку. Якщо годограф системи проходить через критичну точку $(-1; j0)$, то система знаходиться на границі стійкості. Приклад побудови областей стійкості системи показано на рис.3.12.

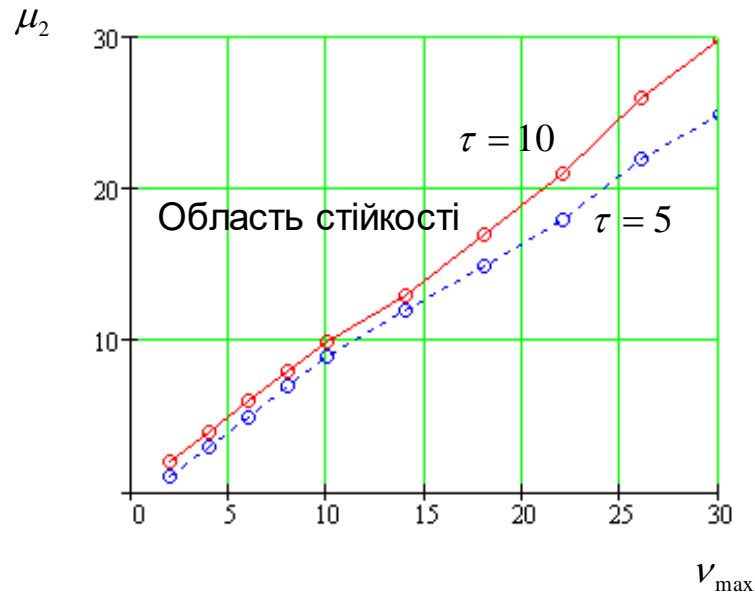


Рис. 3.12. Розбиття області параметрів системи керування

Таким чином, в результаті побудови системи моделей РДС транспортних потоків отримуються усі компоненти задачі прийняття рішення.

4 ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ КЕРУВАННІ ЕЛЕВАТОРАМИ

4.1. Структурна схема системи управління елеватором

Для організації системи керування елеватором доцільно застосувати ієрархічну структуру, оскільки управління здійснюється на різних рівнях.

На нижньому рівні, що відповідає окремим силосам, здійснюється вимірювання температури зерна та приймається рішення про керування. Можливі два варіанти:

1. Кондиціонування силосу за допомогою вбудованих вентиляторів.
2. Пересипання зерна в інший силос, що забезпечує його охолодження та зволоження.

Рішення про пересипання зерна має узгоджуватися на вищому рівні, оскільки можливості пересипання обмежені. Таким чином, перший рівень визначає метод охолодження зерна при підвищенні температури. Якщо обрано пересипання, другий рівень аналізує рішення всіх силосів, враховуючи вільний об'єм, який обмежує пересипання.

Структурна схема системи управління елеватором наведена на рис. 4.1. Варто відзначити, що структура схожа на систему керування транспортними потоками, що демонструє подібність задач в розподілених системах та методів управління, які в них застосовуються.

С – сенсор температури; ПУ – пристрій управління; К – контролер; ЛК – локальний контролер; ЦУ – центр управління.

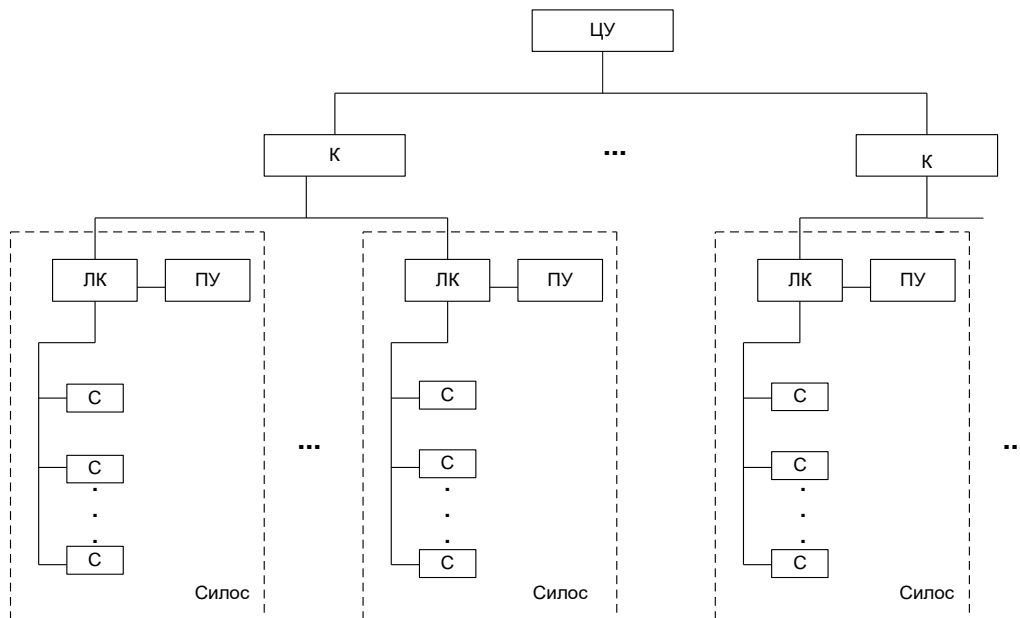


Рис. 4.1. Структурна схема системи управління елеватором

4.2. Модель прийняття рішення в управлінні елеватором

Розглянемо особливості застосування узагальненого алгоритму прийняття рішень у РДС для керування елеватором. Такий алгоритм реалізує процесний підхід, що передбачає періодичне виконання процедур прийняття рішень.

На початковому етапі визначаються ключові фактори, від яких залежить якість рішень та періодичність їх контролю. При зберіганні зерна на його якість впливають багато факторів, найбільш значущими є температура та вологість.

У практичних системах управління елеватором вологість часто не враховується, оскільки її вимірювання в силосі пов'язане зі значними труднощами. Пропонується побудова моделі прийняття рішень, яка враховує обидва фактори: температуру та вологість. Вхідним параметром системи є температура, виміряна у різних точках силосу.

В задачі керування елеватором множина рішень D буде складатися з трьох значень для кожного силосу: d_1 – не здійснювати керування; d_2 – пересипати зерно; d_3 – увімкнути кондиціонування (якщо передбачено конструкцією силосу).

В якості критерію прийняття рішень використаємо значення ризику, записане

в системі узагальнюючих функцій

$$R(d) = \sum_{t^\circ \in T} \sum_{\gamma \in H} G(t^\circ, \gamma, d) \beta(t^\circ / \gamma) \beta(\gamma), \quad (4.1)$$

де d – рішення з множини можливих рішень D ; $G(t^\circ, \gamma, d)$ – функція втрат;
 $\beta(t^\circ / \gamma)$ – функція появи температури t° за умови, що значення вологості дорівнює γ . Функція $\beta(t^\circ / \gamma)$ будується на основі статистичних даних для конкретного елеватора.

Представимо функцію втрат у вигляді суми втрат від неоптимальних параметрів зберігання зерна і витрат на реалізацію даного керування:

$$G = G_3 + G_{кер}, \quad (4.2)$$

де G – загальні втрати; G_3 – втрати від псування за наявності керування;
 $G_{кер}$ – витрати на реалізацію керування.

Аналітичний вираз функції втрат $G_3(t^\circ, \gamma)$ зазвичай визначається експертно залежно від типу зернової культури.

Оскільки при пересипанні та кондиціонуванні температура і вологість змінюються залежно від тривалості керування, побудуємо модель динаміки цих рішень.

Для СППР елеватора множина рішень складається з неоднорідних елементів з різним фізичним змістом, що ускладнює подання залежності між рішеннями та температурою зерна через єдину передаточну функцію. Тому зв'язок буде описаний окремо для кожного рішення.

Беручи до уваги інерційність зміни параметрів [5], пересипання та кондиціонування реалізуємо через інерційні ланки, як показано на рис. 4.2. Це дозволяє врахувати поступове реагування системи на вплив керуючих дій.

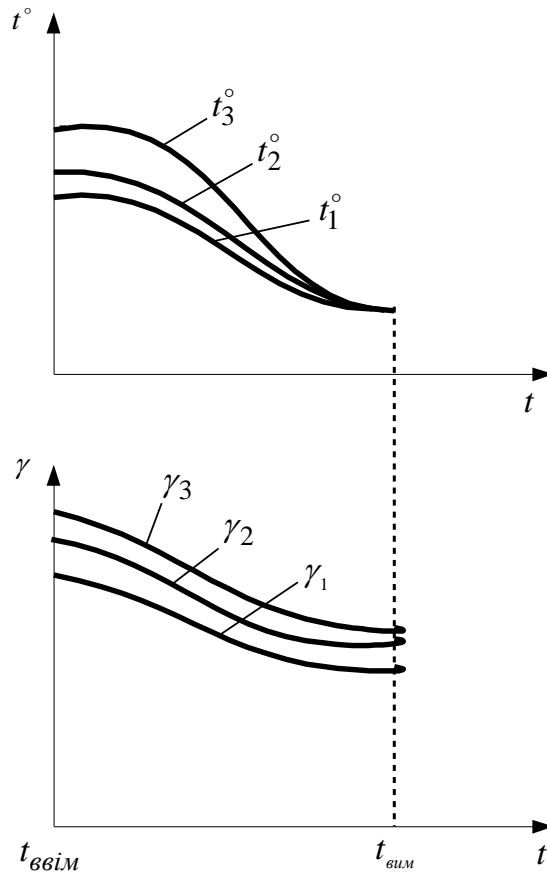


Рис. 4.2. Динаміка зміни параметрів зерна

Рішенню "не здійснювати керування" відповідає пропорційна ланка з коефіцієнтом пропорційності рівним одиниці.

Отже, залежність між входом і виходом системи має вигляд, представлений на рис. 4.3.

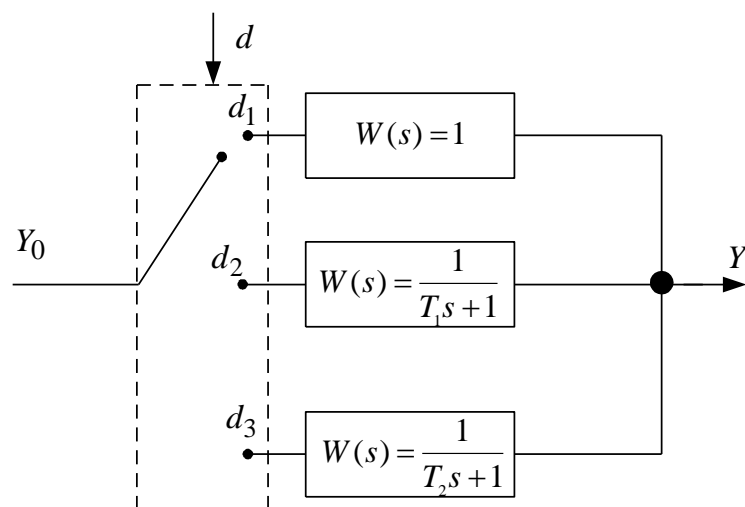


Рис. 4.3. Модель динаміки системи

Для рішень типу «пересипати зерно» необхідно враховувати динамічні характеристики системи, оскільки реалізація цього рішення займає тривалий час і передбачає використання спільних ресурсів, зокрема транспортного обладнання.

При прийнятті рішення про пересипання слід брати до уваги не менше двох факторів: тип зернової культури в силосі та доступну масу зерна, яку можна завантажити в обраний силос.

Множину можливих альтернатив пересипання зручно подати у вигляді графа, як показано на рис. 4.4, де вершини відповідають силосам, а ребра — можливим шляхам переміщення зерна.

Відзначимо, що рішення d_2 є векторним, оскільки пересипання можливе в декілька силосів.

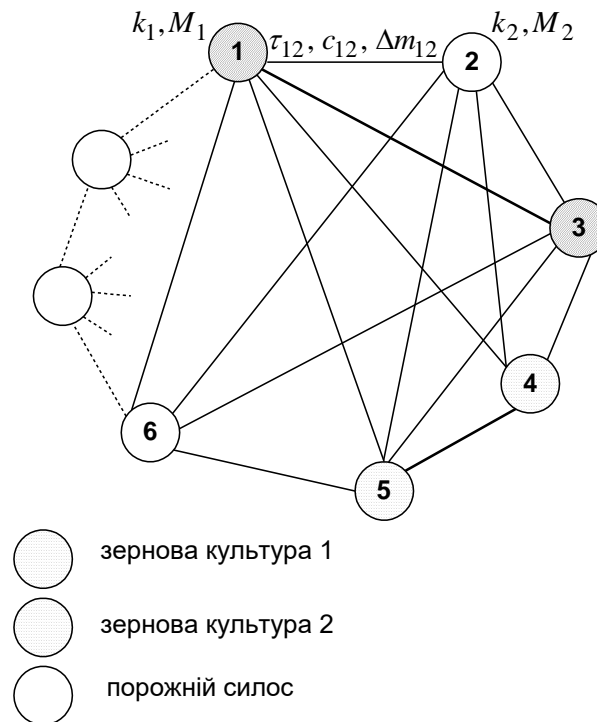


Рис. 4.4. Альтернативи пересипання

У витратах на керування виділимо витрати на кондиціонування $G_{\text{конд}}$ та витрати на пересипання зерна $G_{\text{трансп}}$

$$G_{\text{рег}} = G_{\text{конд}} + G_{\text{трансп}} \quad (4.3)$$

Витрати на кондиціонування складаються з витрат на електроенергію, необ-

хідну для вдування повітря в силос

$$G_{\text{конд}} = t \cdot c, \quad (4.4)$$

де t – час кондиціонування; c – вартість електроенергії, що витрачається на кондиціонування за одиницю часу.

Витрати на пересипання залежать від відстані між силосами, об'ємів зерна, що транспортується, та вартості транспортування одиниці маси

$$G_{\text{трансп}} = c \cdot l \cdot \frac{m}{M}, \quad (4.5)$$

Слід зазначити, що на виході силосу часто немає прямої можливості вимірювання маси зерна, яке пересипається, тому в багатьох випадках її оцінюють експертним шляхом. Таким чином, модель прийняття рішень для керування процесом зберігання зерна можна представити у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_i(d, t) = \sum_{i^{\circ}} \sum_{\gamma} \left(G_3 \left(f_{t^{\circ}}(t^{\circ}, d, t), f_{\gamma}(\gamma, d, t) \right) \beta(t^{\circ} / \gamma) \beta(\gamma) + d_1 \cdot G_{\text{конд}}(t) + d_2 \cdot G_{\text{трансп}}(t) \right) \rightarrow \min; \\ \sum_i Q_{\text{кер}} \leq Q. \end{array} \right. \quad (4.6)$$

де $R_i(d, t)$ – ризик втрат у i -му силосі при здійсненні керування протягом часу t ; $f_{t^{\circ}}(t^{\circ}, d, t)$, $f_{\gamma}(\gamma, d, t)$ – функції, що описують динаміку зміни температури та вологості при реалізації керування; Q – загальний ресурс на керування елеватором.

У разі пересипання зерна в інший силос модель динаміки системи повинна враховувати параметри обох силосів. Для лінійної динамічної системи багатокрокова стратегія визначається на основі передаточної функції системи. У контексті елеватора підсистемами РДС є силоси, а час розповсюдження впливу між сусідніми підсистемами дорівнює часу пересипання зерна з одного силосу в інший. Значення коефіцієнтів впливу враховує температуру та вологість зерна в силосі.

4.3. Реалізація прийняття рішення в управлінні елеватором

На основі запропонованих моделей та алгоритму розроблено підсистему прийняття рішень системи керування елеватором. Програмне забезпечення підсистеми прийняття рішень призначене для знаходження оптимальних рішень для керування технологічним процесом зберігання зерна.

На рис. 4.5 наведено головне вікно програми, в якому відображається інформація, завантажена з БД СППР елеватора.

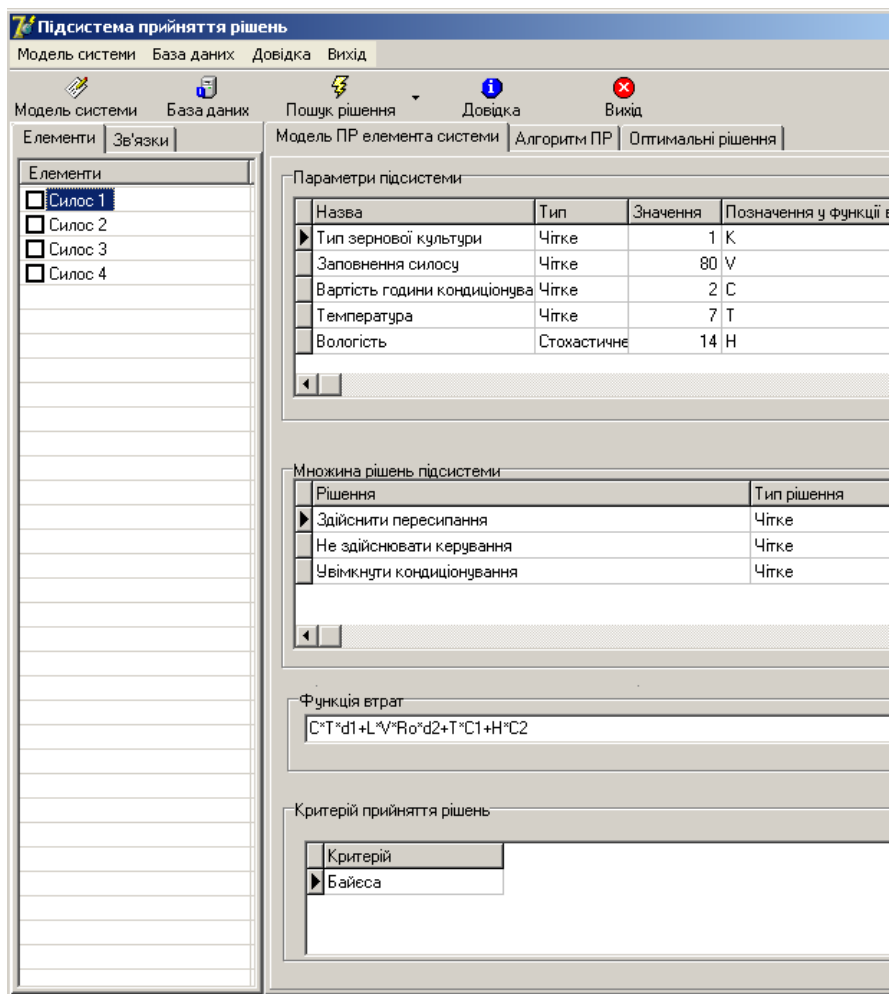


Рис. 4.5. Використання програмного забезпечення для прийняття рішення в управлінні елеватором

4.4. Дослідження ефективності інформаційної технології

Проаналізуємо результативність удосконаленої інформаційної технології шляхом порівняння якості рішень, отриманих із застосуванням запропонованих

методів, теорії масового обслуговування та нечіткої логіки, на прикладі задачі керування перехрестям. Схему перехрестя подано на рис. 4.6.

Задача керування перехрестям з одностороннім рухом полягає у виборі режимів роботи світлофора, які забезпечують мінімальні часові затримки транспортних засобів під час проїзду перехрестя.

Вхідними величинами задачі є :

- λ_1 – інтенсивність прибуття ТЗ справа;
- λ_2 – інтенсивність прибуття ТЗ на перехрестя по центру.

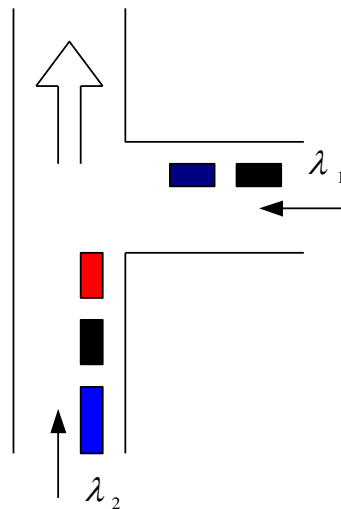


Рис. 4.6. Схema перехрестя

Вихідним параметром є час $\{t_1, t_2\}$, протягом якого повинно горіти зелене світло для кожної із сторін. Для даної величини є справедливими співвідношення:

$$\begin{aligned} t_1 + t_2 &= T; \\ t_1 &\in [0, T], \quad t_2 \in [0, T], \end{aligned} \quad (4.7)$$

де T – інтервал регулювання.

Виходячи з умови задачі, побудуємо моделі ПР для кожного підходу.

4.4.1. Модель прийняття рішення з використанням теорії статистичних рішень.

За умови застосування теорії систем масового обслуговування вхідна інформація подається у вигляді пуассонівських законів розподілу, які описують імовірність появи певної кількості транспортних засобів на перехресті протягом оди-

ниці часу, тобто визначають інтенсивність вхідного транспортного потоку. Нехай A – число ТЗ, які прибувають на перехрестя справа. Тоді ймовірність появи ТЗ справа має вигляд

$$P(A) = \frac{(\lambda_1 \cdot t)^A}{A!} \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t}, \quad (4.8)$$

де λ_1 –інтенсивність появи ТЗ справа.

Нехай Q – кількість ТЗ, що прибувають на перехрестя по центру. Ймовірність появи ТЗ по центру визначається законом

$$P(Q) = \frac{(\lambda_2 \cdot t)^Q}{Q!} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t}, \quad (4.9)$$

Оскільки значення інтенсивностей між собою не корелюють, кількість транспортних засобів у правому напрямку та в центральній частині можна вважати взаємно незалежними випадковими величинами.

Для вибору керуючого впливу застосуємо байєсівський критерій, який формалізує процедуру прийняття рішень з урахуванням імовірнісних характеристик станів системи та можливих наслідків рішень і може бути поданий у відповідному аналітичному вигляді:

$$R(d) = \iint G(d, A, Q) \cdot P(A, Q) dA dQ, \quad (4.10)$$

де $R(d)$ – середній ризик від прийняття рішення d ; $P(A, Q)$ – ймовірність спільної появи конкретних значень величин A і Q ; $G(d, A, Q)$ – функція втрат, яка характеризує втрати від прийняття рішення d при заданих значеннях A і Q .

Скористаємося функцією втрат, що складається з двох складових, кожна з яких відповідає окремому транспортному потоку. Кожна складова подається у вигляді добутку двох коефіцієнтів: перший визначається як відношення кількості транспортних засобів, що прибули на перехрестя, до кількості тих, що його залишили, а другий — як відношення часу очікування транспортних засобів до часу їх проїзду через перехрестя. Виходячи з цього, функція втрат має наступний вигляд

$$G(d, A, Q) = \frac{A}{t'} \cdot \left(\frac{T - t'}{t'} \right) + \frac{Q}{T - t'} \cdot \left(\frac{t'}{T - t'} \right), \quad (4.11)$$

де $t' = \alpha_t \cdot (1 + 0,1 \cdot d)$; α_t – попередня тривалість зеленого сигналу.

Рішення вважається оптимальним, якщо йому відповідає мінімальний ризик.

4.4.2. Модель прийняття рішення з використанням теорії масового обслуговування. Задачу керування перехрестям доцільно формалізувати в межах теорії масового обслуговування. Перехрестя в цьому випадку розглядається як одноканальна система масового обслуговування без відмов з необмеженою довжиною черги. Вхідний потік формується двома різнорідними потоками транспортних засобів. Припускається, що обидва потоки мають пуассонівський характер, а ймовірність надходження заявок протягом проміжку часу t визначається відповідними відомими співвідношеннями.:

$$P(A) = \frac{(\lambda_1 t)^A}{A!} \cdot e^{-\lambda_1 t}, \quad P(Q) = \frac{(\lambda_2 t)^Q}{Q!} \cdot e^{-\lambda_2 t}, \quad (4.12)$$

де λ_1, λ_2 – інтенсивності потоків.

Позначимо через T часовий інтервал регулювання. Величину інтервалу t_1 і t_2 можна визначити наступним чином

$$t_1 = \alpha \cdot T, \quad t_2 = (1 - \alpha) \cdot T,$$

Важливою характеристикою СМО є інтенсивність обслуговування m , яка характеризує кількість обслужених заявок за одиницю часу. Якщо задати середній час обслуговування однієї заявки (час проїзду перехрестя транспортним засобом) Δt , то можна визначити інтенсивність обслуговування для кожного з потоків:

$$m_1 = \frac{t_1}{\Delta t} = \frac{\alpha \cdot T}{\Delta t}, \quad m_2 = \frac{t_2}{\Delta t} = \frac{(1 - \alpha) \cdot T}{\Delta t}. \quad (4.13)$$

Позначимо інтенсивність завантаження каналу від кожного потоку $\rho_i = \frac{\lambda_i}{m_i}$,

тоді загальна інтенсивність дорівнює $\rho_0 = \sum_{i=1}^2 \rho_i$. Система буде працювати в установленому режимі тільки за умови $\rho_0 < 1$.

За відомими значеннями інтенсивностей вхідних потоків і інтенсивностей обслуговування можливо оцінити середню довжину черги та середній час очікування однієї заявки окремо для кожного потоку.

Середній час перебування заявки в черзі для відповідного потоку визначається за стандартними аналітичними співвідношеннями теорії масового обслуговування:

$$\bar{t}_{01} = \frac{1}{m_1} \cdot \frac{\rho_1}{1 - \rho_1}, \quad \bar{t}_{02} = \frac{1}{m_2} \cdot \frac{\rho_2}{1 - \rho_2}. \quad (4.14)$$

Обчислимо середню кількість заявок для кожного потоку:

$$\bar{r}_1 = \lambda_1 \cdot \bar{t}_{01}, \quad \bar{r}_2 = \lambda_2 \cdot \bar{t}_{02}. \quad (4.15)$$

Тоді втрати кожного потоку дорівнюють добутку середнього часу очікування однієї заявки і середньої кількості заявок у черзі.

$$t_{em1} = \bar{t}_{01} \cdot \bar{r}_1, \quad t_{em2} = \bar{t}_{02} \cdot \bar{r}_2. \quad (4.16)$$

Загальні втрати системи будуть дорівнювати сумі втрат кожного з потоків. Враховуючи формули (4.15)–(4.16), загальні втрати будуть мати вигляд

$$G = \lambda_1 \cdot \left(\frac{\Delta t}{\alpha \cdot T} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \Delta t}{\alpha \cdot T - \lambda_1 \cdot \Delta t} \right)^2 + \lambda_2 \cdot \left(\frac{\Delta t}{(1 - \alpha) \cdot T} \cdot \frac{\lambda_2 \cdot \Delta t}{(1 - \alpha) \cdot T - \lambda_2 \cdot \Delta t} \right)^2. \quad (4.17)$$

Отже, задача вибору оптимального режиму керування перехрестям формулюється як задача мінімізації сумарних втрат за обраним критерієм α .

4.4.3. Модель прийняття рішення з використанням нечіткої логіки.

У разі застосування нечіткої логіки вхідна інформація задається у формі лінгвістичних змінних, кожна з яких описується набором відповідних термів. При цьому вхідні лінгвістичні змінні набувають таких значень:

“інтенсивність прибуття ТЗ, справа”

$\lambda_1 = \{ \text{“дуже мала”, “мала”, “середня”, “велика”, “дуже велика”} \};$

“інтенсивність прибуття ТЗ по центру”.

$\lambda_2 = \{ \text{“дуже мала”, “мала”, “середня”, “велика”, “дуже велика”} \};$

Вихідний параметр “час до відключення зеленого сигналу світлофора” приймає значення $d = \{ \text{“дуже малий”, “малий”, “середній”, “великий”, “дуже великий”} \}$. Функції належності вхідних величин мають форму закону розподілу ймовірностей Пуассона. Функції належності вихідної змінної мають форму, яка відповідає нормальному закону розподілу ймовірностей.

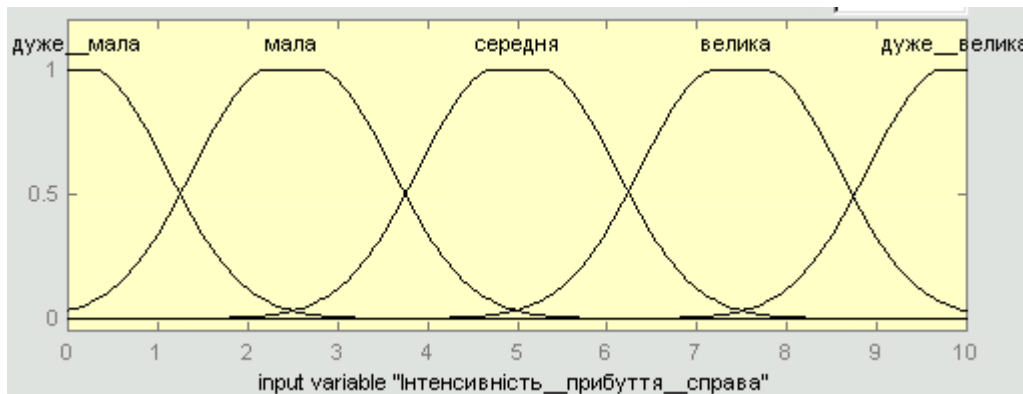


Рис. 4.7. Функції належності змінної “інтенсивність прибуття ТЗ справа”

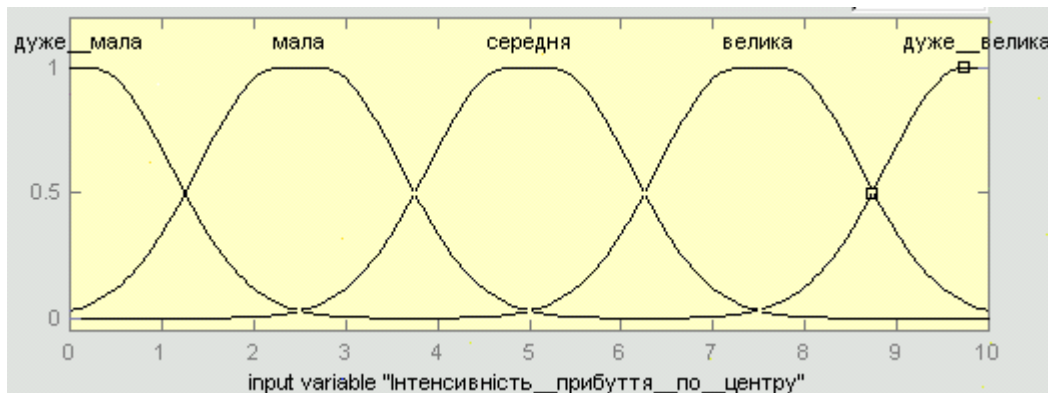


Рис.4. 8. Функції належності змінної “інтенсивність прибуття ТЗ по центру”

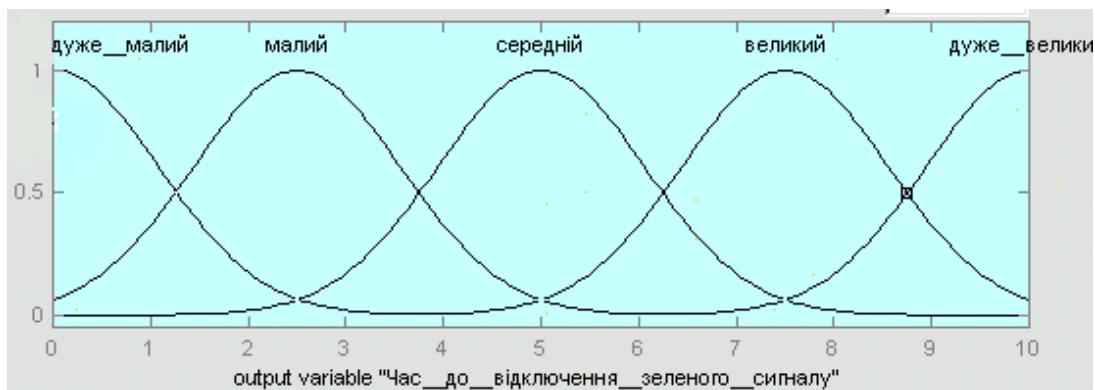


Рис. 4.9. Функції належності змінної “час до відключення зеленого сигналу”

Вхідні величини змінюються в таких діапазонах:

- “інтенсивність прибуття ТЗ справа” [0; 10];
- “інтенсивність прибуття по центру [0; 10];
- “Час до відключення зеленого сигналу світлофора” [0;10].

Нечіткий логічний висновок здійснюється за допомогою нечіткої бази знань, яка складається із сукупності правил виду “якщо – то”. Правила вибору рішень наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Нечітка база знань

λ_2	Дуже мала	Мала	Середня	Велика	Дуже велика
λ_1					
Дуже мала	Середній	Дуже малий	Дуже малий	Дуже малий	Дуже малий
Мала	Дуже великий	Середній	Малий	Малий	Малий
Середня	Дуже великий	Середній	Середній	Середній	Малий
Велика	Дуже великий	Великий	Середній	Середній	Середній
Дуже велика	Дуже великий	Великий	Великий	Середній	Середній

Заголовки стовпців відображають інтенсивність надходження транспортних засобів із центрального напрямку, тоді як заголовки рядків відповідають інтенсивності потоку з правого напрямку. У комірках на перетині рядків і стовпців подано значення вихідного параметра — часу до вимкнення зеленого сигналу світлофора.

Критерієм вибору керувального рішення є мінімізація часу простою транспортних засобів на перехресті. Це значення визначається в результаті дефазифікації сформованої нечіткої множини. Для дефазифікації використано метод центра ваги, який описується такою формулою::

$$d = \frac{\sum_i d_i \cdot \mu_d(d_i)}{\sum_i \mu_d(d_i)}, \quad (4.18)$$

Для реалізації нечіткої моделі було застосовано інструментарій Fuzzy Logic Toolbox середовища Matlab, який забезпечує зручні вбудовані засоби для задання,

обробки та аналізу нечітких змінних і правил, а також для виконання операцій фазифікації та дефазифікації.

4.4.4. Тестування моделей. Для перевірки моделі розглянуто два сценарії:

1. Інтенсивність надходження транспортних засобів на перехрестя з обох сторін однакова.
2. Інтенсивності надходжень транспортних засобів з обох сторін різні.

Інтервал регулювання становить $t\Delta$ с.

Результати тестування наведені в таблиці 4.2.

На основі проведених тестів можна оцінити ефективність застосованих методів. Під ефективністю розуміється ступінь відповідності методу таким критеріям: обсяг необхідної інформації для прийняття рішення, складність реалізації, оптимальність отриманого результату та універсальність використання.

Таблиця 4.2

Час зміни сигналу при різних інтенсивностях потоків

Метод	Інтенсивності потоків			
	$\lambda_1 = 0,$ $\lambda_2 = 7$	$\lambda_1 = 7,$ $\lambda_2 = 0$	$\lambda_1 = 6,$ $\lambda_2 = 6$	$\lambda_1 = 3,$ $\lambda_2 = 7$
ТМО	0,1Т	0,9Т	0,5Т	0,4 Т
ТСР (з-н Пуассона)	0,1Т	0,9Т	0,5Т	0,4Т
НЛ	0,101Т	0,87Т	0,5Т	0,292Т

Оцінка ефективності методів прийняття рішень наведена у табл. 4.3

Таблиця 4.3

Оцінка ефективності методів прийняття рішень

Метод	Обсяг необхідної інформації	Складність Реалізації	Оптимальність	Універсальність
ТСР	Великий	Висока	Висока	Висока
ТМО	Середній	Середня	Висока	Низька
НЛ	Великий	Середня	Середня	Висока

Кожен метод має свої переваги та недоліки:

- ТМО – висока точність, середня складність і обсяг інформації, низька універсальність.
- НЛ – висока універсальність, середня точність через складність моделювання.
- ТСР – висока точність і універсальність.

Для запропонованої технології керування перехрестям використано баєсівську модель ПР з функцією втрат, доповнену марковською моделлю та моделлю незбалансованих потоків.

Для оцінки ефективності підходів проведено імітаційне моделювання руху ТЗ у міській транспортній мережі. Алгоритм включає:

1. Представлення транспортної мережі у вигляді графа.
2. Ініціалізацію параметрів світлофорів.
3. Генерацію початкових та кінцевих точок руху ТЗ.
4. Визначення оптимальних маршрутів за алгоритмом Дейкстри.
5. Моделювання руху ТЗ і роботи світлофорів.

Критерієм оптимальності обрано сумарну тривалість руху транспортних засобів у мережі.

Дослідження показали, що для окремого елемента системи результати різних методів прийняття рішень майже не відрізняються. Проте застосування моделей і алгоритмів, запропонованих у дисертації, підвищує оптимальність рішень для групи підсистем та системи в цілому.

Таблиця 4.4

Результати імітаційного моделювання

Кількість елементів	Теорія статистичних рішень, с.	Теорія масового обслуговування, с.	Нечітка логіка, с.	Алгоритм ПР, запропонований в розділі 3, с.
1	65	78	67	70
5	352	383	371	365
10	683	674	681	652
15	1015	1047	1056	974
20	1428	1484	1490	1309
25	1907	1853	1945	1712
30	2581	2536	2615	2173

Графічне представлення результатів моделювання показано на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Результати моделювання

Моделювання керування транспортною мережею показало ефективність розроблених моделей та алгоритмів інформаційної технології прийняття рішень. Запропонований підхід дозволяє підвищити якість рішень у розподілених динамічних системах до 20%, завдяки врахуванню взаємодії елементів, динаміки системи та стохастично-нечіткої невизначеності.

ВИСНОВКИ

На основі розроблених у магістерській роботі моделей, методів та алгоритмів створено інформаційну технологію прийняття рішень для управління розподіленим об'єктом, що охоплює комплекс програмного та інформаційного забезпечення. Інформаційне забезпечення реалізовано через базу даних та інструменти отримання актуальної інформації про стан РДС. Розроблено концептуальну архітектуру інформаційного забезпечення та структуру бази даних, яка зберігає дані про структуру системи та параметри моделі прийняття рішень, що забезпечує її застосування для різних типів РДС.

Для уніфікації роботи з різномірною інформацією узагальнено алгоритм прийняття рішень в умовах комбінованої невизначеності. Це узагальнення передбачає опис невизначеності за допомогою узагальнюючих функцій, оцінку стану РДС на основі марковської моделі взаємодії та вдосконаленої потокової моделі, а також формування багатокрокової стратегії керування з урахуванням динаміки процесів. Використання багатокрокових стратегій і різних типів даних підвищує точність рішень, оскільки враховує стан системи на попередніх етапах.

Аналіз отриманих рішень дозволив визначити затримки у прийнятті рішень для різних способів синхронізації потоків та оцінити ймовірність їх реалізації в умовах комбінованої невизначеності. Застосування цих співвідношень сприяє підвищенню ефективності управління РДС шляхом контролю та оцінки якості прийнятих рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизированные системы управления технологическими процессами (справочник) / [Грищенко А. З., Грищук В. П., Денисенко В. М. и др.]; под ред. Б. Б Тимофеева. – К.: Техніка, 1983. – 351 с.
2. Батищев Д. И. Методы оптимального проектирования / Д. И. Батищев. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
3. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
4. Бідняк М. Н. Виробничі системи на транспорті: теорія і практика. Монографія / М. Н. Бідняк, В. В. Біліченко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. - 176 с.
5. Борисов А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
6. Вентцель Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
7. Вилкас Э. И., Решения: теория, информация, моделирование / Э. И. Вилкас, Е. З. Майлинас. – М.: Радио и связь, 1981. – 328 с.
8. Глонь О. В. Моделювання систем керування в умовах невизначеності. Монографія / О. В. Глонь, В. М. Дубовой. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 170 с.
9. Губко М. В. Лекции по принятию решений в условиях нечеткой информации [Электронный ресурс] / М. В. Губко. – Режим доступа: http://window.edu.ru/window/catalog?p_rid=47708
10. Губко М. В. Теория игр в управлении организационными системами / М. В. Губко, Д. А. Новиков. – М.: Синтег, 2002. – 148 с.
11. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения: Пер. с англ. А. Л. Рухина / Под ред. Ю. В. Линника и А. М. Кагана / М. Де Гроот. – М.: Мир, 1974. – 436 с.

12. Иваненко В. И. Проблема неопределенности в задачах принятия решений. / В. И. Иваненко, В. А. Лабковский. – 1990.– 136 с.
13. Иносэ Х. Управление дорожным движением / Пер с англ. М. П. Печерского; Под ред. М. Я. Блинкина / Х. Иносэ, Т. Хамада. – М.: Транспорт, 1983.– 248 с.
14. Кветний Р. Н. Основи моделювання та обчислювальних методів. Навчальний посібник / Р. Н. Кветний. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 150 с.
15. Кини Р. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Кини, Х. Райфа.– М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
16. Кузьмин И.В. Основы моделирования сложных систем / Под ред. И.В. Кузьмина. – Киев: Вища школа, – 1981. – 359 с.
17. Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования / В. А. Кедрус, И. В. Кузьмин. – К.: Вища шк., 1986.–283 с.
18. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В. М. Кунцевич. – Киев: Наук. думка, 2006. – 264 с.
19. Ладанюк А. П. Основы системного аналізу. Навчальний посібник / А. П. Ладанюк. – Вінниця, Нова книга, 2004. – 176 с.
20. Ладанюк А.П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник / А.П. Ладанюк, В.Г. Трегуб, та ін. –К.: Аграрна освіта, 2001. – 224 с.