

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра Автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

НЕЧІТКА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТП-Д
МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ШАХТНОЇ ПІДЙИМАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 курсу, групи ЗА-А24мг
спеціальності: 174 Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка
(код і найменування спеціальності)

_____/ Максим ЛУЦЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)
Керівник _____/ Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)
Рецензент _____/ Олег ЛИТВИН
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)
Нормоконтроль _____/ Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)
Секретар ЕК _____/ Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут «Українська інженерго-педагогічна академія»
Кафедра Автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
рівень вищої освіти другий (магістрський)
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

д.т.н., проф. Геннадій КАНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« » 2025р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу магістрського рівня вищої освіти

студенту (ці) Максим ЛУЦЕНКО
(ім'я, прізвище)

1. Тема роботи Нечітка система управління електроприводом ТП-Д механізму підйому шахтної підйомальної установки
затверджена наказом по університету № 4801-5/3664 від “06” жовтня 2025 р.
2. Термін здачі закінченої роботи “5” грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи Маса транспортованого вантажу $11 \cdot 10^3$ кг. Еквівалентна маса підйомного комплексу, приведена до обода барабана $55 \cdot 10^3$ кг. Вантаж необхідно перемістити на висоту 711 м. Порожній скіп має масу $8 \cdot 10^3$ кг, а діаметр барабана підйомного механізму 5 м. Гранична робоча швидкість переміщення скіпа 6,7 м/с, протягом години виконується 26 циклів підйому. Зона вивантаження характеризується довжиною ходу 2,5 м. Нормовані величини прискорення та гальмування під час руху $0,65 \text{ м/с}^2$. Під час закриття затвора швидкість скіпа досягає 1,5 м/с, а відповідне прискорення $0,167 \text{ м/с}^2$. Питома маса каната на один метр його довжини 9,39 кг. Система керування допускає швидкісне перерегулювання не більше 15% при ступінчастому впливі, а перехідний процес повинен завершуватися протягом 10 с.
4. Зміст роботи (перелік питань, що їх належить розробити). Обґрунтувати доцільність упровадження нечітких апроксимувальних систем у процес керування багатомасовою електромеханічною системою шахтного підйомного агрегату. Здійснити розрахунок системи автоматичного керування координатами електроприводу та провести дослідження її динамічних характеристик. Побудувати математичну модель двомасової механічної системи, виконати її імітаційне моделювання на ПЕОМ і проаналізувати якісні показники перехідних процесів для змінних стану. Створити структурну схему нечіткого контуру управління та реалізувати синтез Fuzzy-регулятора за допомогою пакета Fuzzy Logic Toolbox у середовищі MATLAB. Оцінити результати функціонування системи з використанням нечіткої логіки.
5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал) 1. Формальні характеристики магістерської кваліфікаційної роботи. 2. Кінематична структура механізму підйому. 3. Структурні моделі функціонування нечітких систем керування. 4. Графічні зображення функцій належності для нечітких змінних. 5. Блок-схеми алгоритмів нечіткого логічного виведення.
6. Динамічна реакція системи керування: перехідні процеси. 7. Представлення математичної моделі двомасової динамічної системи. 8. Аналіз перехідних процесів у двомасовій системі. 9. Компоновка структурної схеми системи керування з Fuzzy-регулятором. 10. Графічні інтерфейси та параметри налаштування Fuzzy-регулятора. 11. Перехідні процеси системи з нечітким регулюванням. 12–13. Підсумкові висновки магістерської роботи

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання “ 9 ” вересня 2025 р.

Керівник

(підпис)

Геннадій КАНЮК

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Максим ЛУЦЕНКО

(ім'я, прізвище)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної роботи**

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Аналіз та обґрунтування можливості використання нечітких апроксимувальних систем для керування багатомасовою електромеханічною системою підйомного механізму шахтної установки.	09.09.2025- 18.09.2025	
2	Розрахунок системи підлеглого регулювання координат електроприводу та оптимізація контурів керування за модульним і симетричним критеріями. Проведення комп'ютерного моделювання системи.	19.09.2025- 15.10.2025	
3	Аналіз роботи системи з урахуванням пружних характеристик підйимального каната. Побудова математичної моделі двомасової системи та її моделювання на ЕОМ.	16.10.2025- 05.11.2025	
4	Синтез нечіткої системи керування в середовищі MATLAB із використанням пакету Fuzzy Logic Toolbox. Проведення моделювання нечіткого контуру.	06.11.2025- 25.11.2025	
5	Підготовка та оформлення завершеної магістерської роботи.	26.11.2025- 05.12.2025	

Студент (ка)

(підпис)

Максим ЛУЦЕНКО

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з: 161 сторінок, 39 рисунків, 2 таблиці, 86 використаних джерел, 5 додатки.

Основною метою роботи є обґрунтування та розроблення методів синтезу системи керування електроприводом механізму підйому шахтної підйимальної установки, що мають забезпечити підвищення якості функціонування такої системи шляхом використання регуляторів, побудованих за принципами нечіткої логіки.

У дослідженні виконано глибокий аналіз керувальних параметрів на основі фундаментальних положень теорії автоматичного управління, що дозволило розрахунковим шляхом визначити основні характеристики системи автоматичного регулювання. Методи математичного моделювання використано для побудови формалізованих моделей роботи багатомасової електромеханічної системи, у тому числі двомасової моделі, що враховує пружні властивості підйомного каната та особливості взаємодії її рухомих ланок. Застосування теорії нечітких множин і нечіткої логіки дало можливість синтезувати Fuzzy-регулятор, орієнтований на покращення динамічних властивостей і стійкості системи, а також підвищення якості перехідних процесів.

Комп'ютерне моделювання, виконане із застосуванням MATLAB та пакета Fuzzy Logic Toolbox, дало змогу провести детальний аналіз поведінки досліджуваної системи з нечітким регулятором. Отримані результати демонструють, що апробована нечітка система керування забезпечує високі показники якості, зокрема зменшення перерегулювання, підвищення швидкодії та покращення демпфування коливальних процесів, що особливо важливо для багатомасових електромеханічних комплексів шахтних підйомних установок.

У ході виконання роботи було науково підтверджено перспективність використання нечітких апроксимуючих систем у задачах керування складними механізмами підйому. Розроблено систему регулювання координат електроприводу шахтної підйимальної установки, сформовано математичну модель дво-

масової системи та розраховано її основні динамічні характеристики. Виконано повний комплекс моделювання системи на ЕОМ як у класичному варіанті, так і з використанням Fuzzy-регулятора, що дозволило всебічно оцінити переваги нечітких методів керування.

Основні положення роботи впроваджено в освітній процес кафедри АМЕТ ННІ «УПА» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, де вони застосовуються під час проведення лекцій та практичних занять.

Отримані наукові результати були представлені та обговорені на науково-практичній конференції студентів ННІ «УПА» у 2025 році, що підтвердило їх актуальність і прикладну значущість.

Ключові слова: ТЕОРІЯ НЕЧІТКИХ МНОЖИН, МЕТОДИ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ, ПІДЙОМНА ШАХТНА УСТАНОВКА, ЕЛЕКТРОПРИВОД ПІДЙОМНОГО МЕХАНІЗМУ, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ, ОДНОМАСОВІ ТА ДВОМАСОВА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, НЕЧІТКІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, FUZZY-РЕГУЛЯТОР, АДАПТИВНІ МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ.

ABSTRACT

An explanatory message consists of: 161 pages, 39 figures, 2 tables, 86 used sources, 5 additions

The main objective of the work is to substantiate and develop methods for synthesizing the control system of the electric drive of the lifting mechanism of a mine hoisting installation, which should ensure an increase in the quality of functioning of such a system through the use of controllers built on the principles of fuzzy logic.

The study performed a deep analysis of control parameters based on the fundamental principles of the theory of automatic control, which allowed to determine the main characteristics of the automatic control system by calculation. Mathematical modeling methods were used to build formalized models of the operation of a multi-mass electromechanical system, including a two-mass model that takes into account the elastic properties of the hoisting rope and the features of the interaction of its moving links. The application of the theory of fuzzy sets and fuzzy logic made it possible to synthesize a Fuzzy controller focused on improving the dynamic properties and stability of the system, as well as improving the quality of transient processes.

Computer modeling, performed using MATLAB and the Fuzzy Logic Toolbox package, made it possible to conduct a detailed analysis of the behavior of the studied system with a fuzzy controller. The results obtained demonstrate that the tested fuzzy control system provides high quality indicators, in particular, reducing overshoot, increasing speed and improving damping of oscillatory processes, which is especially important for multi-mass electromechanical complexes of mine hoisting installations.

During the work, the prospects of using fuzzy approximating systems in the control problems of complex lifting mechanisms were scientifically confirmed. A system for regulating the coordinates of the electric drive of the mine hoisting installation was developed, a mathematical model of the two-mass system was formed and its main dynamic characteristics were calculated. A full range of

computer modeling of the system was performed both in the classical version and using the Fuzzy controller, which allowed a comprehensive assessment of the advantages of fuzzy control methods.

The main provisions of the work were implemented in the educational process of the Department of AMET of the Scientific Research Institute "UIPA" of the V.N. Karazin Kharkiv National University, where they are used during lectures and practical classes.

The obtained scientific results were presented and discussed at the scientific and practical conference of students of the Scientific Research Institute "UIPA" in 2025, which confirmed their relevance and applied significance.

Keywords: FUZZY SET THEORY, FUZZY INDUCTION METHODS, MINE HOISTING INSTALLATION, ELECTRIC DRIVE OF THE LIFTING MECHANISM, AUTOMATED CONTROL SYSTEM, SINGLE-MASS AND TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEMS, FUZZY CONTROL SYSTEMS, FUZZY CONTROLLER, ADAPTIVE CONTROL METHODS FOR DYNAMIC SYSTEMS.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- P_n – номінальна потужність;
 U_n – номінальна напруга;
 I_n – номінальний струм;
 M_n – номінальний момент;
 n_n – номінальна швидкість обертання;
 Φ_n – номінальний магнітний потік;
 R – активний опір;
 L – індуктивність;
 J – момент інерції;
 k_d – коефіцієнт посилення двигуна;
 T_e – електромагнітна постійна часу електроприводу;
 T_m – електромеханічна постійна часу електроприводу;
 $W(p)$ – передатна функція;
 c – коефіцієнт жорсткості;
 β – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя;
 A – матриця стану;
 B – матриця управління;
 C – матриця виходу;
 $\vec{X}(t)$ – вектор стану системи;
 $\vec{U}(t)$ – вектор управління;
 $\vec{Y}(t)$ – вектор виходу;
САУ – система автоматичного управління;
М – двигун.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ПРИКЛАДНИХ АСПЕКТІВ НЕЧІТКИХ МЕТОДІВ В УПРАВЛІННІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	15
1.1 Еволюція концепції нечітких множин і розвиток теорії нечіткої логіки в сучасних системах автоматичного управління	15
1.2 Ключові чинники, що визначають ефективність впровадження систем нечіткого висновку у задачах регулювання динамічних об'єктів	18
1.3 Функціонально-структурна організація систем нечіткого управління та їх базові елементи	21
1.4 Комплекс вимог до системи автоматичного керування електроприводом підйомного механізму шахтних підймальних машин .	24
1.5 Формулювання задачі синтезу нечіткої системи управління електроприводом підйомного механізму шахтної підймальної установки	27
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	30
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ	32
2.1 Технічні характеристики шахтної підймальної установки та вимоги до її системи автоматизованого управління.....	32
2.2 Обґрунтований вибір структури електроприводу механізму підйому шахтної установки	33
2.3 Вибір електродвигуна за критеріями потужності та енергетичної ефективності	36
2.4 Перевірка електродвигуна за умовами нагріву та оцінка його перевантажувальної здатності	37
2.5 Вибір та обґрунтування комплексу силового електроустаткування схеми електроприводу	45

2.6 Розрахунок параметрів силового кола електроприводу підйомного механізму	47
2.7 Визначення раціональної структурної конфігурації системи автоматичного управління	53
2.8 Математичний опис динаміки та формування передавальних функцій об'єкта управління	54
2.9 Синтез послідовного коригувального пристрою контуру струму з урахуванням динаміки об'єкта	57
2.10 Синтез послідовного коригувального пристрою контуру швидкості для забезпечення необхідних показників якості	60
2.11 Аналіз та дослідження динамічних характеристик системи підлеглого регулювання	66
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	70
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОМАСОВОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДЙОМНОГО КАНАТА	
3.1 Побудова і математичне обґрунтування моделі двомасової електромеханічної системи з розподіленою пружністю каната	72
3.2 Розрахунок та аналіз перехідних процесів двомасової системи засобами комп'ютерного моделювання	84
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	92
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ	
4.1. Процедура нечіткого моделювання та реалізація алгоритмів у середовищі MATLAB	94
4.2. Побудова, налаштування і дослідження багатомасової системи управління з використанням Fuzzy-регулятора	96
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	117
ВИСНОВКИ.....	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	121

ДОДАТОК А. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА БАЗОВІ ПОНЯТТЯ НЕЧІТКИХ МНОЖИН	129
А.1 Визначення нечітких множин та методи їх формалізованого завдання	129
А.2 Структура, типи та властивості функцій приналежності в нечітких логічних системах	133
ДОДАТОК Б. ОПЕРАЦІЙНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ НЕЧІТКИХ МНОЖИН	135
Б.1 Логічні операції та правила комбінування нечітких множин.....	135
Б.2 Алгебраїчні операції та їх застосування у формальних моделях нечіткості	139
ДОДАТОК В. НЕЧІТКІ ВІДНОШЕННЯ: ПОНЯТТЯ, ФОРМИ ПОДАННЯ ТА ОПЕРАЦІЇ	142
В.1 Методи визначення і формалізації нечітких відношень	142
В.2 Основні операції над нечіткими відношеннями та їх властивості	143
ДОДАТОК Г. ТЕОРІЯ І МЕТОДИ ПОБУДОВИ НЕЧІТКИХ ВИСНОВКІВ.....	147
Г.1 Поетапне формування нечіткого висновку у системах логічного управління	147
Г.2 Класичний алгоритм Mamdani та його особливості	152
Г.3 Алгоритм формування висновків у моделі Цукамото	153
Г.4 Методика нечіткого висновку за схемою Сугено.....	155
Г.5 Алгоритм нечіткої інференції Ларсена.....	156
Г.6 Модифіковані та спрощені підходи до побудови нечітких висновків	157
Г.7 Техніки дефазифікації та переходу від нечітких результатів до чітких значень.....	159
ДОДАТОК Д. ФАЙЛ ПОЧАТКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ	161

ВСТУП

Актуальність теми. Постійне вдосконалення систем автоматизованого керування промисловими комплексами є одним із ключових чинників забезпечення конкурентоспроможності сучасного виробництва, підвищення його технологічної гнучкості, продуктивності та енергоефективності. Динамічний розвиток засобів автоматизації спостерігається у напрямках створення адаптивних систем, оптимізації векторного керування електроприводами змінного струму, інтеграції багаторівневих обчислювальних комплексів, упровадження цифрових регуляторів прямої дії та інших прогресивних підходів, які істотно розширюють можливості керування складними електромеханічними об'єктами.

Серед інноваційних методів, що найбільш активно впливають на сучасний стан теорії та практики автоматизованого керування, особливе місце посідають технології нечіткого управління. Використання апарату теорії нечітких множин забезпечує альтернативну до класичних методів парадигму опису складних технічних процесів та прийняття керуючих рішень в умовах неповної, неточної чи апроксимаційної інформації.

Перші наукові передумови застосування нечітких методів були сформульовані американським ученим Лотфі Заде, який у своїх фундаментальних працях заклав концептуальні основи нечітких множин, що дали змогу формалізовано описувати лінгвістичні, якісні та суб'єктивні характеристики досліджуваних процесів. Подальші напрацювання самого Л. Заде та його послідовників створили підґрунтя для швидкого поширення методів нечіткого управління в технічних застосуваннях. Розробки з цих питань ґрунтовно висвітлені в ряді праць [1–18].

Нечіткі системи вважаються одним із найперспективніших інструментів у галузі керування складними технічними об'єктами, особливо коли їх поведінка характеризується значною невизначеністю або коли традиційні математичні моделі виявляються надто громіздкими чи неточними. У практиці автоматизованого керування нечіткі методи вже довели свою ефективність у задачах робо-

тотехніки, у побудові інтелектуальних побутових пристроїв, управлінні агрегатами металургійної промисловості та транспортними системами, здійсненні автоматичного розпізнавання сигналів, мовлення і образів.

В основі нечіткої логіки лежить принцип максимальної наближеності до способу людського мислення та природномовного опису процесів. Завдяки цьому системи нечіткого управління здатні відображати складні причинно-наслідкові зв'язки, враховувати нечітку або багатозначну інформацію і формувати рішення, які значно краще узгоджуються з реальною поведінкою промислових об'єктів. Такий підхід забезпечує більш високу чутливість до зміни стану системи, меншу залежність від точності початкових даних і підвищує стійкість до збурень.

В умовах складних динамічних процесів, що відбуваються в електромеханічних системах шахтних підймальних установок, застосування нечітких методів має особливу цінність. Підйомний механізм є об'єктом із суттєвими нелінійними властивостями, на які впливають масові, інерційні та пружні характеристики системи, включаючи пружність каната. Тому створення системи керування, здатної забезпечити високу точність, стійкість і плавність руху в умовах змінних навантажень, є актуальною науково-технічною проблемою.

Отже, синтез нечіткої системи керування багатомасовою електромеханічною системою підйомного механізму шахтної підймальної установки, орієнтованої на отримання високих динамічних показників, є важливим і своєчасним завданням.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є розробка та синтез нечіткої системи управління багатомасовою електромеханічною системою шахтної підймальної установки, здатної забезпечити високі показники якості функціонування в умовах змінних робочих режимів.

Для реалізації поставленої мети сформульовано такі основні задачі:

1. Провести аналіз факторів, що визначають ефективність застосування систем нечіткого висновку в задачах управління технічними об'єктами.

2. Розробити систему підлеглого регулювання координат електроприводу підйомного механізму.

3. Побудувати математичну модель двомасової електромеханічної системи з урахуванням пружних властивостей каната.

4. Синтезувати Fuzzy-регулятор, здатний забезпечити задані динамічні характеристики двомасової системи.

5. Виконати комп'ютерне моделювання розробленої нечіткої системи та здійснити аналіз отриманих характеристик.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є динамічні процеси в системі керування електроприводом підйомного механізму шахтної підйомальної установки з урахуванням пружності підйомного каната.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є методи та моделі синтезу нечіткої системи управління двомасовою електромеханічною системою підйомного механізму.

Методи дослідження. У роботі застосовано комплекс методів: фундаментальні положення теорії автоматичного управління – для побудови класичних контурів регулювання; математичне моделювання – для створення адекватних моделей багатомасової системи; теорія нечітких множин та нечіткої логіки – для синтезу Fuzzy-регулятора; імітаційне комп'ютерне моделювання – для дослідження роботи синтезованої системи та оцінки її ефективності.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна роботи полягає в такому:

1. Уперше надано наукове обґрунтування доцільності використання нечітких методів управління багатомасовою електромеханічною системою шахтної підйомальної установки.

2. Уперше запропоновано та синтезовано нечітку систему управління двомасовою електромеханічною системою підйомного механізму, що відповідає вимогам, аналогічним до систем керування механізмами прокатних станів.

3. Розвинуто математичні моделі електромеханічних об'єктів зі складними кінематичними зв'язками у формі двомасових систем.

4. Подальшого розвитку набули методи синтезу нечітких регуляторів для систем керування, змодельованих як двомасові електромеханічні об'єкти.

Практичне значення роботи. Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні нечіткої системи керування багатомасовою електромеханічною системою підйомного механізму, яка характеризується покращеними показниками точності, стійкості та динамічної якості.

Результати дослідження впроваджені у навчальний процес кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Української інженерно-педагогічної академії та використовуються при виконанні курсових і магістерських робіт, під час лекційних і практичних занять.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, представлені у роботі, отримані автором самостійно. До особистих напрацювань належать:

- синтез системи підлеглого регулювання координат електроприводу;
- розробка математичної моделі двомасової системи з урахуванням пружності каната;
- побудова структури нечіткої системи з Fuzzy-регулятором;
- синтез Fuzzy-регулятора в середовищі MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox);
- моделювання нечіткої системи та аналіз динамічних характеристик;
- економічне обґрунтування системи управління;
- розробка заходів з охорони праці та безпеки експлуатації системи.

Апробація результатів. Основні результати магістерської роботи були представлені та обговорені на науково-практичній конференції студентів ННІ «УІПА» ХНУ ім. В. Н. Каразіна (Харків, 2025 р.).

Структура і обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 161 сторінка, зокрема: 39 рисунків (із них 17 на окремих сторінках), 2 таблиці, 5 додатки обсягом 33 сторінки, список із 86 джерел на 8 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ПРИКЛАДНИХ АСПЕКТІВ НЕЧІТКИХ МЕТОДІВ В УПРАВЛІННІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Еволюція концепції нечітких множин і розвиток теорії нечіткої логіки в сучасних системах автоматичного управління

Перші фундаментальні дослідження у сфері теорії нечітких множин були опубліковані професором Лотфі Заде з Університету Берклі (штат Каліфорнія, США) у 1965 році [19]. У своїй роботі Л. Заде вперше запропонував формалізоване визначення нечіткої множини, що стало відправною точкою для формування нового напрямку в математиці та прикладних науках. Його концепція дозволила розширити класичні теоретико-множинні та логічні підходи, вводячи нечіткі узагальнення всіх основних понять та операторів, що значно вплинуло на подальші дослідження у галузі автоматизації та управління.

Протягом 1965–1980-х років теорія нечітких множин пройшла шлях від радше експериментальної ідейної конструкції до сформованої наукової дисципліни. Особливо важливими були роботи Л. Заде [20–23], а також дослідження Д. Дюбуа (D. Dubois) і А. Прада (H. Prade) [24–26], що стосувалися нечітких міри та міри можливості; М. Сугено (M. Sugeno) [27–29], який розробляв методи нечіткого висновку та інтегрування; Дж. Беждека (J. Bezdek) [30, 31] у сфері нечіткої кластеризації та розпізнавання образів; Р. Ягера (R. R. Yager) [32], який досліджував основи нечіткої логіки та її прикладні алгоритми.

З 1980-х років розвиток теорії нечітких множин і нечіткої логіки значно прискорився. Вона пройшла від концептуальних і методологічних новацій до активного впровадження в промислові, енергетичні та соціальні системи. З'явилися гібридні методи, що поєднують нечітку логіку з іншими парадигмами штучного інтелекту, що дозволяє підвищити ефективність керування в умовах невизначеності та складних нелінійних взаємозв'язків [33–52].

Протягом останнього десятиліття інтерес до нечітких систем регулювання відчутно зріс. Це пов'язано з кількома ключовими тенденціями. По-перше, активно розвиваються підходи, що поєднують традиційні нечіткі регулятори (Mamdani, TSK/Takagi–Sugeno) із сучасними методами оптимізації та прогнозування, включно з модельно-предиктивним керуванням (MPC) та алгоритмами оптимізації на основі еволюційних і стохастичних методів. Це дозволяє використовувати нечітку модель для апроксимації нелінійної поведінки об'єкта і одночасно забезпечувати оптимальне керування з дотриманням фізичних та технологічних обмежень [53].

По-друге, значну увагу сьогодні привертають гібридні архітектури, такі як neuro-fuzzy та fuzzy + reinforcement learning, що поєднують інтерпретованість нечітких правил із здатністю алгоритмів машинного навчання автоматично коригувати структуру та параметри контролера. Такі рішення дозволяють створювати адаптивні регулятори, які підлаштовуються під зміну динаміки об'єкта та умов експлуатації, зберігаючи при цьому можливість інтерпретації через людські правила. Оглядові дослідження підтверджують ефективність цих підходів у проектуванні робастних і адаптивних систем керування в мехатроніці, електротехніці та енергетиці [54].

По-третє, у відповідь на підвищені вимоги до надійності й роботи в умовах невизначеності, інтенсивно розвиваються розширені теорії нечіткості: type-2 та навіть type-3 нечіткі множини. Вони дозволяють більш ефективно опрацювати невизначеність у членстві елементів та зменшують чутливість системи до шуму і похибок моделі, що підвищує робастність регуляторів, особливо в енергетичних системах і при використанні відновлюваних джерел енергії [55].

Четвертий напрям – широке застосування data-driven і чисельно-орієнтованих методів для автоматичного синтезу правил і параметрів на основі великих обсягів даних. Це включає оптимізаційні методи (евристики, градієнтні методи) та структурну ідентифікацію (зокрема T–S представлення). Такий підхід робить нечіткі регулятори придатними для складних промислових процесів, де аналітична модель або недоступна, або надто складна для класичних методів [56].

Практичне застосування нечітких методів підтверджується численними прикладами в сучасних галузях: управління мікромережами, МРРТ у сонячних системах, промислова автоматизація, управління станом енергетичних мереж, робототехніка та автономні транспортні системи. У цих сферах нечіткі та гібридні регулятори демонструють кращі характеристики продуктивності і стійкості в умовах нелінійності та непевності, порівняно з традиційними лінійними контролерами [57].

Серед перспективних напрямів розвитку виділяють такі ключові тенденції:

1. Інтеграція нечіткої логіки з передовими методами прогнозування та MPC для одночасного забезпечення оптимального керування і дотримання обмежень апаратури, що особливо актуально для енергетики та автономних транспортних систем [58].

2. Автоматичний синтез правил і структур на основі даних (data-driven fuzzy control), що скорочує залежність від ручного проектування та пришвидшує промислове впровадження [59].

3. Розвиток type-2/type-3 нечіткості для підвищення робастності у середовищах із високою невизначеністю [60].

4. Поєднання з методами глобальної оптимізації (евристики, еволюційні алгоритми, байєсові підходи) для тонкого налаштування регуляторів у багатокритеріальних задачах [61].

5. Використання в кіберадаптивних та самовідновних системах, де регулятор повинен реагувати на зовнішні атаки, відмови компонентів чи радикальні зміни умов експлуатації, а гнучкість та інтерпретованість правил стають критично важливими [62].

Таким чином, нечітка логіка зберігає свою актуальність та ефективно розвивається у вигляді гібридних, data-driven та предиктивних систем управління. Реальні приклади впровадження сучасних Fuzzy-регуляторів підтверджують тренди та забезпечують методичну основу для їх застосування у промислових і енергетичних системах [63, 64].

1.2 Ключові чинники, що визначають ефективність впровадження систем нечіткого висновку у задачах регулювання динамічних об'єктів

Застосування апарату нечіткої логіки в системах управління базується на кількох ключових теоретичних результатах, що демонструють її здатність ефективно моделювати складні нелінійні залежності та апроксимувати функції будь-якої форми в межах визначених областей.

Одним із основоположних результатів є робота Wang (1992) [65], у якій показано, що нечітка система з набором правил типу «якщо ..., то ...» здатна виступати як універсальний апроксиматор. Зокрема, при використанні:

- 1) гаусівських функцій приналежності для опису вхідних змінних:

$$A_i(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \alpha_{i1}}{\beta_{i1}}\right)^2\right), \quad B_i(y) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \alpha_{i2}}{\beta_{i2}}\right)^2\right),$$

$$C_i(z) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \alpha_{i3}}{\beta_{i3}}\right)^2\right),$$

- 2) операцій композиції у вигляді добутку для об'єднання умов правил:

$$(A_i(x) \text{ and } B_i(y)) = A_i(x)B_i(y),$$

- 3) імплікації за формулою Larsen

$$(A_i(x) \text{ and } B_i(y)) \rightarrow C_i(z) = A_i(x)B_i(y)C_i(z),$$

- 4) методу центроїда для приведення нечіткої величини до чіткого значення:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i A_i B_i}{\sum_{i=1}^n A_i B_i},$$

можна побудувати систему, здатну апроксимувати будь-яку неперервну функцію $g(x)$ на компактній множині U з довільною точністю $\varepsilon > 0$, тобто для кожної неперервної функції $g(x)$ існує Fuzzy-система, яка формує вихідну функцію $f(x)$, таку що

$$\sup_{x \in U} \|g(x) - f(x)\| \leq \varepsilon,$$

де $\|\bullet\|$ – символ, який позначає вибрану міру відстані між двома функціями.

У 1995 році Castro [66] довів, що логічний контролер **Mamdani** також є універсальним апроксиматором при виконанні певних умов:

1) Симетричні трикутні функції приналежності для опису вхідних змінних:

$$A_i(x) = \begin{cases} \frac{1-|a_i-x|}{\alpha_i}, & \text{якщо } |a_i-x| \leq \alpha_i, \\ 0, & \text{в протилежному випадку,} \end{cases}$$

$$B_i(y) = \begin{cases} \frac{1-|b_i-y|}{\beta_i}, & \text{якщо } |a_i-y| \leq \beta_i, \\ 0, & \text{в протилежному випадку,} \end{cases}$$

$$C_i(z) = \begin{cases} \frac{1-|c_i-z|}{\gamma_i}, & \text{якщо } |c_i-z| \leq \gamma_i, \\ 0, & \text{в протилежному випадку;} \end{cases}$$

2) Композиції з використанням мінімуму ($\min$) як операції «І» для поєднання умов правил:

$$(A_i(x) \text{ and } B_i(y)) = \min(A_i(x)B_i(y));$$

3) Імплікації за стандартом Mamdani і застосуванні центроїдного методу для приведення нечіткої величини до конкретного вихідного значення:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \min(A_i(x)B_i(y))}{\sum_{i=1}^n \min(A_i(x)B_i(y))}.$$

Ще однією ключовою теоретичною основою є теорема FAT (Fuzzy Approximation Theorem), доведена Б. Коско (B. Kosko) у 1993 році [67], яка стверджує, що будь-яку математичну функцію можна апроксимувати системою, побудованою на основі нечіткої логіки. Ці результати доводять універсальність Fuzzy-систем і їх здатність до моделювання складних, нелінійних та частково невизначених процесів.

Практична ефективність використання систем нечіткого висновку зумовлена тим, що вони особливо корисні:

- коли математична модель об'єкта або процесу відсутня або надто складна для аналітичного опису;
- якщо експертні знання про систему представлені лише у лінгвістичній формі (наприклад, «швидкість висока», «температура трохи нижча від норми»);
- для управління складними багатомасовими або нелінійними системами, де класичні алгоритми керування не забезпечують необхідної точності або стабільності.

Разом із тим існують чинники, що обмежують ефективність Fuzzy-систем і вимагають особливої уваги при проектуванні:

- Суб'єктивність експертних правил: початковий набір нечітких правил формується людиною-експертом і може бути неповним, суперечливим або недостатньо репрезентативним для всіх режимів роботи системи.
- Суб'єктивний вибір функцій приналежності: форма та параметри функцій приналежності для вхідних і вихідних змінних часто визначаються інтуїтивно або на основі обмеженого досвіду, що може призводити до неточного відображення реальної поведінки об'єкта.

Врахування цих факторів є критично важливим для забезпечення високої якості функціонування систем нечіткого управління. Водночас сучасні підходи, включно з автоматизованим синтезом правил на основі даних і гібридними методами (neuro-fuzzy, Fuzzy+MPC), дозволяють мінімізувати негативний вплив суб'єктивності та підвищити точність і стабільність Fuzzy-регуляторів у складних промислових процесах.

1.3 Функціонально-структурна організація систем нечіткого управління та їх базові елементи

Одним із фундаментальних напрямів практичного застосування нечіткої логіки є побудова систем автоматичного керування, здатних функціонувати в умовах невизначеності, неповноти або лінгвістичності вихідних даних. На відміну від традиційних методів керування, де модель об'єкта повинна бути строго формалізованою, нечіткі системи дозволяють описувати процеси через якісні поняття та експертні правила, що більш природно відображає людське уявлення про складні динамічні об'єкти.

У центрі побудови нечіткої моделі знаходяться лінгвістичні змінні, що відповідають фізичним величинам системи – сигналам, параметрам стану, керуючим впливам тощо. Саме вони утворюють основу для формування правил нечіткого висновку, завдяки яким система може інтерпретувати інформацію так, як це робить фахівець-оператор.

Загальна мета будь-якої системи керування полягає у виборі оптимального або прийняттого керуючого впливу на основі оцінки поточного стану об'єкта. Традиційна теорія керування пропонує великий набір методів для досягнення цієї мети, проте їх ефективність різко знижується, коли математична модель є неповною або процес має суттєві нелінійності. У таких ситуаціях нечіткі системи управління демонструють вагому перевагу – вони дозволяють побудувати працюючу модель навіть за умов відсутності точного математичного опису об'єкта.

Для розуміння ролі нечітких систем необхідно звернутися до базової структури процесу керування. У класичному підході об'єкт керування та система керування представляються у вигляді взаємодіючих підсистем зі зворотним зв'язком (рис. 1.1).

У цій структурі об'єкт характеризується сукупністю вхідних параметрів (керуючих сигналів) та вихідних характеристик (результатів його роботи), які вимірюються відповідними датчиками. Система керування аналізує ці відомості

та, застосовуючи певний алгоритм, формує нові значення керуючих впливів, змушуючи об'єкт наблизитися до заданого режиму роботи.



Рисунок 1.1 – Узагальнена схема процесу керування
зі зворотним зв'язком

Найвідомішим прикладом такого підходу є PID-регулятор. Він формує керуючий сигнал на основі комбінації пропорційної складової (миттєва похибка), інтегральної (накопичена похибка) та диференційної (швидкість зміни похибки). Попри популярність, стандартні PID-схеми мають низку обмежень:

- вони виходять із припущення лінійної поведінки об'єкта;
- їм складно працювати з нелінійними або сильно змінними процесами;
- обчислення можуть ставати надто затратними при високих швидкостях динаміки.

Саме тут виникає потреба у нечіткій логіці, яка дозволяє трансформувати традиційну архітектуру керування у гнучкішу структуру з використанням механізмів нечіткого висновку. У нечіткій системі кожен етап – від перетворення вхідних даних у терми лінгвістичних змінних до дефазифікації – інтегрується у загальну модель регулятора, формуючи альтернативний підхід до керування (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Концептуальна архітектура нечіткої системи управління

У такій архітектурі вхідні змінні системи спочатку переводяться у терміни, зрозумілі базі знань (наприклад, «низька температура», «швидке зростання», «значна похибка»). Далі правила типу «якщо–то» узгоджують ці терміни між собою, визначаючи доцільний керуючий вплив. На завершальному етапі система повертає результат у числову форму, придатну для подальшого застосування виконавчими механізмами.

Таким чином, нечітка система управління фактично відтворює логіку дій експерта, дозволяючи формалізувати інтуїтивні уявлення про процес та застосовувати їх у режимі реального часу. Вона не замінює класичні методи, але суттєво розширює їх можливості, роблячи управління більш адаптивним, стійким до невизначеностей і ефективним у складних технічних об'єктах.

1.4 Комплекс вимог до системи автоматичного керування електроприводом підйомного механізму шахтних підймальних машин

Сучасні шахтні підйомні установки належать до категорії технологічно складних і потенційно небезпечних технічних об'єктів, тому їх автоматизовані системи керування та електроприводи повинні відповідати підвищеним вимогам до точності, надійності, швидкодії та безпеки. Якість функціонування системи керування безпосередньо визначає продуктивність шахти, стабільність транспортного циклу та рівень захисту персоналу, який обслуговує підйомні комплекси.

Вимоги до системи автоматичного управління.

Автоматична система керування підйомною машиною повинна працювати на принципах підлеглого регулювання, тобто забезпечувати формування керуючих впливів на основі ієрархії внутрішніх контурів. Основною функцією такої системи є точне програмне керування швидкістю руху підйомного органу відповідно до заданої діаграми. Система має дозволяти встановлення кінематичних характеристик у визначених межах: швидкість руху – $5 \dots 20$ м/с, прискорення – $0,5 \dots 1$ м/с², ривок – $0,5 \dots 2,5$ м/с³, при загальній похибці виконання програмної швидкості не більше ± 1 %.

Автоматичний регулятор швидкості повинен забезпечувати: статичну точність підтримання швидкості не гірше 1,0 %, а при використанні високоточних тахогенераторів – до 0,5 %; ефективне обмеження струму в сталих режимах на заданому рівні з точністю до 10 %; час реакції на раптову зміну струму навантаження не більше 1 с, без значних коливань та перерегулювання.

Система має бути стійкою до змін параметрів живильної мережі, температурних впливів, коливань умов довкілля та дрейфу нульових значень вимірювальної апаратури. Вона повинна стабільно підтримувати точність керування навіть у разі випадкових відхилень у роботі сенсорів або виконавчих механізмів.

Завершення транспортного циклу відбувається шляхом автоматизованого стопоріння підйомної машини. Гальмування виконується робочим гальмом за сигналами кінцевих вимикачів, розташованих у відповідних точках стовбура. Помилка зупинки не повинна порушувати нормальну роботу механізмів завантаження та розвантаження, тобто має залишатися в межах технологічно встановленої норми.

Перехід установки до автоматичного режиму допустимий лише тоді, коли обидві підйомні судини зайняли свої крайні положення. При цьому повернення до ручного керування повинне відбуватися негайно і незалежно від поточного положення клітей; одночасно активується запобіжне гальмо.

У разі виявлення аварійної ситуації – надмірного струму, обриву канату, несправностей обладнання, сигналів від аварійних кнопок або датчиків з горизонтів – система зобов'язана негайно відключити двигун від живлення та автоматично накласти запобіжне гальмо. Лише після зупинки підйомні судини можуть бути відведені у вихідне положення вручну або з операційного пункту.

Вимоги до електроприводу підйомної установки. Електропривод шахтних підйомних машин повинен відповідати не лише загальним вимогам до промислових електроприводів, а й специфічним гірничим нормам. Він має забезпечувати:

1. Стабільну роботу при змінних навантаженнях, у тому числі при переході від рушійних до гальмівних режимів, що часто супроводжується зміною знака моменту.

2. Можливість реверсування з повної зупинки, що є необхідною умовою для точного позиціонування клітей під час завантаження й розвантаження. У низці підйомних машин реверс може здійснюватися багаторазово протягом одного циклу.

3. Широкий діапазон регулювання швидкості, включаючи роботу на номінальній швидкості й у режимі технологічної ревізії.

4. Точне відтворення програмної діаграми швидкості, незалежно від характеру навантаження.

При цьому:

- відхилення швидкості в режимах ревізії та дотягування не повинні перевищувати $\pm 25\%$;
- помилка позиціонування має забезпечувати точність стопоріння в межах ± 5 см.
- Такі вимоги задовольняються електроприводами систем Г–Д і ТП–Д; менш точні приводи вимагають збільшення довжини дотягування, що негативно впливає на продуктивність шахти.

5. Обмеження динамічних навантажень, що виникають у механічних елементах підйомної установки. З цією метою рекомендовано включення у систему керування пристроїв, що контролюють ривок, тобто швидкість зміни прискорення.

6. Гнучкість способів керування – привід повинен допускати локальне керування з машинного залу, дистанційне керування з приймального майданчика та роботу в автоматичному режимі.

7. Високий рівень надійності та безпеки, відповідність спеціальним гірничим вимогам щодо вибухозахисту, електробезпеки, механічної міцності та контролю швидкості.

Додаткові сучасні вимоги. У сучасних шахтних підйомних комплексах дедалі частіше впроваджуються такі додаткові вимоги:

- Інтеграція з системами цифрового моніторингу (SCADA / IoT) для дистанційного збору оперативних даних про навантаження, температуру, вібрацію, параметри приводу та стан гальм.
- Використання адаптивних або інтелектуальних алгоритмів керування, які здатні коригувати параметри регуляторів у реальному часі залежно від зміни маси вантажу, зносу канату, температури гальм або стану електричної мережі.
- Прогнозування відмов за допомогою методів машинного навчання, що дозволяє запобігати аваріям, пов'язаним з деградацією електродвигунів або механічних компонентів.

- Енергоефективність системи приводу, у тому числі використання рекуперації енергії під час гальмування.
- Взаємодія із системами безпеки шахти, включаючи газовий контроль, систему пожежного захисту та евакуаційні алгоритми.

Резюме. Система автоматичного керування та електропривод шахтної підйомної установки повинні забезпечувати:

- високу точність відтворення кінематичних параметрів;
- стабільність роботи в режимах, що змінюються;
- можливість швидкого реагування на аварійні ситуації;
- надійність і безпеку експлуатації;
- адаптивність до складних гірничо-технічних умов.

Усе це визначає необхідність застосування сучасних інтелектуальних алгоритмів керування, серед яких усе більшу роль відіграють нечіткі регулятори, здатні компенсувати невизначеність характеристик підйомної установки та ва-ріації її робочих параметрів.

1.5 Формулювання задачі синтезу нечіткої системи управління електроприводом підйомного механізму шахтної підйомної установки

Сучасні підходи до побудови автоматичних систем управління, як правило, базуються на суворих математичних моделях об'єктів, які описують їх динамічні характеристики та взаємозв'язки між параметрами. Проте для більшості реальних систем, як штучних, так і природних, створення таких точних моделей є надзвичайно складним або навіть практично неможливим через високий рівень складності об'єкта, нелінійність його поведінки та численні невідомі або непередбачувані зовнішні впливи. Крім того, багато об'єктів функціонують у змінних або непередбачуваних середовищах, що робить класичні методи управління малоефективними.

У таких умовах керування можливо лише за допомогою адаптивних або інтелектуальних підходів, здатних працювати з неповною, нечіткою або якіс-

ною інформацією. Системи, засновані на сучасних принципах штучного інтелекту, включаючи нечітку логіку, експертні системи, нейронні мережі, генетичні алгоритми та інші інтелектуальні методи, дозволяють ефективно управляти об'єктами навіть у випадках, коли традиційні математичні моделі недостатньо адекватні [65–68].

В основі інтелектуальних систем управління лежить обробка нечіткої інформації та формування нечітких висновків. Типова структура такої системи включає кілька основних етапів. По-перше, початкові точні дані від датчиків перетворюються на лінгвістичні значення за допомогою спеціального блоку – фазіфікатора (fuzzifier). По-друге, лінгвістичні значення обробляються механізмом нечіткого виведення, який використовує продукційні правила, сформовані на основі експертних знань про процес управління. На третьому етапі отримані нечіткі вихідні значення переводяться у числові значення за допомогою блоку дефазіфікатора (defuzzifier), що дозволяє формувати керуючі сигнали для виконавчих механізмів. Така концептуальна структура є базовою для Fuzzy-контролерів, що застосовуються у сучасних інтелектуальних системах управління, де необхідно працювати з невизначеністю та неповною інформацією [65–68].

Аналіз практичних завдань показав, що використання нечітких технологій є виправданим і перспективним для синтезу системи управління механізмом підйому шахтної підйомальної установки. Основним аргументом є складність формалізації об'єкта управління: підйомний механізм має багатомасову пружну структуру, де жорсткість підйомного канату безпосередньо впливає на характер коливань і перехідних процесів у системі. Як буде показано у розділі 3, ці коливання при традиційних регуляторах створюють надмірні динамічні навантаження на механізм і конструкції, що негативно впливає на ефективність та надійність роботи установки. Виходячи з цього, використання нечітких систем управління дозволяє досягти більш оптимального характеру перехідних процесів, зменшити динамічні навантаження та підвищити загальну якість функціонування механізму [65–68].

Метою дослідження є синтез інтелектуальної нечіткої системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму підйому шахтної підйомальної установки, яка забезпечує високу динамічну швидкість та стабільність. Об'єкт управління моделюється як багатомасова пружна система, а система керування повинна ефективно працювати при змінних і збурюючих діях, включаючи ступінчасті сигнали з випадковими амплітудами.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести синтез системи підлеглого регулювання параметрами електроприводу механізму підйому, розглядаючи об'єкт управління на початковому етапі як одномасову систему.

2. Розробити математичну модель об'єкта управління з урахуванням пружних властивостей підйомного канату, що дозволяє адекватно описати коливальний характер системи та вплив на динамічні показники.

3. Синтезувати Fuzzy-регулятор, який забезпечує оптимальне співвідношення швидкості та якості управління для багатомасової електромеханічної системи.

4. Виконати комп'ютерне моделювання розробленої системи, провести аналіз перехідних процесів та оцінити ефективність управління в різних режимах експлуатації.

У результаті реалізації цих завдань очікується створення високоякісної нечіткої системи управління, яка дозволяє зменшити негативний вплив пружності підйомного канату на роботу механізму, підвищити стійкість та точність процесу управління, а також забезпечити безпечну і надійну експлуатацію шахтної підйомальної установки в умовах змінного навантаження та непередбачуваних впливів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Проведено систематичний аналіз сучасної наукової та технічної літератури за темою застосування нечітких систем у задачах управління. Обґрунтовано доцільність використання теорії нечітких множин і нечіткої логіки для керування об'єктами з невизначеною або неповною інформацією, яка не може бути коректно описана в імовірнісних термінах. Встановлено, що традиційні кількісні методи теорії автоматичного управління часто виявляються недостатньо адекватними для формування алгоритмів управління складними об'єктами. Одним із ефективних способів подолання цих обмежень є застосування нечітких понять та знань, формування управлінських алгоритмів на основі нечітких правил логічного висновку та отримання керуючих сигналів через процедури нечіткого висновку.

2. Розглянуто математичні основи нечітких систем управління. Надано визначення ключових понять, таких як нечітка множина, функція приналежності, лінгвістична змінна, а також наведено способи завдання нечітких множин і основні операції над ними. Такий аналіз дозволяє створювати формальні моделі для опису процесів управління в умовах невизначеності та нечіткості.

3. Проаналізовано принципи побудови та роботи систем нечіткого висновку. Встановлено, що основні компоненти таких систем включають множину нечітких правил, базу даних із описом функцій приналежності, механізм нечіткого висновку та процедури агрегації і дефазифікації. При технічній реалізації системи нечіткого керування вхідні та вихідні сигнали представлені числовими значеннями, які після фазифікації перетворюються на нечіткі множини, обробляються у блоці нечіткого висновку і перетворюються дефазифікатором на керуючі сигнали для виконавчих механізмів. Розглянуто різні алгоритми нечіткого висновку, такі як Mamdani, Tsukamoto та Sugeno, та їх практичні особливості.

4. Визначено, що одним із ключових напрямків практичного застосування систем нечіткого висновку є управління технічними об'єктами та процесами,

де існує значна невизначеність параметрів. Для побудови таких систем використовуються лінгвістичні змінні для формального опису характеристик об'єкта управління, а також формуються бази правил для алгоритмів керування, що забезпечує адекватне представлення взаємозв'язків між вхідними та вихідними параметрами.

5. Проведено аналіз сфер застосування сучасних методів автоматизації та управління. Встановлено, що класичні регулятори ефективні при повністю детермінованих системах і середовищі з відомими характеристиками, нейронні мережі – у випадках високої складності об'єкта та обмеженої інформації, а методи нечіткого управління демонструють оптимальні результати при поєднанні неповної інформації та складної динаміки об'єкта. Це підкреслює їх пріоритетність у задачах управління багатомасовими і пружними системами, такими як механізми шахтних підйомних установок.

6. Проаналізовано вимоги до автоматизованих систем управління та електроприводів шахтних підйомних машин. Встановлено, що через кінцеву жорсткість підйомного канату традиційні регулятори не забезпечують достатню якість роботи системи. Тому впровадження методів нечіткого моделювання дозволяє суттєво підвищити ефективність регулювання, зменшити коливальні процеси та оптимізувати динамічне навантаження на механізм і конструкції.

7. Сформульовано завдання дослідження: розробка системи управління механізмом підйому шахтної підйомної установки з урахуванням пружних властивостей підйомного канату. Поставлено мету створити нечітку систему керування, здатну забезпечувати високоякісне регулювання при змінних зовнішніх впливах, оптимальний характер перехідних процесів і стійку динаміку багатомасової електромеханічної системи.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Технічні характеристики шахтної підйомальної установки та ви- моги до її системи автоматизованого управління

Для проведення розрахунків електроприводу механізму підйому шахтної підйомальної установки та подальшого синтезу системи управління необхідно спиратися на вихідні технічні дані, що характеризують об'єкт дослідження. Основні параметри установки наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики шахтної підйомальної установки

Найменування величини	Розмірність	Значення
Маса транспортованого вантажу, m_b	кг	$11 \cdot 10^3$
Еквівалентна маса підйомного комплексу, приведена до обода барабана, m	кг	$55 \cdot 10^3$
Висота підйому, H	м	711
Маса порожнього скіпа $m_{ск}$	кг	$8 \cdot 10^3$
Діаметр барабана підйомного механізму, $D_б$	м	5
Гранична робоча швидкість переміщення скіпа, V_{max}	м/с	6,7
Кількість циклів підйому за годину, n	-	26
Нормована величина прискорення під час руху, a	м/с ²	0,65
Нормована величина гальмування під час руху, v	м/с ²	0,65
Швидкість скіпа під час закриття затвора, $V_з$	м/с	1,5
Прискорення скіпа під час закриття затвора, $a_з$	м/с ²	0,167
Швидкість підходу до кривої розвантаження, V_p	м/с	0,5
Сповільнення на завершальному відрізку шляху, v_p	м/с ²	0,5
Довжина траєкторії розвантаження, h_p	м	2,5
Питома маса каната на один метр його довжини, p	кг/м	9,39
Інтервал паузи між робочими циклами, $t_{п}$	с	13

З огляду на наведені технічні характеристики, система автоматичного управління електроприводу повинна забезпечувати точне регулювання швидкості та інших динамічних параметрів підйомного механізму. Зокрема, ключовими показниками якості функціонування системи є:

- максимальне перерегулювання швидкості при ступінчастих змінах вхідного сигналу не повинно перевищувати 15%,
- час досягнення нового стабільного стану (час регулювання) не повинен перевищувати 10 с.

Такі вимоги обумовлюють необхідність використання точних алгоритмів підлеглого регулювання, здатних адаптуватися до динамічних змін навантаження та забезпечувати стабільну роботу механізму підйому з високою якістю керування.

2.2 Обґрунтований вибір структури електроприводу механізму підйому шахтної установки

На сьогоднішній день не існує універсального рішення щодо оптимального вибору електроприводу для всіх типів шахтних підйомних машин. Підбір конкретного варіанту приводу потребує комплексного аналізу з урахуванням низки технічних, експлуатаційних і економічних критеріїв. До основних факторів, що впливають на вибір приводу, належать:

- відносна вартість установки та експлуатації приводу;
- необхідна номінальна потужність і максимальний пусковий момент;
- рівень керованості та точність регулювання швидкості;
- умови та специфіка технологічного процесу, для якого призначена підйомна установка.

При проведенні техніко-економічного порівняння приводів особливу увагу слід приділити капітальним витратам на електрообладнання, які включають не лише безпосередню вартість двигунів та апаратури управління, але й будіве-

льні витрати, прокладку кабелів, установку додаткових елементів і супутні капітальні вкладення.

Одним із обмежень при застосуванні асинхронних приводів є їх потужність. Існуючі системи управління пуском двигуна, наприклад роторні контактні станції, дозволяють ефективно використовувати асинхронний привід при потужності до 1250 kW для однодвигунного варіанту та до 2500 kW для двохдвигунного.

При потужності до 2500 kW для скіпових установок або підйому клітей шахт можлива комбінація приводів змінного та постійного струму. Якщо ж потужність перевищує 2500 kW , доцільно розглядати виключно привід постійного струму за системами ТП-Д або Г-Д, які забезпечують необхідну точність та стабільність управління.

Вибір типу приводу також визначається умовами експлуатації. Для мало-завантажених підйомів клітей і допоміжних стовбурах перевагу зазвичай надають асинхронним приводам через їх менше енергоспоживання та простоту обслуговування. Натомість для головних стовбурів, особливо при роботі з декількох горизонтів або при тривалій експлуатації на зниженій швидкості, оптимальним є застосування приводів постійного струму, які дозволяють гнучко регулювати швидкість без додаткових втрат енергії.

При високих швидкостях підйому (понад 8–10 m/s) використання асинхронного приводу з роторним реостатом не рекомендується через низьку керованість та потенційні проблеми з безпекою. У таких випадках перевагу слід віддавати більш керованим системам постійного струму.

Вибір між однодвигунним та двохдвигунним приводом часто схиляється на користь однодвигунного, оскільки він забезпечує простішу схему управління, менші витрати на обслуговування та можливість встановлення резервного двигуна при необхідності. Щодо конструкції редуктора, одноступінчатий двохприводний редуктор має перевагу над двоступінчатим: вищий коефіцієнт корисної дії, менша кількість деталей, зниження шуму, можливість резервування та

підвищення потужності шляхом додаткового двигуна. Двоступінчаті редуктори, наприклад ЦД-20, доцільні лише при малих швидкостях підйому.

При порівнянні редукторного та безредукторного приводу постійного струму необхідно враховувати збільшення капітальних витрат у безредукторного варіанту, але при цьому він має суттєві переваги за експлуатаційними показниками: простіше обслуговування, менші втрати, більш стабільне регулювання швидкості та менший знос механічних вузлів. Тому безредукторні приводи рекомендовані для більшості установок потужністю понад 1000 *кВт*.

Варто зазначити, що хоча капітальні витрати при приводах постійного струму є вищими, економічна ефективність досягається завдяки якості управління, широкому діапазону регулювання та зниженню динамічних навантажень на механізм. З огляду на ці фактори, а також на можливість удосконалення приводу за системою ТП-Д і зниження його вартості, рекомендується застосовувати безредукторний електропривод постійного струму за системою Г-Д для скіпових установок головних стовбурів.

Експлуатаційні витрати приводів ТП-Д і Г-Д в основному формуються з оплати електроенергії, тоді як витрати на технічне обслуговування та ремонт менш значущі. Якщо економічні показники цих систем порівнянні, перевага віддається системі ТП-Д через використання статичного перетворювача, що підвищує надійність і стабільність роботи. Проте привід системи Г-Д може бути економічно доцільним при модернізації існуючих установок, коли обмежені площі, недостатня потужність підстанції або неможливе поліпшення енергетичних показників через обмеження ліній живлення та падіння напруги.

В підсумку, на основі техніко-економічного аналізу та експлуатаційних вимог, для шахтних скіпових установок головних стовбурів оптимальним вибором є безредукторний електропривод постійного струму за системою ТП-Д, що забезпечує необхідний рівень керованості, надійності та точності управління.

2.3 Вибір електродвигуна за критеріями потужності та енергетичної ефективності

На першому етапі здійснюється визначення необхідної потужності електродвигуна для шахтної підйомної установки, з урахуванням усіх експлуатаційних навантажень, динамічних факторів та специфіки вантажного циклу. Після розрахунку потужності проводиться перевірка обраного двигуна на відповідність критеріям допустимого нагріву та здатності витримувати перевантаження, що є обов'язковими умовами для забезпечення безпечної та надійної роботи системи.

Номінальна потужність електродвигуна визначається за виразом:

$$P_d \geq \frac{\varepsilon \cdot k_{\text{ш}} \cdot m_{\text{в}} \cdot g \cdot V_{\text{max}} \cdot 10^{-3}}{\eta},$$

де $k_{\text{ш}}$ – коефіцієнт опору шахтних механізмів для навантаженої гілки (у розрахунках прийнято $k_{\text{ш}} = 1,04$;

g – прискорення вільного падіння;

ε – динамічний коефіцієнт перевантаження, $\varepsilon = 1,2 \div 1,3$;

η – коефіцієнт корисної дії редуктора, $\eta = 0,9 \div 0,92$

$$P_d \geq \frac{1,25 \cdot 1,04 \cdot 11 \cdot 10^3 \cdot 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8}{0,9} = 1043,3 \text{ кВт}.$$

У даному випадку розглядається безредукторна схема електроприводу. Частота обертання ротора двигуна визначається за співвідношенням:

$$n_d = \frac{30 \cdot V_{\text{max}}}{\pi \cdot R_{\text{б}}},$$

де $R_{\text{б}}$ – радіус підйомного барабана, $R_{\text{б}} = D_{\text{б}} / 2 = 5 / 2 = 2,5 \text{ м}$

$$n_{\text{дв}} = \frac{30 \cdot 6,7}{3,14 \cdot 2,5} = 25,6 \text{ об/хв}.$$

Для обраної шахтної підйомної установки використовується тиристорно-перетворювальна система живлення (ТП-Д). Наявність пульсуючої змінної складової у випрямленій напрузі перетворювача U_d створює підвищені вимоги до електродвигуна, зокрема щодо термічної стабільності та стійкості до перевантажень. Тому оптимальним вибором є двигун постійного струму серії П2, спеціально призначений для роботи від тиристорного перетворювача.

- Використовуючи отримані параметри, із каталогу було обрано електродвигун П2-630-215-4КУХЛ4, технічні характеристики якого повністю відповідають вимогам до підйомного механізму. До його номінальних параметрів належать: потужність $P_n = 1040 \text{ кВт}$, частота обертання $n_n = 25 \text{ об/хв}$, номінальна напруга $U_n = 600 \text{ В}$, робочий струм $I_n = 2130 \text{ А}$, а також опори обмоток – якоря $R_{\text{я}} = 0,0118 \text{ Ом}$, додаткових полюсів $R_{\text{ко}} = 0,000673 \text{ Ом}$ та компенсаційної обмотки $R_{\text{дп}} = 0,00216 \text{ Ом}$. Двигун має $p = 4$ пар полюсів, кількість активних провідників якоря $N = 496$; число паралельних гілок обмотки $a = 8$.

Вибір такого двигуна забезпечує високий запас по потужності, стійкість до короткочасних перевантажень і стабільну роботу в умовах змінного навантаження, характерного для циклічного режиму підйому вантажів у шахтних підйомних установках.

2.4 Перевірка електродвигуна за умовами нагріву та оцінка його перевантажувальної здатності

Після попереднього вибору двигуна необхідно провести його детальну перевірку на відповідність умовам експлуатації, що включає оцінку теплового режиму та здатності витримувати короткочасні перевантаження. Для цього виконується побудова швидкісних і навантажувальних діаграм електроприводу, які відображають циклічний характер роботи шахтного підйомника.

Робочий цикл підйомника складається з послідовних фаз: розгону, рівномірного руху та уповільнення. У випадку підйомників із перекидними клітьми

швидкісна діаграма має шестиперіодну структуру, що дозволяє відобразити всі ключові етапи руху вантажу. Побудова діаграми проводиться для однієї активної ділянки підйому вантажу.

Час циклу $T_{\text{ц}}$ визначається на основі заданої продуктивності підйомника:

$$T_{\text{ц}} = \frac{3600}{n},$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{3600}{26} = 140 \text{ с}.$$

Фази швидкісного циклу:

1. *Закривання затвора.* На першій ділянці підйому визначаються швидкість та прискорення скіпа при закриванні затвора. Час проходу t_1 та пройдений шлях на першій ділянці h_1 визначаються наступним чином;

$$t_1 = \frac{V_3}{a_3}; \quad h_1 = \frac{V_3}{2} \cdot t_1,$$

$$t_1 = \frac{1,5}{0,167} = 8,98 \text{ с}; \quad h_1 = \frac{1,5}{2} \cdot 8,98 = 6,73 \text{ м}.$$

2. *Нормальне прискорення.* Друга ділянка включає період рівномірного прискорення до максимальної швидкості підйому вантажу. Час прискорення t_2 та пройдений шлях h_2 розраховуються через співвідношення.

$$t_2 = \frac{V_{\text{max}} - V_3}{a}; \quad h_2 = \frac{V_{\text{max}} + V_3}{2} t_2,$$

$$t_2 = \frac{6,7 - 1,5}{0,65} = 8 \text{ с}; \quad h_2 = \frac{6,7 + 1,5}{2} \cdot 8 = 32,8 \text{ м}.$$

3. *Стопоріння скіпа.* Шоста ділянка відображає уповільнення та остаточну зупинку скіпа, де швидкість і прискорення мінімізовані для забезпечення

безпечного розвантаження. Час роботи t_6 і шлях стопоріння h_6 визначаються як:

$$t_6 = \frac{V_p}{\sigma_p}; \quad h_6 = \frac{V_p}{2} \cdot t_6,$$

$$t_6 = \frac{0,5}{0,5} = 1 \text{ с}; \quad h_6 = \frac{0,5}{2} \cdot 1 = 0,25 \text{ м}.$$

4. *Рух у розвантажувальних кривих.* П'ята ділянка визначає час t_5 та шлях розвантаження h_5 вантажу: .

$$t_5 = \frac{h_p}{V_p}; \quad h_5 = h_p - h_6,$$

$$t_5 = \frac{2,5}{0,5} = 5 \text{ с}; \quad h_5 = 2,5 - 0,25 = 2,25 \text{ м}.$$

5. *Нормальне уповільнення.* На четвертій ділянці відбувається поступове зниження швидкості до необхідного рівня перед зоною розвантаження.

$$t_4 = \frac{V_{\text{так}} - V_p}{\sigma}; \quad h_4 = \frac{V_{\text{так}} + V_p}{2} \cdot t_4,$$

$$t_4 = \frac{6,7 - 0,5}{0,65} = 9,5 \text{ с}; \quad h_4 = \frac{6,7 + 0,5}{2} \cdot 9,5 = 34,2 \text{ м}.$$

6. *Рух з максимальною швидкістю.* Третя ділянка характеризується рівномірним рухом із максимальною швидкістю. Висота підйому визначає тривалість цього етапу.

$$h_3 = H - (h_1 + h_2 + h_4 + h_5 + h_p); \quad t_3 = \frac{h_3}{V_{\text{max}}},$$

$$h_3 = 711 - (6,73 + 32,8 + 34,2 + 2,25 + 0,25) = 634 \text{ м}, \quad t_3 = \frac{634}{6,7} = 94,57 \text{ с}.$$

На основі цих кінематичних даних будується швидкісна діаграма (рис. 2.1, а),

Діаграма навантаження шахтного підйимального агрегату являє собою графічне відображення зміни підйомного зусилля на ободі барабана у часовому вимірі. Іншими словами, вона демонструє, як змінюється сила, яка необхідна для переміщення підйомного органа підйомника протягом усього робочого циклу. Побудова такої діаграми зазвичай виконується за спрощеною методикою, що ґрунтується на припущенні про сталість динамічної складової моменту. Це дозволяє уникнути громіздких розрахунків і водночас забезпечує достатню точність для інженерної практики.

Після отримання діаграми навантаження здійснюється оцінка того, наскільки обраний електродвигун відповідає вимогам фактичного режиму роботи механізму підйому. Перевірці підлягають такі ключові показники, як нагрів двигуна при циклічному навантаженні, його перевантажувальна спроможність на окремих ділянках руху, а також здатність системи забезпечити необхідну продуктивність установки згідно з технологічним графіком роботи шахти.

Підйомне зусилля $F_{\text{с}}$ визначається з використанням наступного розрахункового співвідношення:

$$F_{\text{с}} = [(k_{\text{ш}} - \beta_{\text{с}}) \cdot m_{\text{в}} + (p - q) \cdot (H - 2x)] \cdot g \pm ma,$$

де $\beta_{\text{с}}$ – коефіцієнт, що описує зменшення навантаження, яке виникає завдяки руху скіпа по розвантажувальних кривих ($\beta_{\text{с}} = 0,3 - 0,5$; інколи його значення визначають експериментально або сесмічно);

q – маса погонного хвостового каната; $q = 0$;

x – шлях пройдений скіпом від початку підйому;

a – фактичне значення прискорення чи уповільнення на відповідній ділянці руху.

Таким чином, точне визначення підйомного зусилля на різних етапах руху є ключовим для формування адекватної діаграми навантаження, яка дозволяє провести надійну перевірку працездатності та відповідності двигуна вимогам експлуатації підйомної установки.

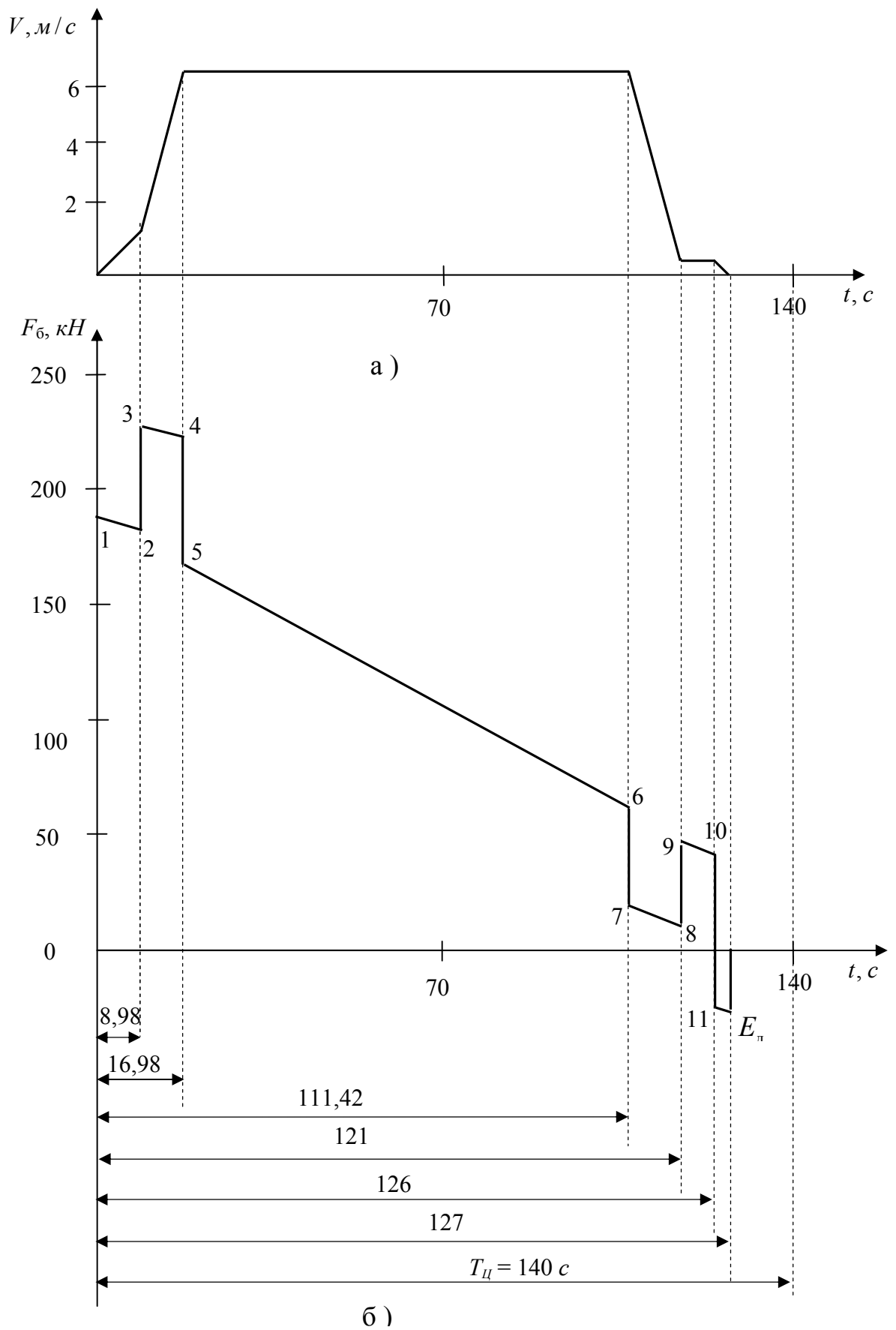


Рисунок 2.1 – Графічні залежності: а) швидкісна характеристика;
б) діаграма навантаження

$$1. x=0; \quad a=a_3=0,167 \text{ м/с}^2; \quad \beta_c=0$$

$$F_{61} = (1,09 \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot 711) \cdot 9,81 + 55 \cdot 10^3 \cdot 0,167 = \\ = 178,7 \cdot 10^3 + 9,2 \cdot 10^3 = 191,2 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$2. x=h_1=6,73 \text{ м}; \quad a=a_3=0,167; \quad \beta_c=0.$$

$$F_{62} = (1,09 \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 6,73)) \cdot 9,81 + 55 \cdot 10^3 \cdot 0,167 = \\ = 189,1 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$3. x=h_1=6,73 \text{ м}; \quad a=0,65 \text{ м/с}^2; \quad \beta_c=0.$$

$$F_{63} = (1,09 \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 6,73)) \cdot 9,81 + 55 \cdot 10^3 \cdot 0,65 = 228,6 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$4. x=h_1+h_2=6,73+32,8=39,53 \text{ м}; \quad a=0,65 \text{ м/с}^2; \quad \beta_c=0.$$

$$F_{64} = (1,09 \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 39,53)) \cdot 9,81 + 55 \cdot 10^3 \cdot 0,65 = 226,4 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$5. x=h_1+h_2=39,53 \text{ м}; \quad a=0; \quad \beta_c=0.$$

$$F_{65} = (1,09 \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 39,53)) \cdot 9,81 + 0 = 182,1 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$6. x=h_1+h_2+h_3=6,73+32,8+634=673 \text{ м}; \quad a=0; \quad \beta_c=0.$$

$$F_{66} = (1,09 \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 673)) \cdot 9,81 + 0 = 55,8 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$7. x=h_1+h_2+h_3=673 \text{ м}; \quad a=\vartheta=0,65 \text{ м/с}^2; \quad \beta_c=0.$$

$$F_{67} = (1,09 \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 673)) \cdot 9,81 - 55 \cdot 10^3 \cdot 0,65 = 19,3 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$8. x=h_1+h_2+h_3+h_4=673+34,2=707,2 \text{ м}; \quad a=\vartheta=0,65 \text{ м/с}^2; \quad \beta_c=0.$$

$$F_{68} = (1,09 \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 707)) \cdot 9,81 - 55 \cdot 10^3 \cdot 0,65 = 15,97 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$9. x = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 707,2 \text{ м}; \quad a = 0,65 \text{ м/с}^2; \quad \beta_c = 0,3 \text{ м/с}^2.$$

$$F_{69} = (1,09 - 0,3) \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 707) \cdot 9,81 - 0 = 48,2 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$10. x = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 = 707,2 + 2,5 \text{ м}; \quad a = 0; \quad \beta_c = 0,3 \text{ м/с}^2.$$

$$F_{610} = (1,09 - 0,3) \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 709,7) \cdot 9,81 - 0 = 46,4 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

$$11. x = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 = 709,7 \text{ м}; \quad a = a_p = 0,5 \text{ м/с}^2; \quad \beta_c = 0,3 \text{ м/с}^2.$$

$$F_{611} = (1,09 - 0,3) \cdot 11 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 709,7) \cdot 9,81 - 55 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = \\ = -23,2 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

$$12. x = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 = 709,7 + 0,25 \cong 710 \text{ м};$$

$$a = a_p = 0,25 \text{ м/с}^2; \quad \beta_c = 0,3 \text{ м/с}^2.$$

$$F_{612} = (1,09 - 0,3) \cdot 10,4 \cdot 10^3 + 9,39 \cdot (711 - 2 \cdot 710) \cdot 9,81 - 55 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = \\ = -24,9 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

У результаті виконаних розрахункових процедур була сформована та побудована діаграма навантаження підйомної машини, зображена на рис. 2.1, б. Ця діаграма дозволяє наочно оцінити зміну підйомного зусилля в часі та встановити характер коливань навантаження на виконавчий механізм протягом повного робочого циклу.

Для подальшої теплової оцінки працездатності електродвигуна визначають середньоквадратичне (ефективне) значення зусилля на ободі барабана. Воно розраховується згідно з формулою:

$$F_{\text{еф}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n F_i^2 t_i}{\alpha \cdot \sum_{j=1}^k t_j + \sum_{i=1}^m t_i + \beta \cdot \theta}}, \quad (2.1)$$

де t_i – час роботи механізму на ділянці з номінальною швидкістю: $\omega = \omega_n$;

t_j – час роботи на ділянці зі зменшеною швидкістю: $\omega < \omega_n$;

α , β – поправні коефіцієнти, що враховують зміни умов охолодження двигуна при знижених швидкостях та при зупинці механізму. Вони дозволяють коректно врахувати погіршення теплообміну в умовах, коли вентилятор самовентиляції працює з недостатньою продуктивністю або повністю зупиняється.

Для електричних машин з самовентиляцією, згідно з нормативними даними, зазвичай приймають: $\alpha = \frac{\beta + 1}{2} = 0,625$, $\beta = 0,25$.

Підставивши у формулу (2.1) раніше отримані числові значення тривалостей роботи та відповідних зусиль, отримуємо $F_{\text{еф}} = 134,1 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Далі обчислюють ефективне значення потужності на валу двигуна, яке визначається як добуток середньоквадратичного зусилля та середнього значення кутової швидкості (з урахуванням ККД механізму):

$$P_{\text{еф}} = \frac{F_{\text{еф}} \cdot V_{\text{max}}}{\eta};$$

$$P_{\text{еф}} = \frac{134,1 \cdot 10^3 \cdot 6,7}{0,9} = 998,7 \text{ кВт}.$$

Розрахункова середньоквадратична потужність виявилась меншою за номінальну потужність попередньо обраного двигуна. Це означає, що електродвигун не перевищуватиме допустиму температуру нагрівання при реальному режимі роботи, а отже – відповідає вимогам з теплового навантаження.

Наступним етапом є оцінка можливості двигуна витримувати пікові навантаження. На основі побудованої діаграми навантаження визначають максимальне зусилля F_{max} .

Далі обчислюють фактичне перевантаження:

$$\lambda_{\text{ф}} = \frac{F_{\text{max}}}{F_{\text{еф}}},$$

$$\lambda_{\phi} = \frac{228,6}{134,1} = 1,7.$$

Для електродвигунів постійного струму допустимий коефіцієнт перевантаження становить 2,5:

Порівняння отриманих результатів показує $\lambda_{\phi} < 2,5$. Це свідчить про відповідність двигуна вимогам перевантажувальної здатності. Отже, навіть у режимах максимальних зусиль електропривод здатний працювати без ризику механічного чи електромагнітного перенавантаження.

Таким чином, проведений аналіз показав, що обраний двигун відповідає експлуатаційним вимогам щодо нагріву та перевантажувальної здатності, забезпечуючи надійну роботу шахтного підйомника у циклічному режимі.

2.5 Вибір та обґрунтування комплексу силового електроустаткування схеми електроприводу

Для забезпечення живлення обраного двигуна підйомної установки було прийнято рішення застосувати тиристорний перетворювальний агрегат типу ТПР3-2500/660Т-4010У4. Основні характеристики агрегату наведені нижче:

- номінальний випрямлений струм: $I_{\text{дн}} = 2500 \text{ A}$;
- номінальна випрямлена напруга: $U_{\text{дн}} = 660 \text{ В}$.

Даний агрегат має реверсивну конструкцію, що дозволяє здійснювати роботу двигуна у прямому та зворотному напрямку без додаткових перемикачів. Він розрахований на тривалий безперервний режим експлуатації, а також допускає короткочасні циклічні перевантаження по струму – дворазове збільшення протягом інтервалу до 15 секунд. Для регулювання напруги реверсивних агрегатів передбачений широкий діапазон регулювання $\pm 100\%$, що дозволяє забезпечити гнучке управління швидкістю двигуна.

Конструктивно тиристорний агрегат виконаний за схемою зустрічно-паралельного включення випрямних груп з роздільним управлінням. Викорис-

товується шестифазна еквівалентна схема з паралельним з'єднанням мостів, що забезпечує більш плавний струм у двигуні та зменшення пульсацій.

Для забезпечення необхідної потужності та стабільності роботи перетворювального агрегату вибираємо силовий трансформатор ТМП-2500/10У4. Трансформатор має одну активну частину та передбачає різні варіанти підключення обмоток: з'єднання Y/Y або Δ/Y . Охолодження здійснюється масляне природне, що дозволяє зберегти необхідний температурний режим під час тривалої роботи. Втрати в міді трансформатора (короткозамкнені втрати) становлять $P_{\text{кз}} = 4750 \text{ Вт}$, а напруга короткого замикання – $U_{\text{кз}} = 6,2\%$. Для забезпечення надійності роботи вентильних обмоток дотримується задана міжфазна напруга $U_2 = 570 \text{ В}$.

В якості датчика швидкості обертання ротора вибираємо тахогенератор ПТ-42, який забезпечує безперервний контроль обертів двигуна. Основні технічні параметри тахогенератора: номінальна частота обертання: $n_{\text{н тг}} = 100 \text{ об/хв}$; вихідна напруга: $U_{\text{н тг}} = 230 \text{ В}$; струм якоря: $I_{\text{н тг}} = 0,1 \text{ А}$; напруга збудження: $U_{\text{тг зб}} = 55 \text{ В}$; струм збудження: $I_{\text{тг зб}} = 1 \text{ А}$.

Обрана конфігурація силового ланцюга електроприводу дозволяє:

1. забезпечити надійне живлення двигуна в широкому діапазоні навантажень;
2. виконувати плавне регулювання швидкості та напрямку руху;
3. гарантувати роботу системи у тривалому режимі та витримувати короточасні перевантаження;
4. забезпечити точний контроль швидкості двигуна за допомогою тахогенератора, що необхідно для реалізації алгоритмів управління.

Таким чином, комплексний підбір тиристорного перетворювача, силового трансформатора та датчика обертів формує ефективний і надійний силовий ланцюг для електроприводу шахтного підйомника.

2.6 Розрахунок параметрів силового кола електроприводу підйомного механізму

На початковому етапі розрахунку параметрів електроприводу визначаються ключові характеристики двигуна, необхідні для синтезу системи управління. Сумарний опір якірного кола двигуна включає опір обмотки якоря $R_{\text{я}}$, додаткових полюсів $R_{\text{дп}}$ та компенсаційної обмотки $R_{\text{ко}}$, приведені до робочої температури за допомогою коефіцієнта температурної корекції α_t , який α_t враховує зміни електричних характеристик обмоток під впливом нагріву ($\alpha_t = 1,36$):

$$R_{\text{як}} = \alpha_t \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}}),$$

$$R_{\text{як}} = 1,36 \cdot (0,0118 + 0,00216 + 0,00673) = 0,028 \text{ Ом}.$$

Номінальна електрорушійна сила (ЕРС) двигуна визначається через конструктивні та електромагнітні параметри:

$$E_{\text{д}} = k_{\text{е}} \Phi_{\text{н}} \omega_{\text{н}},$$

$k_{\text{е}}$ – конструктивна стала двигуна;

$\Phi_{\text{н}}$ – номінальне значення магнітного потоку;

$$k_{\text{е}} = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a},$$

$\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова швидкість якоря

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30},$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot 25}{30} = 2,62 \text{ с}^{-1}.$$

Враховуючи, що магнітний потік у робочому режимі електроприводу залишається постійним, добуток конструктивної постійної на магнітний потік $c = k\Phi_{\text{н}}$ можна знайти, спираючись на рівняння електромеханічної характеристики двигуна

$$c = k\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} R_{\text{як}}}{\omega_{\text{н}}},$$

$$c = k\Phi_{\text{н}} = \frac{600 - 2130 \cdot 0,028}{2,62} = 206.$$

$$E_{\text{д}} = 206 \cdot 2,62 = 540,3 \text{ В}$$

Для забезпечення необхідного згладжування пульсацій струму у ланцюзі застосовується індуктивність згладжувального реактора $L_{\text{зр}}$, яка визначається як:

$$L_{\text{зр}} = L_{\text{с}} - L_{\text{д}} - L_{\text{тр}},$$

де $L_{\text{с}}$ – загальна індуктивність силового кола, необхідна для обмеження пульсацій струму;

$L_{\text{д}}$ – індуктивність якорного кола;

$L_{\text{тр}}$ – еквівалентна індуктивність трансформатора, приведена до випрямленого кола

$$L_{\text{с}} = \frac{l_{\text{п}} E_{\text{д0}}}{i_1 \omega_1 I_{\text{нав}}},$$

$l_{\text{п}}$ – відносний рівень основної гармоніки напруги після випрямлення;

i_1 – допустиме значення пульсацій струму першої гармоніки (лежить у межах 0,02...0,15; у розрахунках беремо $i_1 = 0,02$);

$\omega_1 = 2\pi fm$ – кутова частота першої гармоніки;

$m = 6$ – кількість фаз у трифазній мостовій схемі;

$I_{\text{нав}}$ – робочий струм перетворювача, який ототожнюємо з номінальним струмом двигуна $I_{\text{нав}} = I_{\text{н}}$);

E_{d0} – максимальне значення випрямленої ЕРС

$$E_{\text{d0}} = \sqrt{2} E_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m},$$

E_2 – ЕРС вторинної обмотки трансформатора, $E_2 = U_2 = 570 \text{ В}$

$$E_{\text{d0}} = \sqrt{2} \cdot 570 \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} = 770 \text{ В}.$$

Щоб визначити величину $I_{\text{н}}$, необхідно знати граничний кут регулювання, який знаходять за рівнянням швидкісної характеристики електропривода:

Величину визначаємо для граничного кута регулювання, який визначається з виразу для швидкісної характеристики електроприводу:

$$\omega_{\text{min}} = \frac{E_{\text{d0}} \cdot \cos \alpha - \Delta U_{\text{в}} - R_{\Sigma} I_{\text{н}}}{c},$$

де $\Delta U_{\text{в}}$ – падіння напруги на тиристорах одного плеча під час провідного інтервалу ($\Delta U_{\text{в}} = (1 \div 2) \text{ В}$, беремо $\Delta U_{\text{в}} = 1,5 \text{ В}$);

R_{Σ} – опір якорного кола в нагрітому стані;

$$R_{\Sigma} = R_{\text{як}} + R_{\text{етп}} + R_{\text{зр}} + 2R_{\text{тр}},$$

$R_{\text{як}}$ – опір якорного ланцюга двигуна, визначуваний для нагрітого стану машини; (визначено вище);

$R_{\text{етп}}$ – еквівалентний опір перетворювача;

$R_{\text{зр}}$ – активний опір згладжуючого реактора;

$R_{\text{тр}}$ – приведений активний опір трансформатора

$$R_{\text{е тп}} = 0,5 U_{\text{кз}} \frac{k_{\text{в}} U_{2\phi}}{I_{\text{н}}},$$

$U_{\text{кз}}$ – напруга короткого замикання трансформатора у відносних одиницях;

$k_{\text{в}}$ – коефіцієнт випрямлення схеми, для трифазної мостової схеми $k_{\text{в}} = 2,34$;

$U_{2\phi}$ – фазна напруга вентильної обмотки

$$U_{2\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{570}{1,73} = 330 \text{ В},$$

$$R_{\text{е тп}} = 0,5 \cdot 0,062 \cdot \frac{2,34 \cdot 330}{2130} = 0,0112 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{тр}} \cong 0,1 \cdot l_{\text{п}} \cdot \frac{\pi}{m} \cdot \frac{E_{d0}}{I_{\text{н}}},$$

$$R_{\text{тр}} = 0,1 \cdot 0,062 \cdot \frac{3,14}{6} \cdot \frac{770}{2130} = 0,00235 \text{ Ом},$$

$$R_{\Sigma} = 0,028 + 0,0112 + 0 + 2 \cdot 0,00235 = 0,044 \text{ Ом}.$$

Приймаємо $\omega_{\text{min}} = 0,1 \cdot \omega_{\text{н}} = 0,1 \cdot 2,62 = 0,262 \text{ с}^{-1}$.

Тоді обчислюємо:

$$\cos \alpha = \frac{c \cdot \omega_{\text{min}} + \Delta U_{\text{в}} + R_{\Sigma} \cdot I_{\text{н}}}{E_{d0}};$$

$$\cos \alpha = \frac{206 \cdot 0,262 + 1,5 + 0,044 \cdot 2130}{770} = 0,193,$$

$$\alpha = \arccos 0,193 = 78^{\circ}34'.$$

Отриманому куту відповідає $l_{\text{п}} = 0,22$

$$L_c = \frac{0,22 \cdot 770}{2130 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 6 \cdot 0,02} = 0,00312 \text{ Гн}.$$

Індуктивність обмотки якоря визначається за формулою:

$$L_{\text{я}} = \gamma \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}} \omega_{\text{н}} p}$$

де γ – коефіцієнт компенсації, що лежить у межах 0,1–0,25 для компенсованих машин (беремо $\gamma = 0,1$);

$U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$, $\omega_{\text{н}}$ – номінальні значення напруги, струму та швидкості;

p – кількість пар полюсів;

$$L_{\text{д}} = \frac{0,1 \cdot 600}{2130 \cdot 2,62 \cdot 4} = 0,0027 \text{ Гн}.$$

Еквівалентна індуктивність трансформатора, приведена до випрямленого кола, обчислюється за виразом:

$$L_{\text{тр}} = \gamma \frac{l_{\text{п}} U_{2\phi} k_{\text{с}}}{2\pi I_{\text{н}} f},$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{0,062 \cdot 220 \cdot 2,35}{2130 \cdot 2\pi \cdot 50} = 0,07 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Після визначення усіх складових одержуємо:

$$L_{\text{зр}} = 0,00312 - 0,0027 - 2 \cdot 0,07 \cdot 10^{-3} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

За каталогом обираємо реактор СРОС3-1250У4, індуктивність якого становить $L_{\text{зр}} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

Сумарна індуктивність силового ланцюга обчислюється як:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{як}} + 2 \cdot L_{\text{тр}} + L_{\text{зр}},$$

$$L_{\Sigma} = 0,0027 + 2 \cdot 0,07 \cdot 10^{-3} + 0,32 \cdot 10^{-3} = 0,00316 \text{ Гн}.$$

Електромагнітна постійна часу силового ланцюга визначається за відношенням сумарної індуктивності до сумарного опору ланцюга:

$$T_e = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}},$$

$$T_e = \frac{0,00316}{0,044} = 0,07 \text{ с}.$$

Електромеханічна постійна часу визначається за формулою:

$$T_m = J_{\Sigma} \frac{R_{\Sigma}}{c^2},$$

де J_{Σ} – повний момент інерції, приведений до вала машини. Він складається з моменту інерції двигуна і інерції елементів механічної передачі, що обертаються зі швидкістю двигуна $J_{д\Sigma}$, а також моментів інерції каната J'_k і скіпа з вантажем J'_b

Момент інерції каната:

$$J'_b = (m_b + m_{ск}) \rho^2,$$

ρ – радіус приведення

$$\rho = \frac{V_{\max}}{\omega_d} = \frac{D_6}{2} = \frac{5}{2} = 2,5,$$

$$J'_b = (11 + 8) \cdot 10^3 \cdot 2,5^2 = 116 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

За умов заданої глибини підйому маємо співвідношення $\frac{J'_b}{J_{\Sigma}} = 0,19$, тому

$$J_{\Sigma} = \frac{J'_b}{0,19} = \frac{116 \cdot 10^3}{0,19} = 610 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$T_m = 610 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,044}{206^2} = 0,48 \text{ с}.$$

Середнє значення коефіцієнта підсилення тиристорного перетворювача визначимо за формулою

$$k_{\text{тп}} = \frac{1,3 \cdot E_{d0}}{U_y},$$

де U_y – керуюча напруга на вході СІФУ (у межах лінійного режиму). Приймаємо $U_y = 15 \text{ В}$

$$k_{\text{тп}} = \frac{1,3 \cdot 770}{15} = 67.$$

Коефіцієнт підсилення двигуна дорівнює:

$$k_d = \frac{1}{c},$$

$$c = k\Phi_n = 206,$$

$$k_d = \frac{1}{206} = 4,85 \cdot 10^{-3}.$$

Таким чином, детальний розрахунок параметрів силового кола, включаючи опори, індуктивності та постійні часу, є основою для проектування надійної та ефективної системи управління електроприводом шахтного підйомника.

2.7 Визначення раціональної структурної конфігурації системи автоматичного управління

Зі збільшенням вимог до точності регулювання та розширенням робочих меж швидкості керування для шахтних підйомних машин доцільно впроваджувати системи автоматичного управління (САУ), що реалізують принцип част-

кової або повної компенсації збурюючих дій. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільність роботи приводу навіть за наявності зовнішніх і внутрішніх коливань та варіацій навантаження.

Основним завданням системи автоматичного регулювання швидкості є формування заданих статичних і динамічних характеристик приводу. Якість досягнення цих характеристик визначається обраною структурою САУ та природою вхідного впливу. Для технологічних вимог приводу шахтних підйомних машин найбільш ефективною є двократно-інтегруюча структура підлеглого управління із задаючою дією, що надходить від пристрою задавання інтенсивності. Цей задавач формує сигнал завдання швидкості відповідно до заздалегідь визначеної швидкісної діаграми підйомної установки, враховуючи допустимі значення прискорення та його похідної, тобто ривка, що гарантує безпечний і стабільний рух вантажу.

Таке структурне рішення забезпечує плавне регулювання швидкості підйому, мінімізацію коливань механізму та захист обладнання від надмірних динамічних навантажень.

2.8 Математичний опис динаміки та формування передавальних функцій об'єкта управління

Об'єктом управління в досліджуваній системі є електропривод, що включає тиристорний перетворювач разом із системою імпульсного формування управління (СІФУ) та електродвигун, керований по ланцюгу якоря.

Тиристорний перетворювач є дискретним нелінійним пристроєм, який перетворює неперервний сигнал керування $U_y(t)$ у дискретні моменти відкриття тиристорів $\alpha_i(t)$. Після цього відбувається зворотне перетворення дискретних значень у шматково-безперервний сигнал ЕРС на вході двигуна $E_d(t)$. Дискретна природа процесів у перетворювачі може бути представлена як ланка

з широтно-імпульсною модуляцією другого типу (ШІМ-II), де вершини імпульсів наближено зображуються відрізками синусоїд лінійної напруги.

Згідно з теоремою Котельникова, тиристорний перетворювач пропускає без втрати інформації тільки сигнали з частотою нижче граничної $\omega_{\text{гр}} = 2\pi f \frac{m}{2}$, що визначається кількістю фаз перетворювача m та частотою живлячої мережі f . Для забезпечення можливості зведення імпульсної системи до еквівалентного безперервного опису необхідно, щоб частота квантування $\omega = \frac{1}{T}$ (T – період квантування) перевищувала як мінімум утричі частоту вхідного сигналу $\omega_{\text{гр}}$, тобто $\omega \leq 3\omega_{\text{гр}}$.

Динамічні властивості тиристорного перетворювача в режимі безперервного струму часто моделюються як послідовне з'єднання лінійної безінерційної ланки з коефіцієнтом підсилення $k_{\text{тп}}$ та ланки чистого запізнювання із середньою постійною часу $\tau = (m \cdot f)^{-1}$, тобто $W_{\text{тп}}(p) = k_{\text{тп}} e^{-\tau p}$. Множник $e^{-\tau p}$ зазвичай апроксимується першими двома членами степеневого ряду розкладу, що дозволяє отримати передавальну функцію виду:

$$W_{\text{тп}}(p) = \frac{k_{\text{тп}}}{\tau p + 1}.$$

З урахуванням фільтруючих властивостей вхідних ланцюгів СІФУ тиристорний перетворювач може бути представлений схемою, наведеною на рис. 2.2.

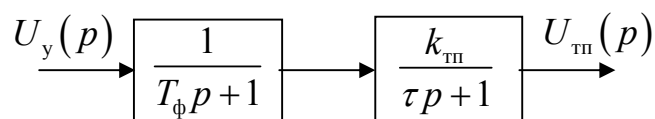


Рисунок 2.2 – Структурно-алгоритмічна схема роботи тиристорного перетворювача

Динаміку електродвигуна описуємо рівняннями для випадку регулювання через якірний ланцюг. Алгоритмічна схема двигуна постійного струму з незалежним збудженням представлена на рис. 2.3. Двигун є багатовимірною системою з двома входами – управляючою дією $U_d(t)$ та збуджуючою дією $M_{ст}(I_{ст})(t)$ і трьома виходами: частота обертання $\omega_d(t)$, струм силового ланцюга якоря $I_d(t)$ та кут повороту валу $\beta_d(t)$. При аналізі регулювання швидкості вихід $\beta_d(t)$ не враховується.

Передавальні функції двигуна визначаються як:

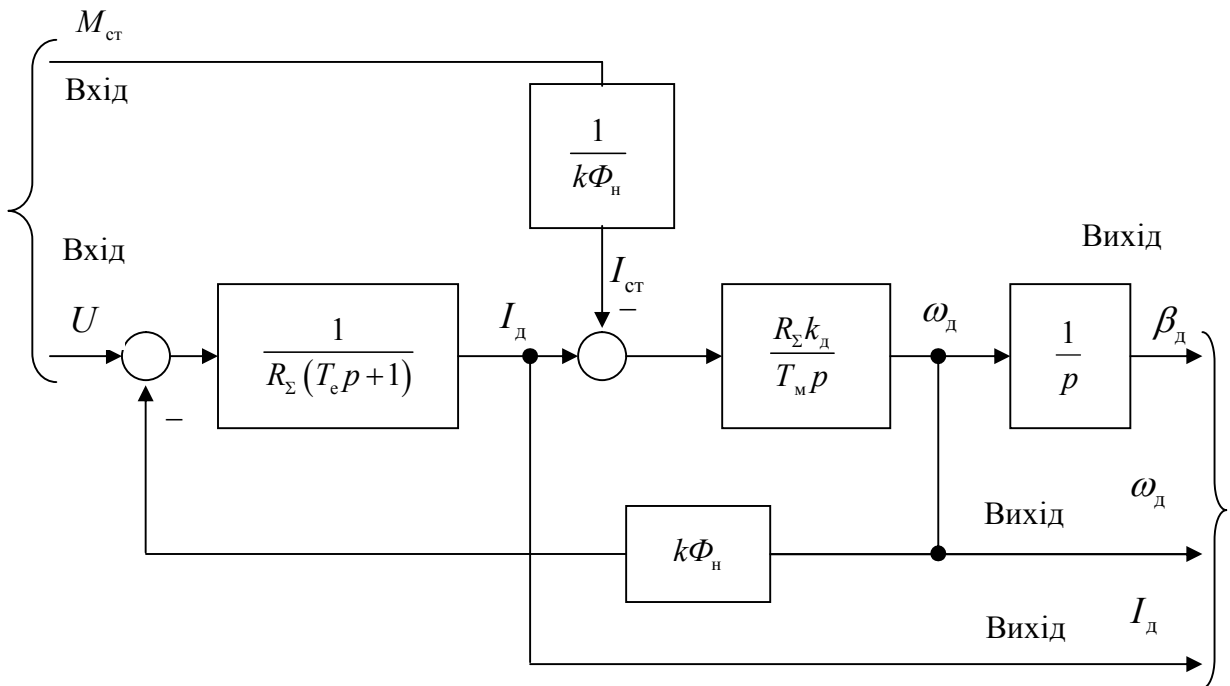


Рисунок 2.3 – Алгоритмічна діаграма електропривода з двигуном постійного струму, в якому регулювання здійснюється через якірний ланцюг

$$W_{I_d U_d}(p) = \left. \frac{I_d(p)}{U_d(p)} \right|_{I_{ст}=0} = \frac{T_m \cdot p}{R_\Sigma (1 + T_m p + T_e T_m p^2)};$$

$$W_{\omega_d U_d}(p) = \left. \frac{\omega_d(p)}{U_d(p)} \right|_{I_{ст}=0} = \frac{k_d}{1 + T_m p + T_e T_m p^2};$$

$$W_{I_d I_{ct}}(p) = \frac{I_d(p)}{I_{ct}(p)} \bigg|_{\Delta U=0} = \frac{1}{1 + T_m p + T_e T_m p^2};$$

$$W_{\omega_d I_{ct}}(p) = \frac{\omega_d(p)}{I_{ct}(p)} \bigg|_{\Delta U_d=0} = \frac{R_\Sigma k_d (1 + T_e p)}{1 + T_m p + T_e T_m p^2}.$$

Параметри цих функцій залежать від електричних характеристик двигуна та механічної інерції навантаження.

Як слідує з алгоритмічної схеми, двигун постійного струму з керуванням по ланцюгу якоря є астатичною системою першого порядку по управляючій дії $U_d(t)$ та виходу $\omega_d(t)$, і статичною системою по збурюючій дії $I_{ct}(t)$ з негативним зворотним зв'язком по швидкості..

2.9 Синтез послідовного коригувального пристрою контуру струму з урахуванням динаміки об'єкта

Процес розрахунку та оптимізації контура струму здійснюється на основі ряду допущень:

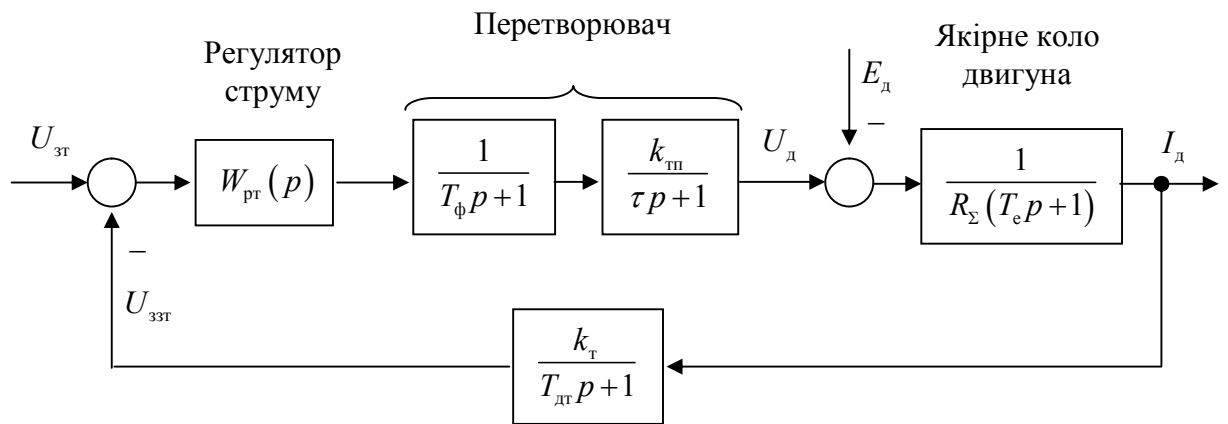
1. Використовується реверсивна схема управління електроприводом із роздільним керуванням групами вентилів, при цьому виключається наявність зрівняльних струмів.

2. На вході датчика струму встановлено фільтр із постійною часу T_{dt} , що забезпечує згладжування сигналу зворотного зв'язку та стабільний коефіцієнт підсилення підсилювачів у схемі.

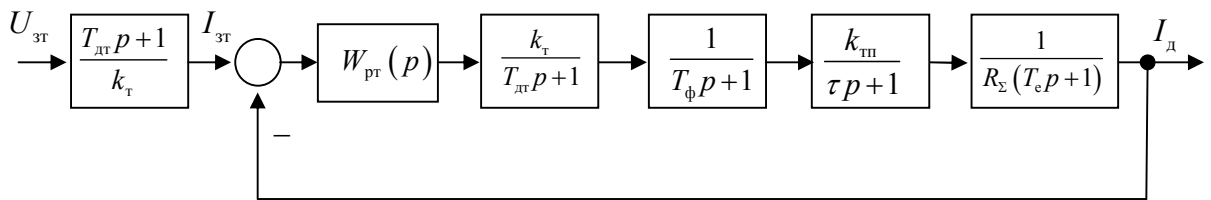
3. На вході системи імпульсного формування управління (СІФУ) також передбачений фільтр із постійною часу T_ϕ .

4. Не враховується протии-ЕРС двигуна.

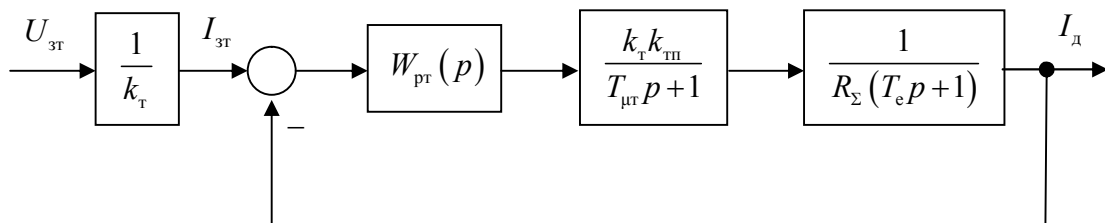
На рис. 2.4а показана схема, що відображає структуру контуру струму.



а)



б)



в)

Рисунок 2.4 – Алгоритмічні схеми контуру регулювання струму:

а) початкова, базова схема; б) модифікований варіант схеми з одиничним зворотним зв'язком; в) результуюча обчислювальна схема

Для застосування загальноприйнятих методик синтезу послідовних коректуючих пристроїв алгоритмічну схему доцільно перетворити до еквівалентної схеми з одиничним зворотним зв'язком, що показано на рис. 2.4 б.

Мала некоректована постійна часу контура струму визначається як сума малих постійних часу окремих ланок системи:

$$T_{\mu\Gamma} = T_{\Phi} + T_{\Delta\Gamma} + \tau$$

З урахуванням цього перетворення схема набуває вигляду, представленого на рис. 2.4 в. При цьому форсуюча ланка $(1 + T_{\Delta\Gamma} p)$ на вході системи у рамках загальноприйнятої методики не враховується. Величину $T_{\mu\Gamma}$ приймають у межах, що рекомендовані практикою: $T_{\mu\Gamma} = 5\text{мс}$.

Оптимізацію контура струму проводять на основі модульного критерію, за яким передавальна функція оптимізованого розімкненого контуру має форму:

$$W_{\text{от}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu\Gamma} p \cdot (1 + T_{\mu\Gamma} p)}$$

Згідно з рис. 2.4в передавальна функція об'єкта управління визначається як

$$W_{\text{обт}}(p) = \frac{k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}}{R_{\Sigma} (1 + T_{\mu\Gamma} p)(1 + T_{\epsilon} p)},$$

де $k_{\text{т}}$ – Коефіцієнт передачі струмового зворотного зв'язку

Виходячи із співвідношення:

$$W_{\text{от}}(p) = W_{\text{рт}}(p) \cdot W_{\text{обт}}(p)$$

передавальна функція регулятора струму визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} W_{\text{рт}}(p) &= \frac{W_{\text{от}}(p)}{W_{\text{обт}}(p)} = \frac{\frac{1}{2T_{\mu\Gamma} p \cdot (1 + T_{\mu\Gamma} p)}}{\frac{k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}}{R_{\Sigma} (1 + T_{\mu\Gamma} p)(1 + T_{\epsilon} p)}} = \\ &= \frac{R_{\Sigma}}{2T_{\mu\Gamma} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \frac{1 + T_{\epsilon} p}{p} = k_{\text{рт}} \frac{1 + T_{\epsilon} p}{p}, \end{aligned}$$

де $k_{\text{рт}} = \frac{R_{\Sigma}}{2T_{\text{мт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}}$ – підсилювальний коефіцієнт регулятора струму.

Знайдену передавальну функцію можливо реалізувати через використання стандартного ПІ-регулятора.

Максимальний струм якорного ланцюга визначається з рекомендованих нормативних співвідношень $I_{\text{max}} = 2,5I_{\text{н}} = 2,5 \cdot 2130 = 5325 \text{ A}$. Величину максимальної напруги завдання струму $U_{\text{зт max}}$ (вихід регулятора швидкості) приймаємо рівною $U_{\text{зт max}} = 24 \text{ В}$. Тоді коефіцієнт підсилення ланцюга зворотного зв'язку за струмом становить:

$$k_{\text{т}} = \frac{U_{\text{зт max}}}{I_{\text{max}}},$$

$$k_{\text{т}} = \frac{24}{5325} = 0,0045 \text{ В / А}.$$

Передавальна функція замкнутого оптимізованого контура струму набуває остаточної форми:

$$W_{\text{зт}}(p) = \frac{1}{k_{\text{т}}} \cdot \frac{1}{2T_{\text{мт}}^2 p^2 + 2T_{\text{мт}} p + 1}. \quad (2.2)$$

Таким чином, синтез послідовного коректуючого пристрою дозволяє реалізувати стабільний, високоточно регульований контур струму, який забезпечує надійну роботу електроприводу при всіх допустимих режимах навантаження.

2.10 Синтез послідовного коригувального пристрою контуру швидкості для забезпечення необхідних показників якості

У системах, де використовується регулятор швидкості, саме контур регулювання швидкості розташовується зовні, тому його власні динамічні характеристики повністю формують динаміку всього регулятора.

До об'єкта керування цього контуру належать такі складові:

- механічна частина електропривода, яка може розглядатися як ідеальна інтегрувальна ланка з коефіцієнтом підсилення $R_{\Sigma} k_{\partial} / T_{\text{м}}$;
- оптимізований контур струму, поведінка якого описується передавальною функцією (2.2);
- датчик швидкості, що найчастіше реалізується у вигляді тахогенератора постійного струму.

Сигнал, сформований датчиком швидкості, додатково проходить через фільтруючу аперіодичну ланку з постійною часу $T_{\text{дш}}$. Відповідна алгоритмічна схема системи наведена на рисунку 2.5, а.

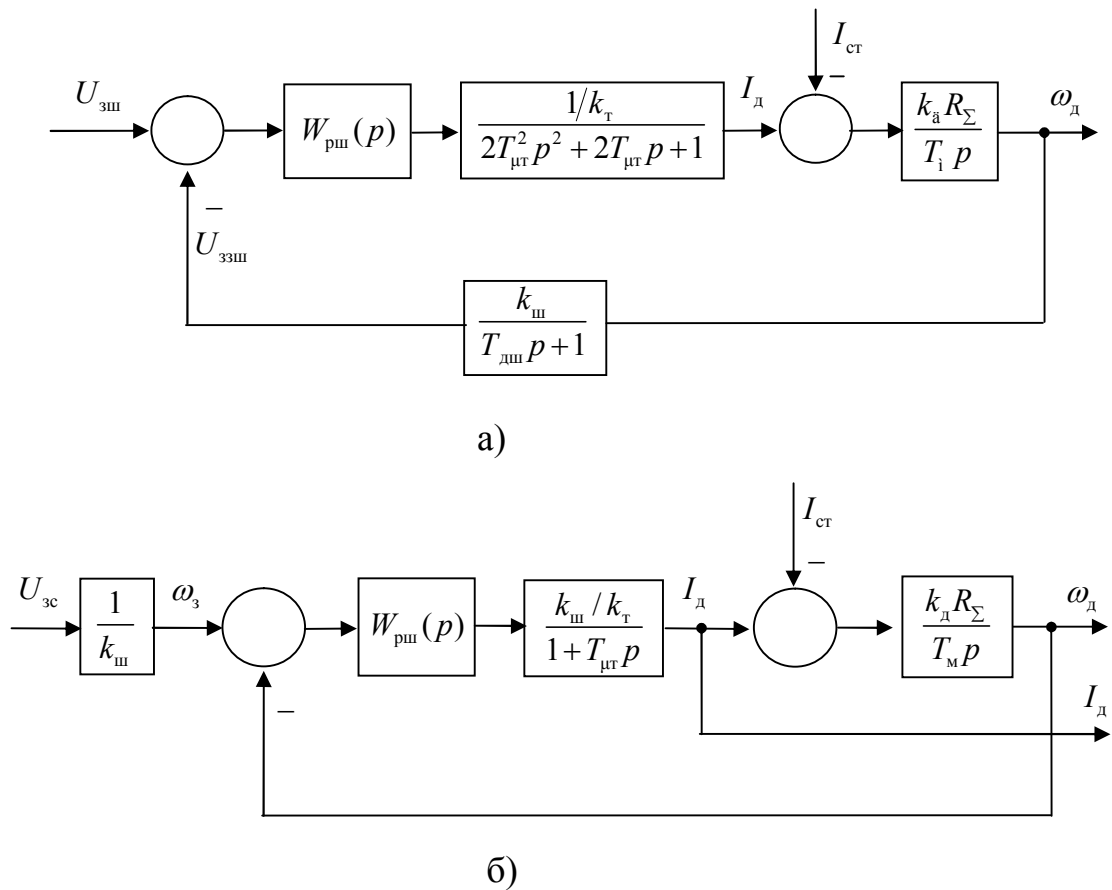


Рисунок 2.5 – Алгоритмічні схеми контуру регулювання швидкості:

а) – початкова схема; б) – результуюча обчислювальна схема

Налаштування (оптимізацію) контуру регулювання швидкості здійснимо, використовуючи симетричний критерій.

Для подальшого синтезу послідовного коректуючого пристрою контур

швидкості перетворюють до еквівалентної схеми з одиничним зворотним зв'язком (рис. 2.5 б), що дозволяє застосувати стандартні методики оптимізації.

Некомпенсована мала постійна часу контура швидкості визначається як

$$T_{\mu\text{ш}} = 2T_{\mu\text{т}} + T_{\text{дш}} .$$

Для практичних розрахунків приймаємо $T_{\text{дш}} = 0$, тоді

$$T_{\mu\text{ш}} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,01 \text{ с} ,$$

що дозволяє забезпечити достатню швидкодію контуру.

Бажану передавальну функцію розімкненого контуру регулювання швидкості, оптимізовану за симетричним критерієм, можна подати у вигляді

$$W_{\text{бш}}(p) = \frac{1 + 4T_{\mu\text{ш}}p}{8T_{\mu\text{ш}}^2 p^2 (1 + T_{\mu\text{ш}}p)} .$$

Щоб отримати передавальну функцію регулятора швидкісного контуру, поділимо бажану функцію на передавальну функцію об'єкта керування. У результаті дістанемо вираз:

$$\begin{aligned} W_{\text{рш}}(p) &= \frac{W_{\text{бш}}(p)}{W_{\text{обш}}(p)} = \frac{\frac{1 + 4T_{\mu\text{ш}}p}{8T_{\mu\text{ш}}^2 p^2 (1 + T_{\mu\text{ш}}p)}}{\frac{k_{\text{ш}}k_{\text{д}}R_{\Sigma}}{k_{\text{т}}T_{\text{м}}}} \cdot \frac{1}{p(1 + T_{\mu\text{ш}}p)} = \\ &= \frac{T_{\text{м}}k_{\text{т}}}{8T_{\mu\text{ш}}^2 k_{\text{д}}k_{\text{ш}}R_{\Sigma}} \cdot \frac{1 + 4T_{\mu\text{ш}}p}{p} = k_{\text{рш}} \cdot \frac{1 + 4T_{\mu\text{ш}}p}{p}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

де $k_{\text{рш}} = \frac{T_{\text{м}}k_{\text{т}}}{8T_{\mu\text{ш}}^2 k_{\text{д}}k_{\text{ш}}R_{\Sigma}}$ – коефіцієнт підсилення регулятора контура швидкості.

Реалізація передавальної функції (2.3) можлива за допомогою стандартного пропорційно-інтегрального регулятора (ПІ-регулятора).

Далі визначимо коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю $k_{\text{ш}}$:

$$k_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{зш max}}}{\omega_{\text{max}}},$$

де ω_{max} – максимально допустима задана швидкість обертання, яку обираємо як $\omega_{\text{max}} = \omega_0$, де ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{н}}} = U_{\text{н}} \cdot k_{\text{д}},$$

$U_{\text{зш max}}$ – напруга, яку формує задавальний пристрій при швидкості ω_{max} , для розрахунків приймаємо $U_{\text{зш max}} = 24 \text{ В}$:

$$\omega_0 = 600 \cdot 4,85 \cdot 10^{-3} = 2,9 \text{ с}^{-1}.$$

$$k_{\text{ш}} = \frac{24}{2,9} = 8,28$$

Алгоритмічна схема контура швидкості після оптимізації представлена на рис. 2.6.

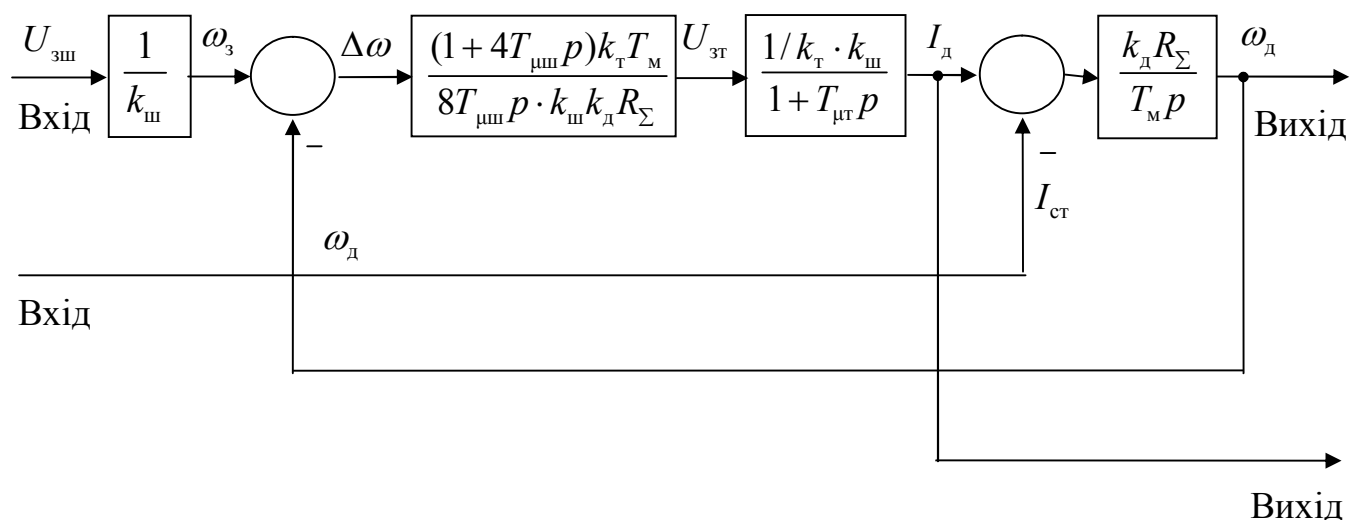


Рисунок 2.6 – Алгоритмічна схема контуру швидкості

При оптимізації за симетричним критерієм у регуляторів швидкості спостерігається суттєве перерегулювання, що сягає приблизно 43% при стрибко-подібній дії задавального сигналу. Щоб зменшити цей негативний ефект, на вхід системи додають фільтр у вигляді аперіодичної ланки з постійною часу $4T_{\mu\text{ш}}$.

Опираючись на алгоритмічну схему, подану на рисунку 2.6, та виконавши структурні перетворення, можна отримати вирази для передавальних функцій оптимізованої системи відносно задавального впливу $U_{\text{зш}}(t)$ та збурення $I_{\text{ст}}(t)$:

$$W_{\omega_d U_{\text{зш}}}(p) = \left. \frac{\omega_d(p)}{U_{\text{зш}}(p)} \right|_{\substack{I_{\text{ст}} = 0 \\ \Phi_{\text{н}} = \text{const}}} = \frac{1}{k_{\text{ш}}} \cdot \frac{1 + 4T_{\mu\text{ш}}p}{8T_{\mu\text{ш}}^3 p^3 + 8T_{\mu\text{ш}}^2 p^2 + 4T_{\mu\text{ш}}p + 1},$$

$$W_{\omega_d I_{\text{ст}}}(p) = \left. \frac{\omega_d(p)}{I_{\text{ст}}(p)} \right|_{\substack{\Phi_{\text{н}} = \text{const} \\ U_{\text{зш}} = \text{const}}} = -\frac{k_d \cdot R_{\Sigma} \cdot 8T_{\mu\text{ш}}^2 p \cdot (1 + T_{\mu\text{с}}p) / T_{\text{м}}}{8T_{\mu\text{ш}}^3 p^3 + 8T_{\mu\text{ш}}^2 p^2 + 4T_{\mu\text{ш}}p + 1},$$

$$W_{I_d U_{\text{зш}}}(p) = \left. \frac{I_d(p)}{U_{\text{зш}}(p)} \right|_{\substack{I_{\text{ст}} = 0 \\ \Phi_{\text{н}} = \text{const}}} = \frac{T_{\text{м}}}{k_d R_{\Sigma} k_{\text{ш}}} \cdot \frac{p(1 + 4T_{\mu\text{ш}}p)}{8T_{\mu\text{ш}}^3 p^3 + 8T_{\mu\text{ш}}^2 p^2 + 4T_{\mu\text{ш}}p + 1},$$

$$W_{I_d I_{\text{ст}}}(p) = \left. \frac{I_d(p)}{I_{\text{ст}}(p)} \right|_{\substack{\Phi_{\text{н}} = \text{const} \\ U_{\text{зш}} = \text{const}}} = \frac{1 + 4T_{\mu\text{ш}}p}{8T_{\mu\text{ш}}^3 p^3 + 8T_{\mu\text{ш}}^2 p^2 + 4T_{\mu\text{ш}}p + 1}.$$

Розгорнута алгоритмічна структура системи подана на рис. 2.7.

Таким чином, синтез послідовного коректуючого пристрою контура швидкості дозволяє отримати систему з оптимальною динамікою, мінімальним перерегулюванням та високою стабільністю роботи при всіх допустимих режимах швидкісного регулювання електроприводу.

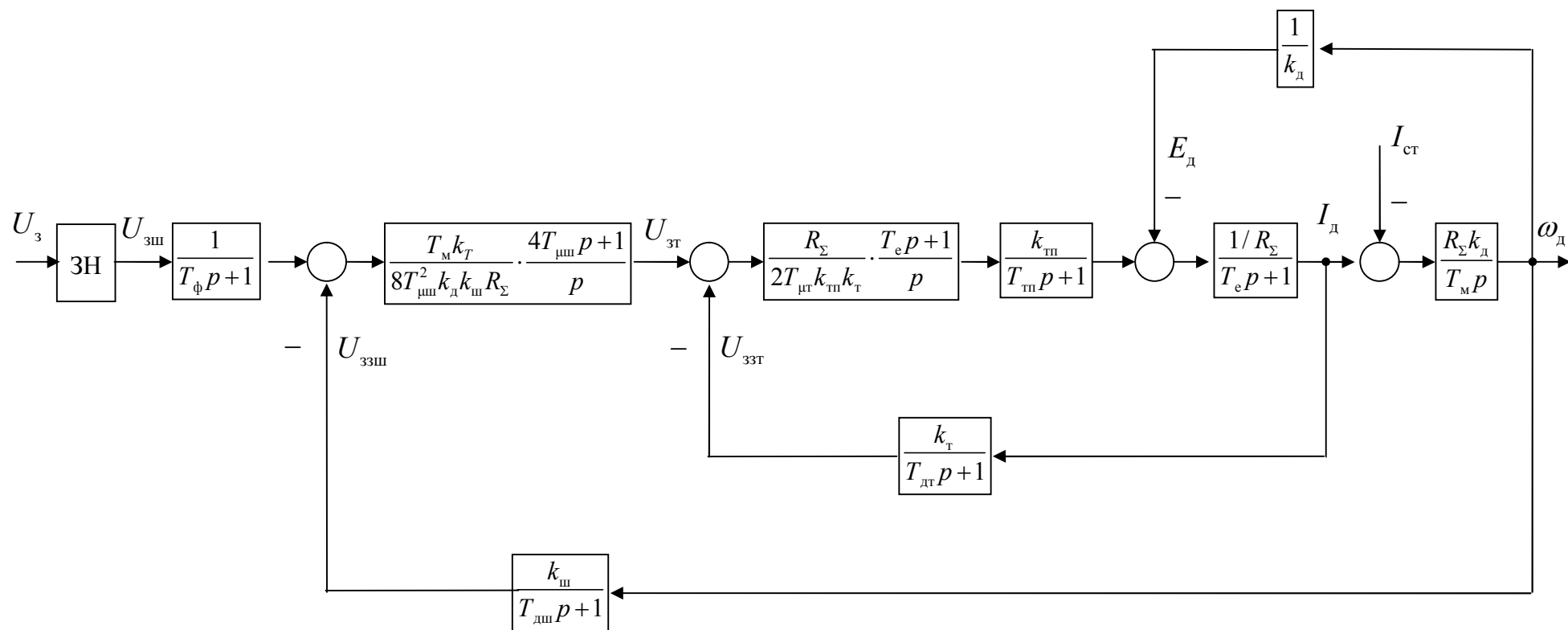


Рисунок 2.8 – Узагальнена структурно-алгоритмічна схема оптимізованої системи

2.11 Аналіз та дослідження динамічних характеристик системи підлеглого регулювання

Одним із ключових етапів синтезу системи автоматичного управління є детальне дослідження її динамічних характеристик, що дозволяє оцінити реакцію системи на задавальні та збурюючі впливи, а також перевірити відповідність проектних рішень встановленим технічним вимогам.

Для цього проведена комп'ютерна симуляція системи з використанням програмного комплексу MATLAB та середовища SIMULINK. На основі отриманих раніше передатних функцій, а також побудованої моделі системи (рис. 2.12), сформовані графіки перехідних процесів змінних стану системи по задавальній та збурюючій діях (рис. 2.13 і 2.14).

Моделювання показало, що при налаштуванні контура швидкості за симетричним критерієм без додаткових коригуючих елементів перерегулювання швидкості може досягати значного значення – 43%. Таке значне перерегулювання є неприйнятним для підйомних установок, оскільки може призвести до підвищених динамічних навантажень на механічні елементи і зниження точності позиціонування вантажу.

Для усунення цього недоліку на вхід контуру системи був включений аперіодичний фільтр із постійною часу $4T_{\mu\phi}$. Після введення фільтру перерегулювання системи знизилося до 8,1%, що відповідає нормативним вимогам щодо динамічних характеристик підйомних електроприводів. На графіках перехідних процесів (рис. 2.13) крива 1 відповідає роботі системи без фільтра, а крива 2 – функціонуванню системи із встановленим фільтром.

Аналіз графіків показав, що введення фільтру не тільки зменшило перерегулювання, але й стабілізувало амплітуду коливань струму та швидкості, підвищивши плавність роботи електроприводу і забезпечивши більш точне виконання задавальної діаграми швидкості. Такий підхід дозволяє підвищити надійність роботи системи та зменшити знос механічних елементів, що особливо важливо для шахтних підйомних машин.

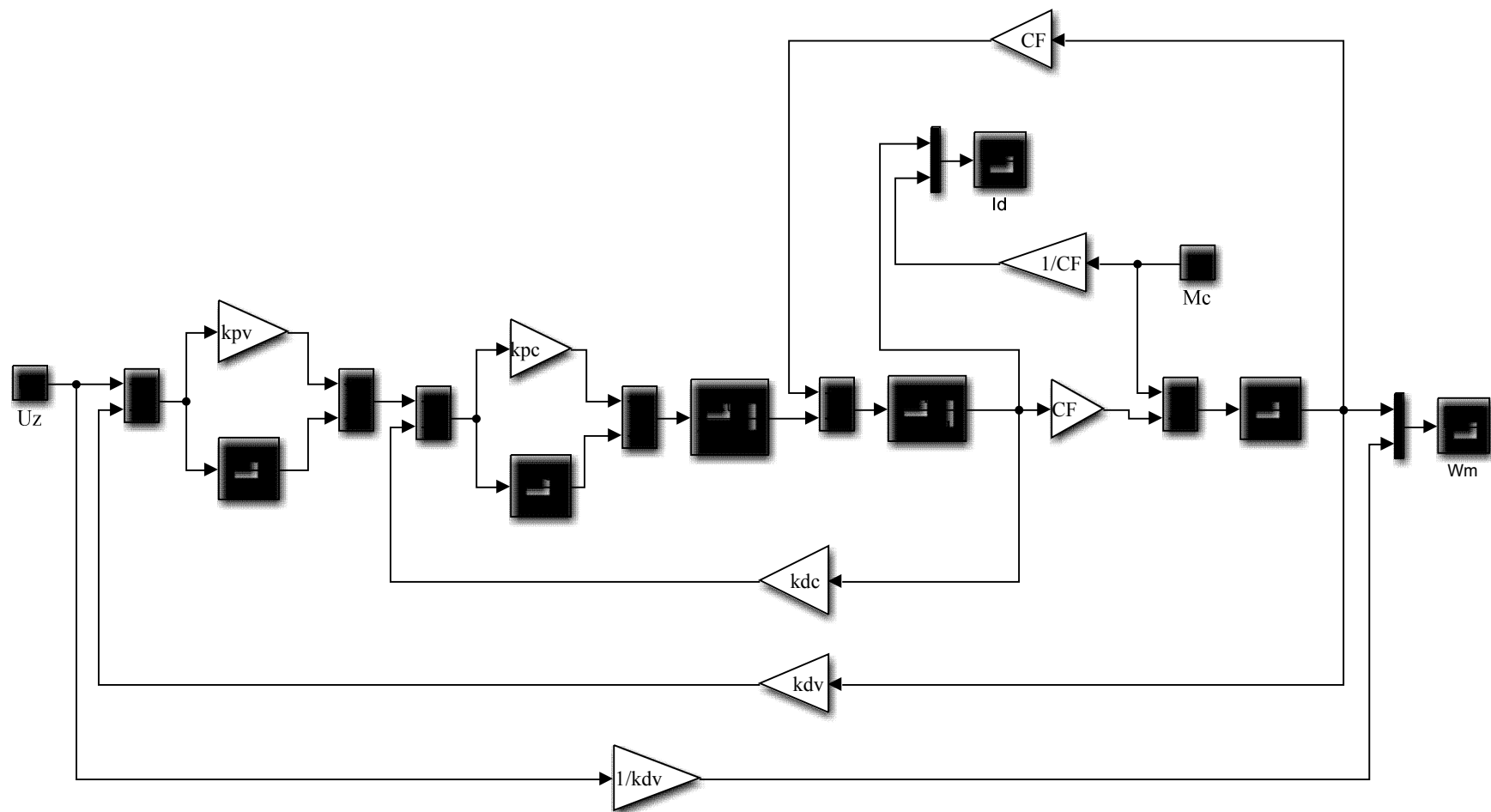
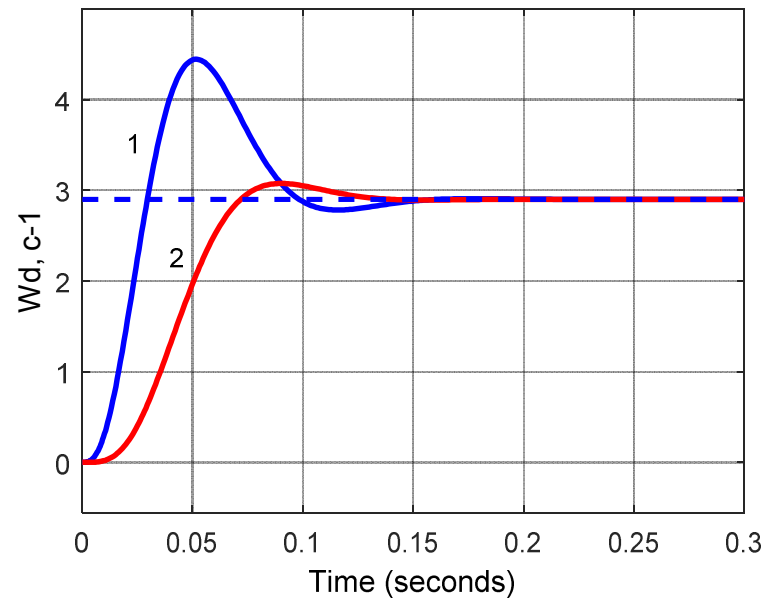
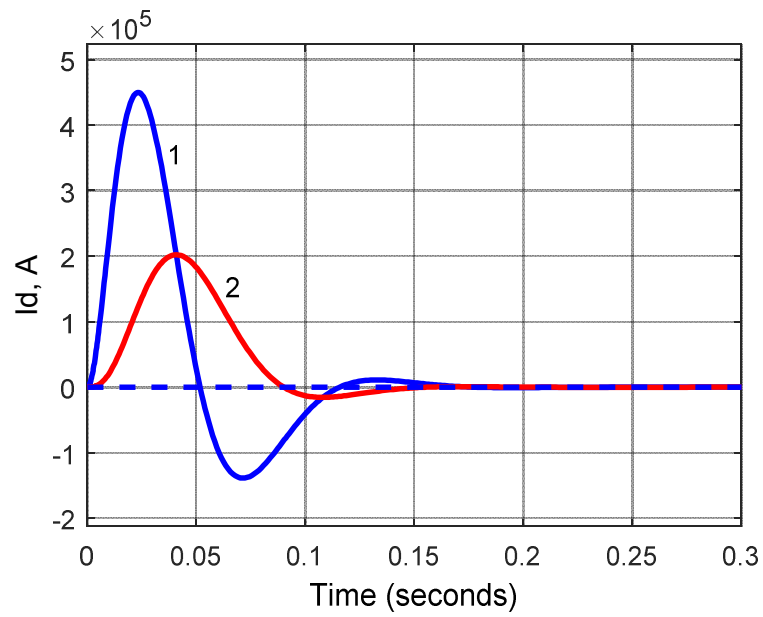


Рисунок 2.12 – Модель системи підлеглого регулювання, реалізована у середовищі MATLAB/SIMULINK



a)

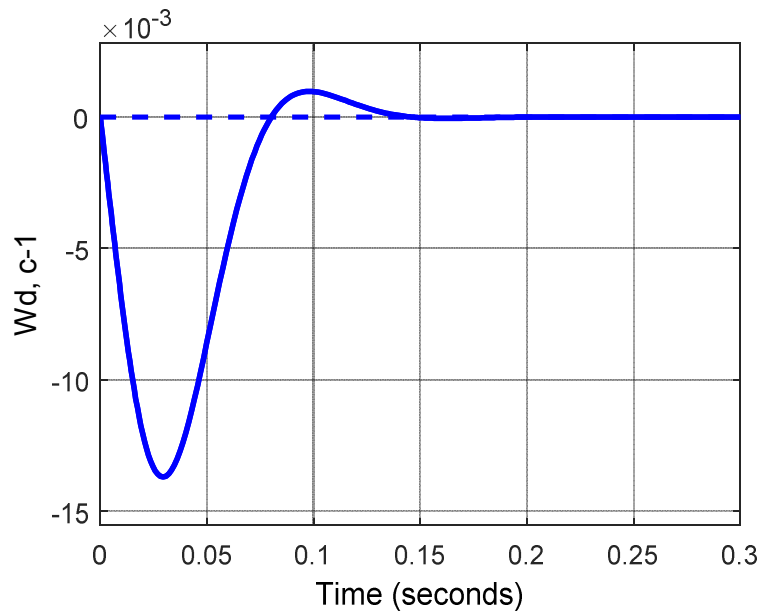


б)

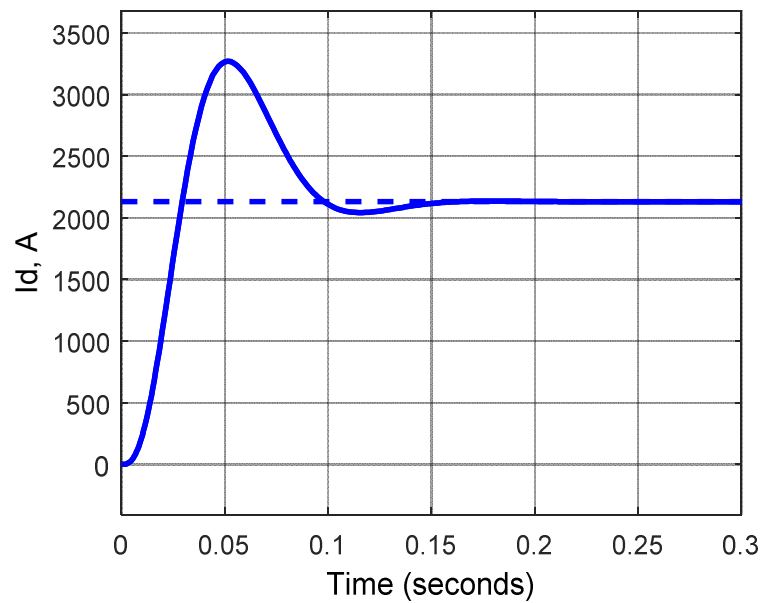
Рисунок 2.13 – Перехідні процеси по задаючій дії:

а) – зміна швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$;

б) – зміна струму двигуна $I_d = f(t)$



a)



б)

Рисунок 2.14 – Перехідні процеси по збурюючій дії:

а) – зміна швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$;

б) – зміна струму двигуна $I_d = f(t)$

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. На основі проведеного аналізу технічних характеристик шахтних підйомних установок та умов їх експлуатації обґрунтовано вибір електроприводу головного підйому. Оптимальним рішенням став безредукторний електропривод постійного струму, виконаний за системою ТП–Д, що забезпечує необхідну надійність, керованість і динамічну точність роботи підйомного механізму.

2. Виконано детальний підбір електродвигуна та ключових елементів силового кола електроприводу. Проведена перевірка двигуна за критеріями нагріву та перевантажувальної здатності, для чого розраховано швидкісні та навантажувальні діаграми. Розрахунки показали, що середньоквадратична потужність двигуна відповідає допустимим нормам нагріву, а максимальне перевантаження не перевищує допустимих значень, що підтверджує правильність вибору двигуна для експлуатації у заданих режимах роботи.

3. Виконано комплексний розрахунок параметрів силового кола електроприводу, що є основою для подальшого синтезу системи автоматичного управління. Розраховані значення індуктивностей, опорів та електромагнітних постійних забезпечують точне моделювання електроприводу та визначення його динамічних властивостей.

4. Проведено вибір та обґрунтування структури системи автоматичного управління. Для забезпечення високої якості регулювання швидкості, оптимальної поведінки перехідних процесів і відповідності механічним характеристикам електроприводу, обрана двоконтурна система підлеглого регулювання. Вона складається з контура струму та контура швидкості, що дозволяє ефективно формувати динамічні та статичні характеристики системи в різних режимах роботи підйомного механізму.

5. Виконано синтез послідовних коректуючих пристроїв для контурів струму та швидкості. Для досягнення необхідних характеристик перехідного процесу були визначені оптимальні співвідношення постійних часу елементів системи. Синтезовані ПІ-регулятори забезпечують оптимізацію роботи конту-

рів: контур струму – за модульним критерієм, контур швидкості – за симетричним критерієм. В результаті отримано систему, яка є астатичною другого порядку по задавальній дії та астатичною першого порядку по збурюючій дії, що забезпечує високий рівень точності, стабільності та динамічної якості управління електроприводом.

6. Проведене дослідження та оптимізація системи показали, що застосування двоконтурного підлеглого регулювання з введенням коректуючих пристроїв дозволяє досягти значного зниження перерегулювання, стабілізації струму та швидкості двигуна, а також зменшення динамічних навантажень на механічні елементи підйомної установки. Це забезпечує надійну, безпечну та ефективну експлуатацію шахтного підйомного механізму у реальних умовах роботи.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОМАСОВОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДЙОМНОГО КАНАТА

3.1 Побудова і математичне обґрунтування моделі двомасової електро- ромеханічної системи з розподіленою пружністю каната

Попередні розрахунки системи автоматичного регулювання швидкості електроприводу підйомної установки базувалися на спрощеному припущенні про ідеальну жорсткість усіх елементів механічної частини, включаючи підйомний канат. Тобто, у тих розрахунках електропривод розглядали як одномасову систему, де пружні деформації каната та інших ланок не враховувалися. Проте у реальних умовах експлуатації підйомні установки мають значно складнішу структуру. Всі елементи механічної системи взаємопов'язані через пружні з'єднання, а підйомний канат є пружним елементом з розподіленими параметрами. Внаслідок цього механізм підйому шахтної підйомної установки є багатомасовою динамічною системою, що складається з ряду взаємопов'язаних мас, які здійснюють як поступальні, так і обертальні рухи.

Ключовим елементом такої системи є підйомний канат, жорсткість якого, хоча й скінченна, суттєво впливає на загальну динаміку установки. Пружні властивості каната призводять до виникнення подовжніх коливань вантажу під час розгону або гальмування, що може негативно позначатися на роботі механізму підйому та знижувати стабільність і точність регулювання. Найбільший вплив на динаміку системи проявляється при знаходженні навантаженої гілки каната у крайньому нижньому положенні вантажного скипа. У той же час, тривалість перехідного процесу під час розгону порівняно невелика, а зміна довжини каната через його намотування на барабан є малою відносно його загальної довжини. Тому в інтервалі часу розгону можна прийняти, що довжина пружного елемента та відповідна йому жорсткість залишаються практично незмінними.

На рисунку 3.1 представлена кінематична схема двохкінцевої шахтної пі-

дйомної установки. На схемі позначено основні компоненти системи: Д – електродвигун, СМ – сполучна муфта, Р – редуктор, Б – барабан, Ш1 та Ш2 – направляючі шківів, С1 та С2 – скипи. Крім того, позначено маси завантаженого m_6 та порожнього m_8 скипів, які враховуються у розрахунках.

Розрахункова схема механічної частини установки наведена на рис.3.2. Прямокутники символізують приведені до валу двигуна моменти інерції елементів установки, причому площі прямокутників пропорційні величинам моментів інерції, а довжини з'єднань між ними обернено пропорційні жорсткості відповідних механічних зв'язків. Особлива увага приділена масі підйомного каната, яка врахована як зосереджена маса (прямокутник 9).

У положенні, коли один із скипів завантажений і знаходиться у крайньому нижньому положенні, а другий скип порожній – у верхньому, механічну схему можна спростити. Порожній скип С2 (елемент 8), пов'язаний через направляючий шків із барабаном Б (елемент 4), через направляючий шків Ш2 (елемент 7) з великою жорсткістю, практично не впливає на динаміку завантаженого скипа, тому жорсткість його зв'язку можна прийняти нескінченно великою. Спрощена схема з урахуванням цього припущення представлена на рис. 3.3.

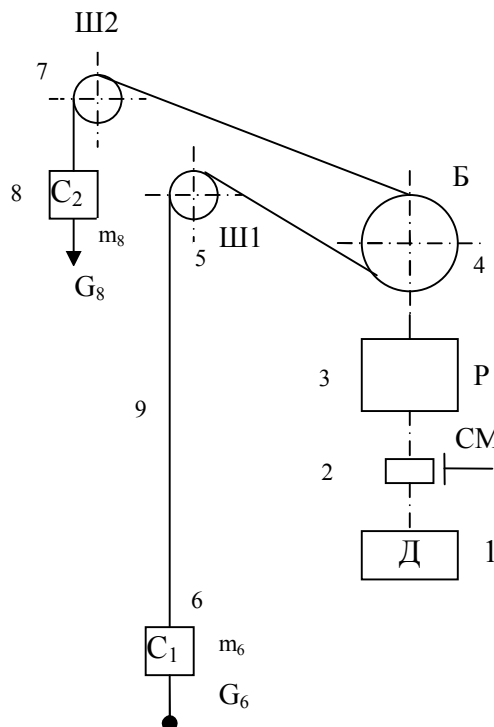


Рисунок 3.1 – Узагальнена кінематична модель двокінцевої шахтної підйомної установки.

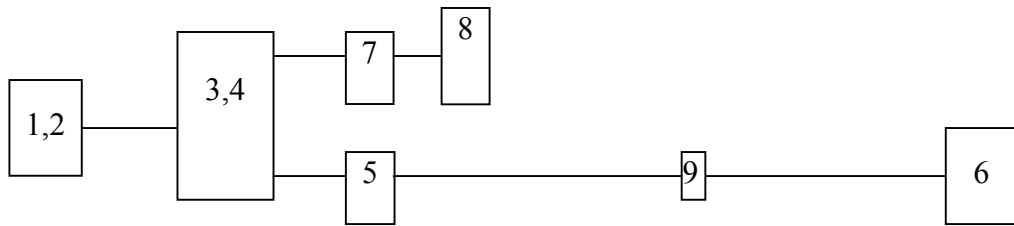


Рисунок 3.2 – Модель механічної частини, прийнята для розрахунку.

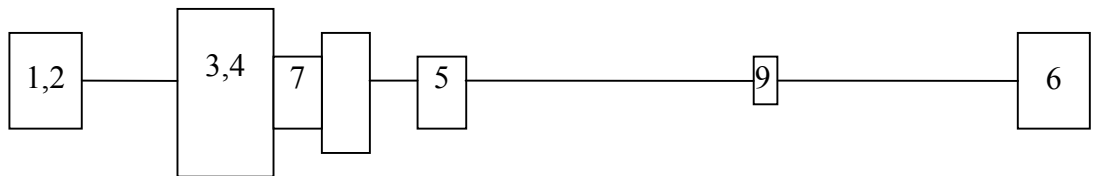


Рисунок 3.3 – Схема механічної частини у спрощеному поданні

З огляду на співвідношення жорсткостей окремих ділянок каната і взаємне розташування мас, механічну частину електропривода можна без помітної втрати точності подати у вигляді тримасової пружної системи. Такий узагальнений варіант наведено на рисунку 3.4.

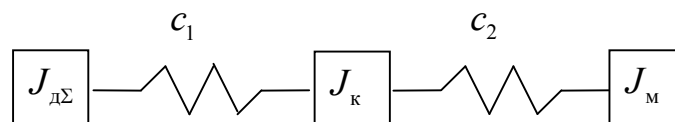


Рисунок 3.4 – Тримасова розрахункова модель механічної підсистеми

Для схеми, поданої на рисунку 3.4, використовуються такі позначення:

$J_{дΣ} = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_7 + J_8 + J_5$ – еквівалентний момент інерції ведучої ланки;

$J_{к} = m_{к1} H \rho^2$ – приведений момент інерції каната (другої маси);

$m_{к1}$ – маса одного погонного метра каната;

$$\rho = \frac{V_{\text{п}}}{\omega_{\text{д}}} = \frac{D_6}{2} - \text{радіус приведення};$$

$J_{\text{м}} = m_6 \rho^2$ – еквівалентний момент інерції навантаженого скипа (третьої маси);

c_1 – приведені жорсткості окремих відрізків каната між масами (для яких виконується $c_1 = c_2 = 2c_{\text{к}}\rho^2$);

$$c_{\text{к}} - \text{загальна жорсткість каната, } c_{\text{к}} = \frac{c_{1\text{к}}}{H};$$

$c_{1\text{к}}$ – жорсткість одного метра підйомного каната.

Для спрощених інженерних розрахунків трьохмасову систему часто заміняють двомасовою моделлю, де другий елемент представляє пружний ефект каната в цілому (рисунок 3.5). Таке спрощення дозволяє зберегти адекватність моделі при значно меншій складності обчислень, що важливо для практичного моделювання і синтезу системи управління.



Рисунок 3.5 – Двомасова розрахункова модель механічної підсистеми

Позначення, прийняті на схемі рисунка 3.5, мають такий зміст:

$$J'_{\text{д}\Sigma} = J_{\text{д}\Sigma} + \frac{J_{\text{к}}}{2}; \quad J'_\text{м} = J_\text{м} + \frac{J_{\text{к}}}{2}; \quad c_{12} = c_{\text{к}}\rho^2.$$

Динаміка механічної частини підйомної установки, що моделюється у вигляді трьохмасової пружної системи, описується рівняннями руху:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{\Sigma} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = k\Phi I_{\text{д}} - M_{\Sigma 1}; \\ J_{\text{к}} \frac{d\omega_{\text{к}}}{dt} = M_{\Sigma 1} - M_{\Sigma 2}; \\ J_{\text{м}} \frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} = M_{\Sigma 2} - M_{\text{ст}}; \\ \frac{dM_{\text{пп1}}}{dt} = c_1 (\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{к}}); \\ \frac{dM_{\text{пп2}}}{dt} = c_2 (\omega_{\text{к}} - \omega_{\text{м}}), \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де $M_{\Sigma 1}$, $M_{\Sigma 2}$ – результуючі моменти, які формуються за рахунок пружних зв’язків між масами:

$$M_{\Sigma 1} = M_{\text{пп1}} + M_{\text{вт1}}, \quad M_{\Sigma 2} = M_{\text{пп2}} + M_{\text{вт2}}$$

$M_{\text{пп1}}$, $M_{\text{пп2}}$ – моменти пружної взаємодії, що виникають у канатних ділянках між окремими масами;

$M_{\text{вт1}}$, $M_{\text{вт2}}$ – моменти в’язкого тертя в канаті:

$$M_{\text{вт1}} = \beta_1 (\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{к}}); \quad M_{\text{вт2}} = \beta_2 (\omega_{\text{к}} - \omega_{\text{м}}),$$

β_1 , β_2 – коефіцієнти внутрішнього в’язкого тертя відповідних ділянок каната.

У разі переходу до двомасової моделі рівняння руху приймають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} J'_{\text{м}} \frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} = M_{\Sigma} - M_{\text{ст}}; \\ \frac{dM_{\text{пп}}}{dt} = c_{12} (\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{м}}); \\ J'_{\Sigma} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = k\Phi I_{\text{д}} - M_{\Sigma}, \end{array} \right. \quad (3.2)$$

де M_{Σ} результуючий момент, що передається через пружний зв'язок, який включає пружну складову $M_{\text{пр}}$ і момент в'язкого демпфування $M_{\text{вт}} = \beta(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{м}})$

$$M_{\Sigma} = M_{\text{пр}} + \beta(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{м}}), \quad (3.3)$$

β – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя каната;

Надалі проведемо аналіз двомасової системи підлеглого регулювання швидкості електропривода. Враховуючи (3.3), перепишемо рівняння (3.2) у формі Коші:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} = \frac{1}{J'_{\text{м}}} M_{\text{пр}} + \frac{\beta}{J'_{\text{м}}} \omega_{\text{д}} - \frac{\beta}{J'_{\text{м}}} \omega_{\text{м}} - \frac{1}{J'_{\text{м}}} M_{\text{ст}}; \\ \frac{dM_{\text{пр}}}{dt} = c_{12} \omega_{\text{д}} - c_{12} \omega_{\text{м}}; \\ \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{k\Phi_{\text{н}}}{J'_{\text{д}\Sigma}} I_{\text{д}} - \frac{1}{J'_{\text{д}\Sigma}} M_{\text{пр}} - \frac{\beta}{J'_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{д}} + \frac{\beta}{J'_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{м}}. \end{cases} \quad (3.4)$$

Спершу проаналізуємо алгоритмічну схему одномасової моделі, наведеної у попередньому розділі, та складемо рівняння стану системи керування без урахування пружних властивостей механічних елементів. Далі, додавши до цієї моделі динамічні рівняння, що описують двомасову систему, отримаємо розширену систему диференціальних рівнянь стану, яка вже враховує пружні зв'язки в механічній частині привода.

Рівняння стану для одномасової системи мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{k\Phi_{\text{н}}}{J_{\Sigma}} I_{\text{д}} - \frac{1}{J_{\Sigma}} M_{\text{ст}}; \\ \frac{dI_{\text{д}}}{dt} = -\frac{k\Phi_{\text{н}}}{R_{\Sigma}T_{\text{е}}} \omega_{\text{д}} - \frac{1}{T_{\text{е}}} I_{\text{д}} + \frac{1}{R_{\Sigma}T_{\text{е}}} U_{\text{тп}}; \\ \frac{dU_{\text{тп}}}{dt} = -\frac{k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{тп}}k_{\text{ш}}}{T_{\text{мт}}} \omega_{\text{д}} - \frac{k_{\text{т}}k_{\text{пт}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{мт}}} I_{\text{д}} - \frac{1}{T_{\text{мт}}} U_{\text{тп}} - \\ - \frac{k_{\text{тп}}}{T_{\text{мт}}} U_{\text{пт}} - \frac{k_{\text{тп}}k_{\text{пт}}}{T_{\text{мт}}} U_{\text{рш}} + \frac{k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{мт}}} U_{\text{з}}; \\ \frac{dU_{\text{пт}}}{dt} = -k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{ит}} \omega_{\text{д}} - k_{\text{ит}}k_{\text{т}} I_{\text{д}} + k_{\text{ит}} U_{\text{рш}} + k_{\text{пш}}k_{\text{ит}} U_{\text{з}}; \\ \frac{dU_{\text{рш}}}{dt} = -k_{\text{ш}}k_{\text{иш}} \omega_{\text{д}} + k_{\text{иш}} U_{\text{з}}. \end{array} \right. \quad (3.5)$$

У цих рівняннях використано такі позначення:

$U_{\text{тп}}(t)$ – вихідна напруга тиристорного перетворювача;

$U_{\text{пт}}(t), U_{\text{рш}}(t)$ – напруги на виходах інтегровальних частин ПІ-регуляторів струму та швидкості;

$k_{\text{пш}}, k_{\text{иш}}, k_{\text{пт}}, k_{\text{ит}}$ – коефіцієнти підсилення пропорційних та інтегральних частин регуляторів струму й швидкості. Їхні значення визначаються з відповідних передатних функцій:

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{T_{\text{м}}k_{\text{т}}}{8T_{\text{мш}}^2k_{\text{ш}}k_{\text{д}}R_{\Sigma}} \frac{1+4T_{\text{мш}}p}{p} = \frac{4T_{\text{мш}}T_{\text{м}}k_{\text{т}}}{8T_{\text{мш}}^2k_{\text{ш}}k_{\text{д}}R_{\Sigma}} + \frac{T_{\text{м}}k_{\text{т}}}{8T_{\text{мш}}^2k_{\text{ш}}k_{\text{д}}R_{\Sigma}} \frac{1}{p} = k_{\text{пш}} + \frac{k_{\text{иш}}}{p},$$

$$k_{\text{пш}} = \frac{4T_{\text{мш}}T_{\text{м}}k_{\text{т}}}{8T_{\text{мш}}^2k_{\text{ш}}k_{\text{д}}R_{\Sigma}}, \quad k_{\text{иш}} = \frac{T_{\text{м}}k_{\text{т}}}{8T_{\text{мш}}^2k_{\text{ш}}k_{\text{д}}R_{\Sigma}},$$

$$W_{\text{пт}}(p) = \frac{R_{\Sigma}}{2T_{\text{мт}}k_{\text{тп}}k_{\text{т}}} \frac{1+T_{\text{е}}p}{p} = \frac{R_{\Sigma}T_{\text{е}}}{2T_{\text{мт}}k_{\text{тп}}k_{\text{т}}} + \frac{R_{\Sigma}}{2T_{\text{мт}}k_{\text{тп}}k_{\text{т}}} \frac{1}{p} = k_{\text{пт}} + \frac{k_{\text{ит}}}{p},$$

$$k_{\text{пт}} = \frac{R_{\Sigma} T_{\text{е}}}{2T_{\text{мт}} k_{\text{тп}} k_{\text{т}}}, \quad k_{\text{ит}} = \frac{R_{\Sigma}}{2T_{\text{мт}} k_{\text{тп}} k_{\text{т}}},$$

Під час формування системи рівнянь (3.5) величини $T_{\text{м}}$ та $k_{\text{д}}$ не використовуються безпосередньо – замість них підставлено відповідні аналітичні вирази, що пов'язують ці змінні з параметрами електроприводу:

$$T_{\text{м}} = J_{\text{д}\Sigma} \cdot \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{(k\Phi_{\text{н}})^2}; \quad k_{\text{д}} = \frac{1}{k\Phi_{\text{н}}}.$$

Крім того, при побудові моделі приймається, що постійними часу датчиків напруги $T_{\text{дн}}$, струму $T_{\text{дт}}$ і швидкості $T_{\text{дш}}$ можна знехтувати в порівнянні з іншими постійнимичасу системи. Це спрощення дозволяє уникнути додаткових аперіодичних ланок у рівняннях стану та робить модель зручнішою для аналітичного оброблення без істотної втрати точності.

Далі виконується доповнення одномасової моделі рівняннями двомасової механічної підсистеми (рівняння (3.4) та (3.5)). Комбінування дає систему диференціальних рівнянь стану двомасової системи в узагальненому вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} = \frac{1}{J'_{\text{м}}} M_{\text{пр}} + \frac{\beta}{J'_{\text{м}}} \omega_{\text{д}} - \frac{\beta}{J'_{\text{м}}} \omega_{\text{м}} - \frac{1}{J'_{\text{м}}} M_{\text{ст}}; \\ \frac{dM_{\text{пр}}}{dt} = c_{12} \omega_{\text{д}} - c_{12} \omega_{\text{м}}; \\ \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{k\Phi_{\text{н}}}{J'_{\text{д}\Sigma}} I_{\text{д}} - \frac{1}{J'_{\text{д}\Sigma}} M_{\text{пр}} - \frac{\beta}{J'_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{д}} + \frac{\beta}{J'_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{м}}; \\ \frac{dI_{\text{д}}}{dt} = -\frac{k\Phi_{\text{н}}}{R_{\Sigma} T_{\text{е}}} \omega_{\text{д}} - \frac{1}{T_{\text{е}}} I_{\text{д}} + \frac{1}{R_{\Sigma} T_{\text{е}}} U_{\text{тп}}; \\ \frac{dU_{\text{тп}}}{dt} = -\frac{k_{\text{пш}} k_{\text{пт}} k_{\text{тп}} k_{\text{ш}}}{T_{\text{мт}}} \omega_{\text{д}} - \frac{k_{\text{т}} k_{\text{пт}} k_{\text{тп}}}{T_{\text{мт}}} I_{\text{д}} - \frac{1}{T_{\text{мт}}} U_{\text{тп}} - \frac{k_{\text{тп}}}{T_{\text{мт}}} U_{\text{рт}} - \frac{k_{\text{тп}} k_{\text{пт}}}{T_{\text{мт}}} U_{\text{рш}} + \frac{k_{\text{пш}} k_{\text{пт}} k_{\text{тп}}}{T_{\text{мт}}} U_{\text{з}}; \\ \frac{dU_{\text{рт}}}{dt} = -k_{\text{ш}} k_{\text{пш}} k_{\text{ит}} \omega_{\text{д}} - k_{\text{ит}} k_{\text{т}} I_{\text{д}} + k_{\text{ит}} U_{\text{рш}} + k_{\text{пш}} k_{\text{ит}} U_{\text{з}}; \\ \frac{dU_{\text{рш}}}{dt} = -k_{\text{ш}} k_{\text{пш}} \omega_{\text{д}} + k_{\text{пш}} U_{\text{з}}. \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Структурно-алгоритмічне подання тримасової моделі, яка ілюструє вхідні та вихідні зв'язки, взаємодію регуляторів і пружних елементів, наведена на рис. 3.6. Ця схема служить наочним відображенням структурних зв'язків, що закладені в матричній моделі (3.6)

Запишемо систему у векторно-матричній формі, доповнивши її рівняннями вихідних величин. Визначимо вектор стану:

$$\vec{X}(t) = [\omega_{\text{м}}(t), M_{\text{пр}}(t), \omega_{\text{д}}(t), I_{\text{д}}(t), U_{\text{тп}}(t), U_{\text{рт}}(t), U_{\text{рш}}(t)]^T$$

а також вектор зовнішніх впливів:

$$\vec{U}(t) = [U_{\text{з}}(t), M_{\text{ст}}(t)]^T$$

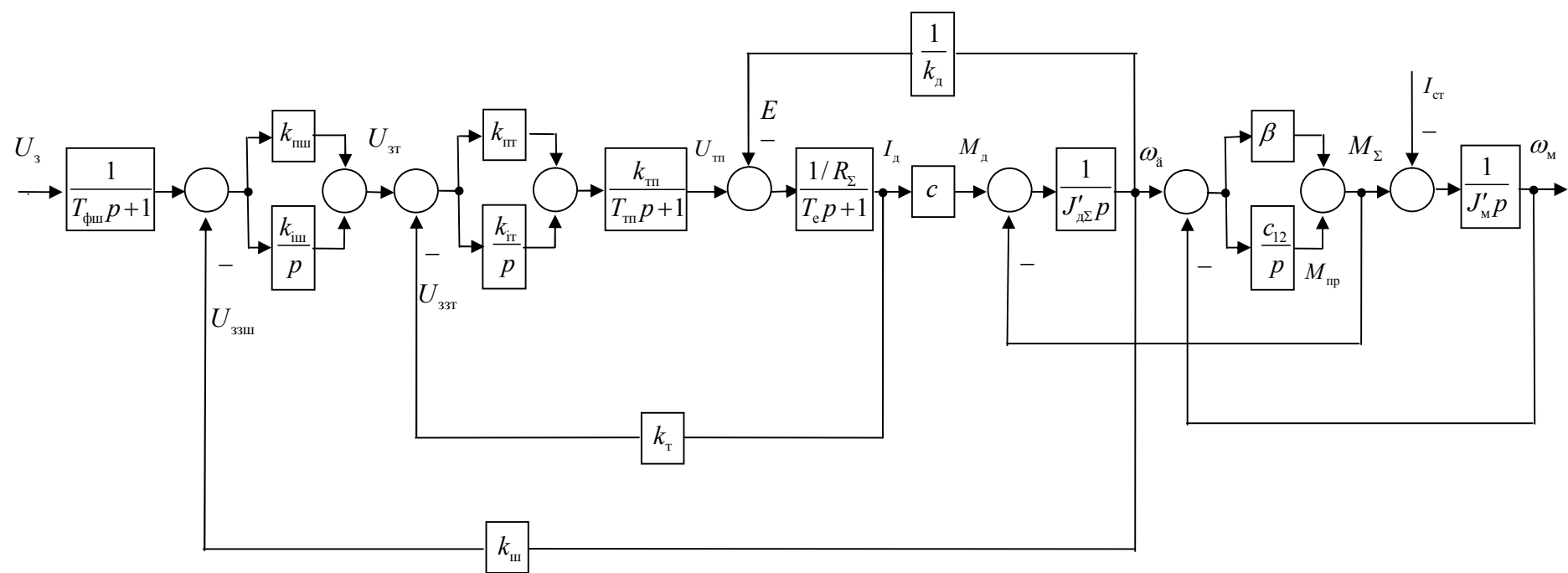


Рисунок 3.6 – Структурно-алгоритмічне подання двомасової моделі

Тепер сформуємо повну систему рівнянь стану, доповнивши її виразом, що описує вихідні координати моделі:

$$\begin{cases} \dot{\vec{X}}(t) = \mathbf{A}\vec{X}(t) + \mathbf{B}\vec{U}(t); \\ \vec{Y}(t) = \mathbf{C}\vec{X}(t), \end{cases} \quad (3.9)$$

де $\mathbf{A}$ – матриця стану двомасової системи, що агрегує лінійну залежність між змінними стану (включає відображення взаємного впливу електричної та механічної підсистем через моментні та рухові співвідношення);;

$\mathbf{B}$ – матриця впливу зовнішніх сигналів на змінні стану;

$\mathbf{C}$ – матриця, що визначає зв'язок між внутрішніми змінними системи та її вимірюваними параметрами, тобто формує вихідний сигнал моделі;

$\vec{Y}(t)$ – вектор вихідних величин, що характеризують реакцію системи на зовнішні дії..

Нижче наведено матриці стану $\mathbf{A}$ та матриці керування $\mathbf{B}$, які описують динаміку двомасової моделі в просторі станів.

Таким чином, у результаті поетапного оформлення – спочатку одномасової моделі електрично-механічного контуру, потім доповнення її пружними зв'язками тримасової механіки – отримано повнорозмірну модель стану (3.8), придатну для подальшого моделювання в MATLAB/SIMULINK.

Матриці **A** і **B** двомасової системи

$$\mathbf{A} = \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c} \omega_{\text{м}} & M_{\text{пр}} & \omega_{\text{д}} & I_{\text{д}} & U_{\text{тп}} & U_{\text{рт}} & U_{\text{рш}} \\ \hline -\frac{\beta}{J'_{\text{м}}} & \frac{1}{J'_{\text{м}}} & \frac{\beta}{J'_{\text{м}}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -c & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \frac{\beta}{J_{\text{д}\Sigma}} & -\frac{1}{J_{\text{д}\Sigma}} & -\frac{\beta}{J_{\text{д}\Sigma}} & \frac{k\Phi_{\text{н}}}{J_{\text{д}\Sigma}} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & -\frac{k\Phi_{\text{н}}}{R_{\Sigma}T_{\text{е}}} & -\frac{1}{T_{\text{е}}} & \frac{1}{R_{\Sigma}T_{\text{е}}} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & -\frac{k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{тп}}k_{\text{ш}}}{T_{\text{мт}}} & -\frac{k_{\text{т}}k_{\text{пт}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{мт}}} & -\frac{1}{T_{\text{мт}}} & \frac{k_{\text{тп}}}{T_{\text{мт}}} & \frac{k_{\text{тп}}k_{\text{пт}}}{T_{\text{мт}}} \\ \hline 0 & 0 & -k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{іт}} & -k_{\text{іт}}k_{\text{т}} & 0 & 0 & k_{\text{іт}} \\ \hline 0 & 0 & -k_{\text{ш}}k_{\text{іш}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

$$\mathbf{B} = \begin{array}{c|c} U_{\text{з}} & M_{\text{ст}} \\ \hline 0 & -\frac{1}{J_{\text{м}}} \\ \hline 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \frac{k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{мт}}} & 0 \\ \hline k_{\text{пш}}k_{\text{іт}} & 0 \\ \hline k_{\text{іш}} & 0 \end{array}$$

3.2 Розрахунок та аналіз перехідних процесів двомасової системи засобами комп'ютерного моделювання

Для оцінки динамічної поведінки двомасової моделі підйомної установки спершу визначаємо відносні приведені маси ключових компонентів системи. Відносна приведена маса завантаженого скипа, яка враховує його інерційні властивості при обертанні валу двигуна, була визначена на основі даних технічної літератури та прийнята рівною $\mu_2 = 0,19$. Аналогічно, визначаються відносні приведені маси каната μ_k та двигуна разом із підйомним барабаном μ_1 , що забезпечує коректне урахування динаміки системи: $\mu_1 = 0,73$; $\mu_k = 0,08$.

Далі обчислюємо момент інерції двигуна та інших елементів механічної частини, що обертаються зі швидкістю двигуна, використовуючи приведення до вала двигуна:

$$J_{d\Sigma} = J_{\Sigma} \cdot \mu_1,$$

$$J_{d\Sigma} = 610000 \cdot 0,73 = 445300 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

Приведений до вала двигуна момент інерції підйомного каната обчислюється за формулою:

$$J_k = J_{\Sigma} \cdot \mu_k,$$

$$J_k = 610000 \cdot 0,08 = 48800 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Для двомасової моделі загальні моменти інерції визначаються наступним чином:

$$J'_{d\Sigma} = J_{d\Sigma} + \frac{J_k}{2} = 445300 + \frac{48800}{2} = 469700 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J'_m = J_m + \frac{J_k}{2} = 116000 + \frac{48800}{2} = 140400 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Пружна жорсткість каната визначається через частоту власних коливань навантаженого скипа ω_0 :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c_k}{m'_2}},$$

звідки

$$c_k = \omega_0^2 m'_2$$

Згідно з даними спеціалізованої літератури, частота власних коливань підйомного вантажу зазвичай знаходиться в діапазоні $(1 \div 6) \text{ с}^{-1}$. Для розрахунків приймаємо $\omega_0 = 3 \text{ с}^{-1}$.

Відносна приведена маса m'_2 другої маси двомасової системи, що включає частину каната та скип, визначається як:

$$m'_2 = \left(\mu_2 + \frac{\mu_k}{2} \right) \cdot m,$$

$$m'_2 = \left(0,19 + \frac{0,08}{2} \right) \cdot 55000 = 13200 \text{ кг}$$

$$c_k = 3^2 \cdot 13200 = 118800 \text{ Н/м}$$

Приведена жорсткість каната між масами визначається як:

$$c = c_k \rho^2 = 118800 \cdot 2,5^2 = 742500 \text{ Н/м}$$

Жорсткості окремих ділянок каната між масами у трьохмасовій системі:

$$c_1 = c_2 = 2c = 2 \cdot 742500 = 1485000 \text{ Н/м}$$

Для проведення чисельного аналізу динамічних процесів двомасової системи використовується програмне середовище MATLAB. Розрахунки виконуються як за допомогою моделі, представлено на рисунку 3.7, так і шляхом інтегрування векторно-матричних рівнянь стану (3.7).

Для спрощення відображення результатів на екран виводяться перші шість змінних стану системи як по задаючій, так і по збурюючій дії. Графічні залежності перехідних процесів наведені на рисунках 3.8–3.11. Аналіз графіків показує, що динаміка системи носить коливальний характер, що зумовлено наявністю пружного елемента (каната) та його взаємодією із масами скипів і обертовими елементами приводу.

Повний вихідний код та набір початкових параметрів, використаних при моделюванні, наведено у додатку Д.

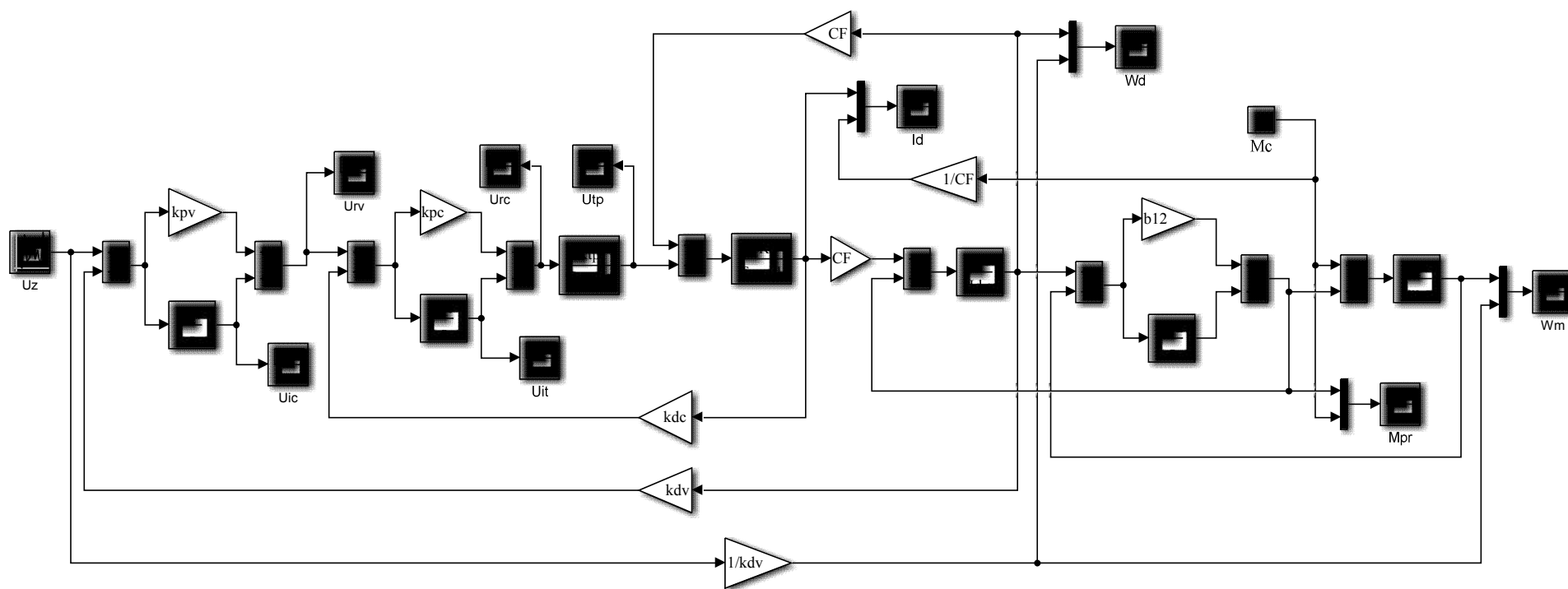
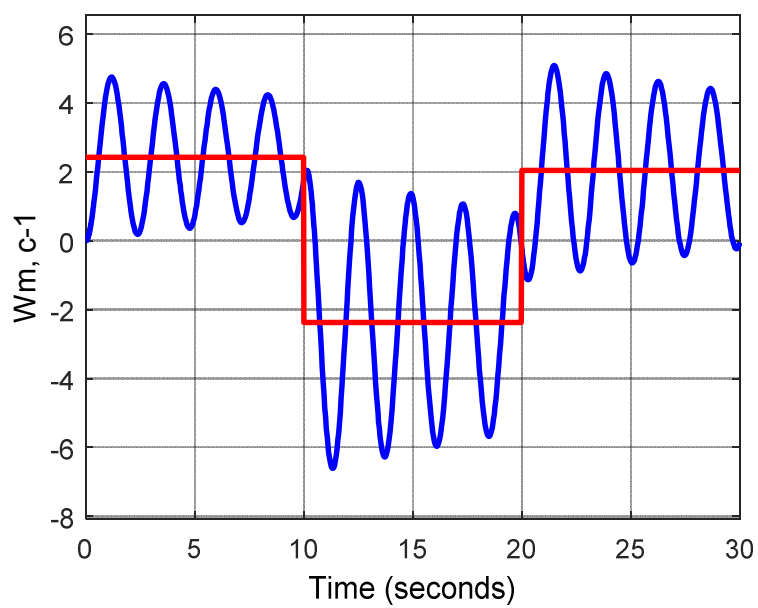
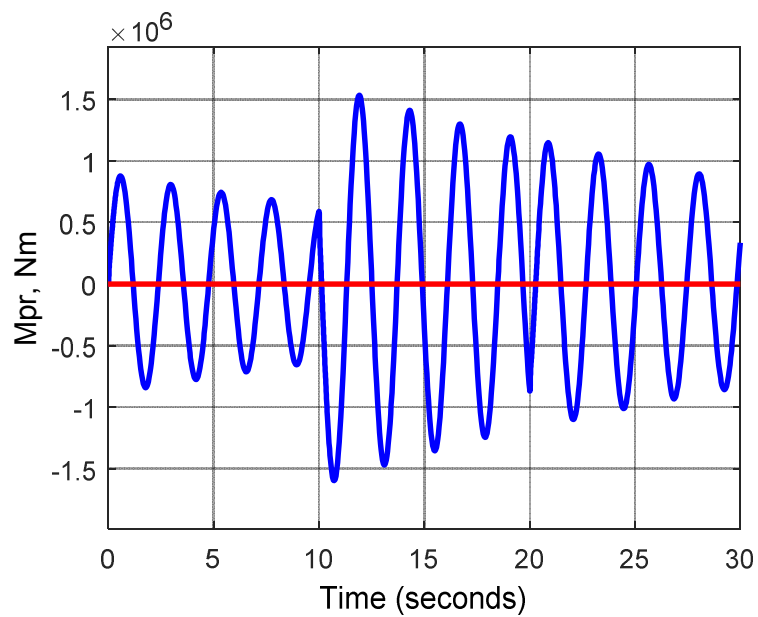


Рисунок 3.7 – Модельна схема двомасової динамічної системи, розроблена в SIMULINK/MATLAB



а)



б)

Рисунок 3.8 – Графічне відображення перехідних процесів двомасової системи

за задавальним впливом: а) динаміка швидкості механізму $\omega_m = f(t)$;

б) розвиток пружного моменту $M_{\text{пр}} = f(t)$

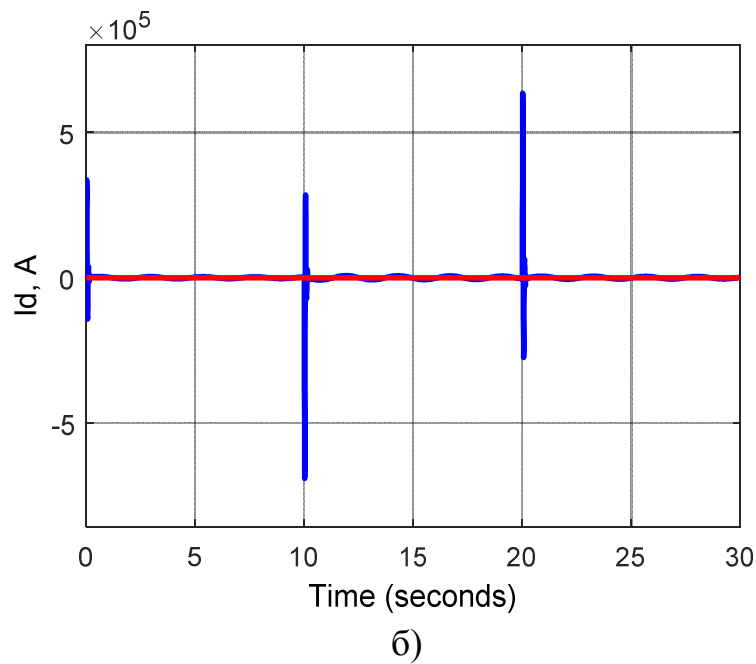
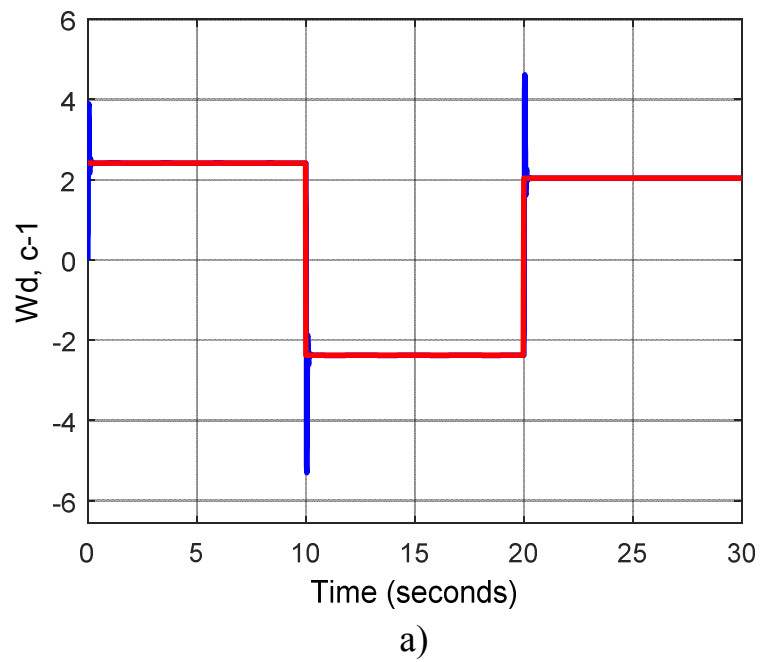


Рисунок 3.9 – Графічне відображення перехідних процесів двомасової системи за задавальним впливом: а) динаміка швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$;
 б) зміна струму двигуна $I_d = f(t)$

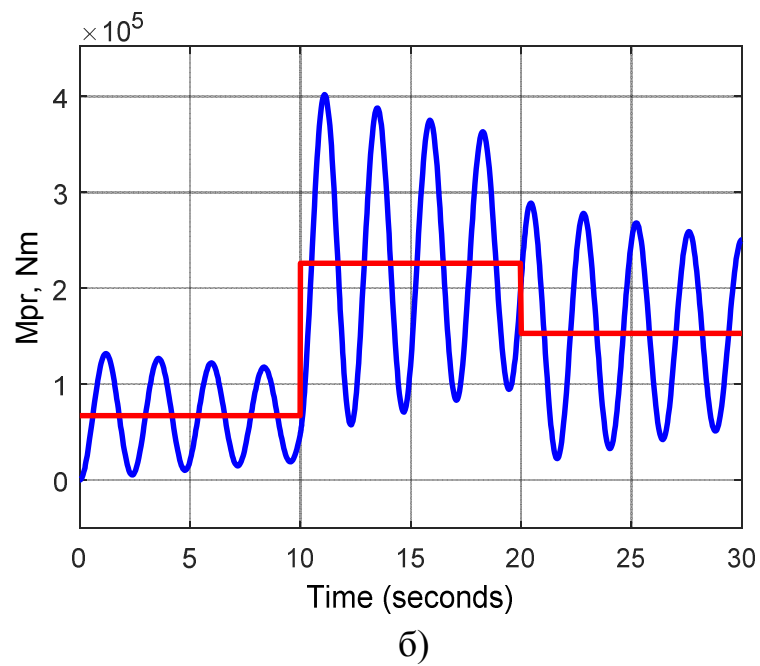
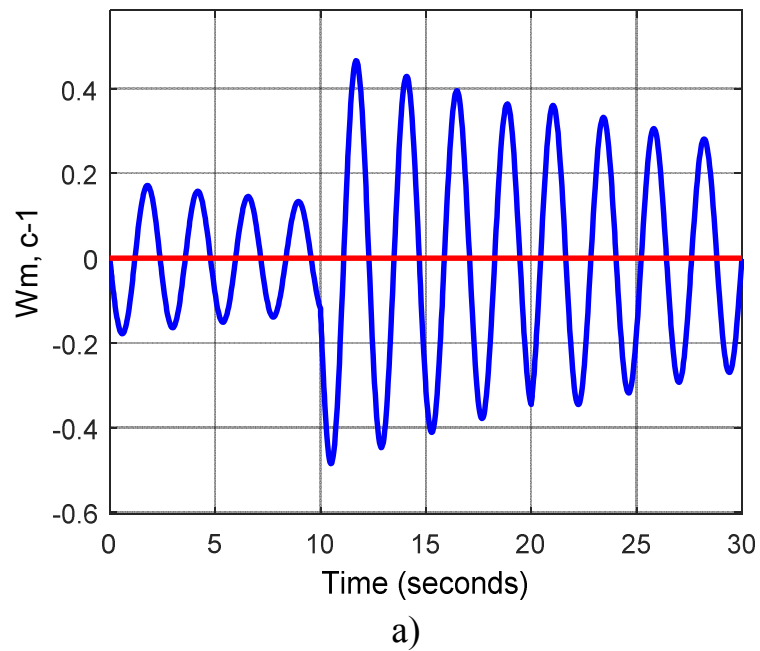


Рисунок 3.10 – Графічне відображення перехідних процесів двомасової системи при дії збурення: а) динаміка швидкості механізму $\omega_m = f(t)$;
б) розвиток пружного моменту $M_{пр} = f(t)$

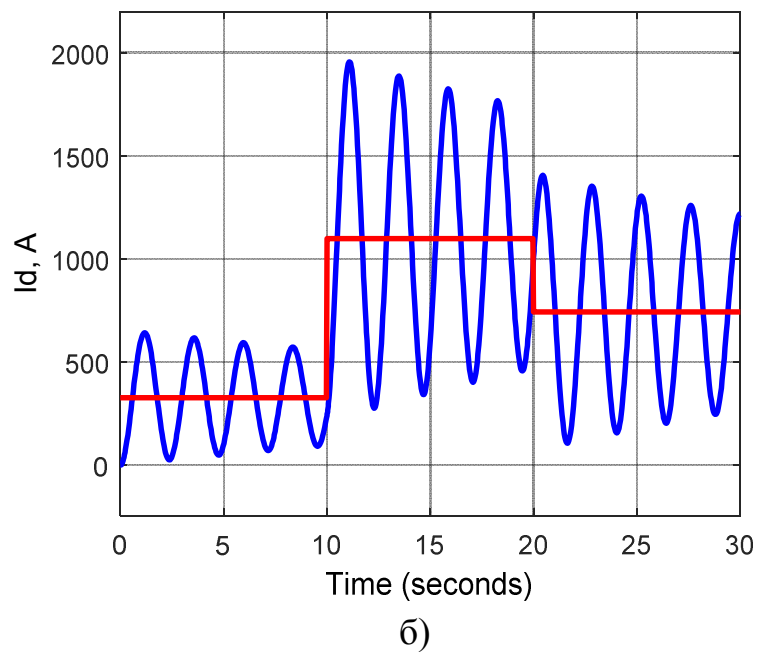
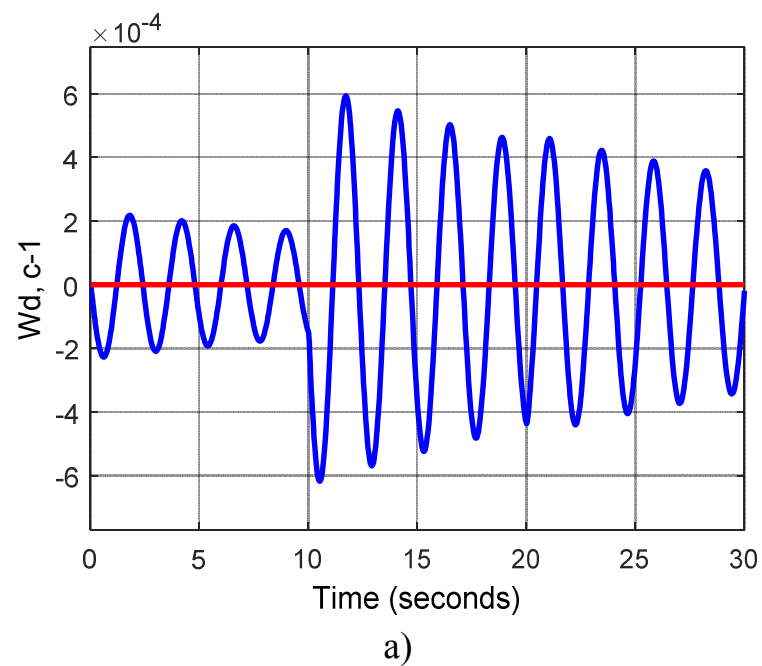


Рисунок 3.11 – Графічне відображення перехідних процесів двомасової системи при дії збурення: а) динаміка швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$;
 б) зміна струму двигуна $I_d = f(t)$

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Аналіз динаміки підйомного механізму з урахуванням пружних властивостей каната. У результаті дослідження показано, що механічна частина шахтної підйомної установки може бути представлена як багатомасова система, де ключові маси – скипи, канат та обертові елементи приводу – сполучені пружними зв'язками. Урахування пружних властивостей підйомного каната дозволяє врахувати подовжні коливання вантажу, що виникають під час руху скипа, особливо у крайніх положеннях. Для спрощення складної багатомасової моделі запропоновано розглядати систему як двомасову модель, де одна маса відповідає навантаженому скипу з частиною каната, а друга – двигуну з підйомним барабаном і рештою частини каната. Такий підхід значно зменшує складність розрахунків, зберігаючи при цьому достатню точність оцінки динамічних процесів.

2. Розробка математичної моделі двомасової системи. Для побудови моделі були отримані рівняння стану двомасової системи у вигляді диференціальних рівнянь першого порядку, а також їх векторно-матрична форма. Визначені всі змінні стану системи, що характеризують швидкості, струми та пружні моменти, а також елементи вектору зовнішніх впливів. Розроблено матриці стану AAA та управління BBB , що дозволяють виконувати аналіз стабільності та динамічної поведінки системи. На основі цих рівнянь була побудована алгоритмічна схема двомасової системи, яка відображає взаємодію всіх ключових компонентів підйомного механізму та їх зв'язок із системою автоматичного управління.

3. Моделювання динамічних процесів двомасової системи. Проведено чисельне моделювання двомасової системи із застосуванням програмного пакета MATLAB та середовища SIMULINK. Для перевірки реакції системи на зовнішні впливи на її вхід подавався ступінчастий сигнал із випадковою амплітудою в межах від +24 В до -24 В, що відповідає номінальним змінам швидкості

механізму. Результати моделювання показали, що перехідні процеси змінних стану системи мають виразний коливальний характер, що обумовлено наявністю пружного елемента (каната) і взаємодією двох мас. Коливання є найбільш інтенсивними при різкій зміні швидкості скипа та проявляються як у механічних величинах (швидкість скипа та момент пружності), так і у електричних величинах (струм двигуна та швидкість обертання ротора).

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

4.1. Процедура нечіткого моделювання та реалізація алгоритмів у середовищі MATLAB

Для створення, налаштування та практичного використання систем нечіткого висновку в MATLAB застосовується спеціалізований інструментарій – пакет Fuzzy Logic Toolbox. Цей комплект програмних засобів надає широкі можливості для побудови нечітких моделей різного ступеня складності та дозволяє досліднику працювати у двох принципово різних режимах:

- **Інтерактивний режим**, у якому розробник використовує зручні графічні інтерфейси для структурного налаштування системи, редагування її компонентів, перевірки коректності логічних правил та аналізу поведінки моделі на етапі тестування.

- **Режим роботи через командний рядок**, що передбачає використання викликів функцій MATLAB зі специфічними параметрами. Цей підхід особливо корисний, коли необхідно автоматизувати обчислення, створювати моделі програмно або інтегрувати нечітку систему в іншу програмну структуру.

У складі Fuzzy Logic Toolbox передбачено декілька окремих графічних модулів, кожен з яких відповідає за певний етап побудови системи нечіткого висновку:

- **Редактор FIS (FIS Editor)** – базовий інструмент для формування загальної структури нечіткої системи, визначення її вхідних та вихідних змінних, а також вибору типу системи (Mamdani, Sugeno тощо).

- **Редактор функцій належності (Membership Function Editor)** – програма, що дозволяє графічно створювати й змінювати форми функцій приналежності для кожної змінної. Саме тут налаштовуються параметри нечітких термів, їх кількість і характер форми (трикутні, трапецієподібні, гаусівські тощо).

- **Редактор правил нечіткого висновку (Rule Editor)** – інструмент для формування бази правил. У цьому середовищі користувач задає логічні зв'язки між вхідними параметрами та вихідними реакціями системи.

- **Переглядач правил (Rule Viewer)** – засіб, що дозволяє оцінити, як система обробляє конкретні комбінації вхідних даних і які результати формує на виході. Цей інструмент є незамінним під час тестування моделі.

- **Переглядач поверхні нечіткого висновку (Surface Viewer)** – модуль для побудови тривимірних поверхонь залежностей між параметрами системи, що дає змогу інтуїтивно оцінити характер прийняття рішень нечітким регулятором.

Крім основних графічних редакторів, Fuzzy Logic Toolbox включає також низку додаткових спеціалізованих програм, які розширюють можливості моделювання:

- **Редактор ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Editor)** – програмний засіб для створення та навчання гібридних нейро-нечітких мереж, що поєднують механізми нечіткого висновку та здатність нейронних мереж до самонавчання.

- **Алгоритм нечіткої кластеризації fuzzy c-means (findcluster)** – інструмент автоматичного групування даних, що дозволяє отримати початкові параметри нечітких термів із реальних вибірок.

У таблиці 4.1 наведено основні функції MATLAB, за допомогою яких можна здійснювати виклик відповідних графічних інтерфейсів пакета Fuzzy Logic Toolbox.

Таблиця 4.1 – Призначення функцій графічних інтерфейсів Fuzzy Logic Toolbox

Функція	Призначення
anfisedit	Відкриває редактор нейро-нечітких мереж ANFIS
findcluster	Виконує нечітку кластеризацію даних
fuzzy	Запускає базовий редактор систем нечіткого висновку FIS
mfedit	Викликає редактор функцій приналежності
ruleedit	Дає змогу формувати й коригувати базу правил
ruleview	Візуалізує роботу системи на основі введених правил та показує результати нечіткого висновку
surfview	Будує поверхні відповідей системи нечіткого висновку для аналізу взаємодії між параметрами

4.2. Побудова, налаштування і дослідження багатомасової системи управління з використанням Fuzzy-регулятора

Для подальшого дослідження поведінки електромеханічної системи, що має дві інерційні маси, побудуємо інтерактивну модель керування, в якій роль регулятора виконує система нечіткого висновку. Створення такої моделі відбувається у середовищі MATLAB із застосуванням графічних інструментів Fuzzy Logic Toolbox, що забезпечують наочність процесу налаштування та прискорюють розробку керуючих алгоритмів.

Основна ідея завдання полягає у формуванні такої нечіткої системи керування, яка здатна без участі оператора реагувати на зміну динамічного стану двомасового механізму та підтримувати бажані характеристики якості – швидкодію, стійкість і мінімізацію коливань. Щоб дати регулятору інформацію про відхилення системи від бажаного режиму, оцінюватимемо якість роботи привода за значенням миттєвої помилки регулювання $\varepsilon(t)$, тобто різниці між встано-

вленою оператором (або вищим рівнем керування) швидкістю обертання та реальною швидкістю механізму.

Оскільки двомасові електромеханічні системи завжди характеризуються підвищеною інерційністю та схильністю до коливальних процесів, однієї лише помилки регулювання недостатньо для побудови ефективного алгоритму керування. Необхідно також враховувати динамічний стан з'єднувального елемента. Тому другою вхідною змінною обрано момент пружності $M_{\text{пр}}(t)$, який у моделі виступає аналогом похідної помилки. Доцільно використовувати різницю між миттєвим пружним моментом $M_{\text{пр}}(t)$ та моментом статичного навантаження $M_c(t)$, тобто $M_{\text{пр}}(t) - M_c(t)$, оскільки саме ця величина інформує про реальний характер деформацій у кінематичному ланцюзі.

Таким чином, у запропонованій структурі нечіткої системи керування на її входи подаються дві фізично змістовні величини:

- помилка регулювання $\varepsilon(t)$;
- пружний момент або його поправка $M_{\text{пр}}(t)$.

На виході Fuzzy-регулятора формується керувальна дія $U(t)$, яка є напругою (або еквівалентом напруги) і через підсилювач подається на силову частину системи керування приводом.

Структурна модель електропривода з нечітким регулятором, зібрана у середовищі Simulink, подана на рис. 4.1. На рис. 4.2 наведено внутрішню структуру підсистеми *Subsystem*, у якій реалізовано математичну модель об'єкта управління. Відкрити її можна подвійним клацанням на відповідному блоці, що відкриває окреме вікно з підсхемою.

Перш ніж перейти до побудови бази нечітких правил, необхідно чітко визначити набір вхідних та вихідних лінгвістичних змінних. У нашому випадку логічно виділити:

- помилку регулювання як першу вхідну змінну, позначену як ε ;
- пружний момент як другу вхідну змінну, позначену як $M_{\text{пр}}$;

- керувальну напругу регулятора як вихідну величину U , яка в подальшому додається до сигналу завдання і впливає на систему.

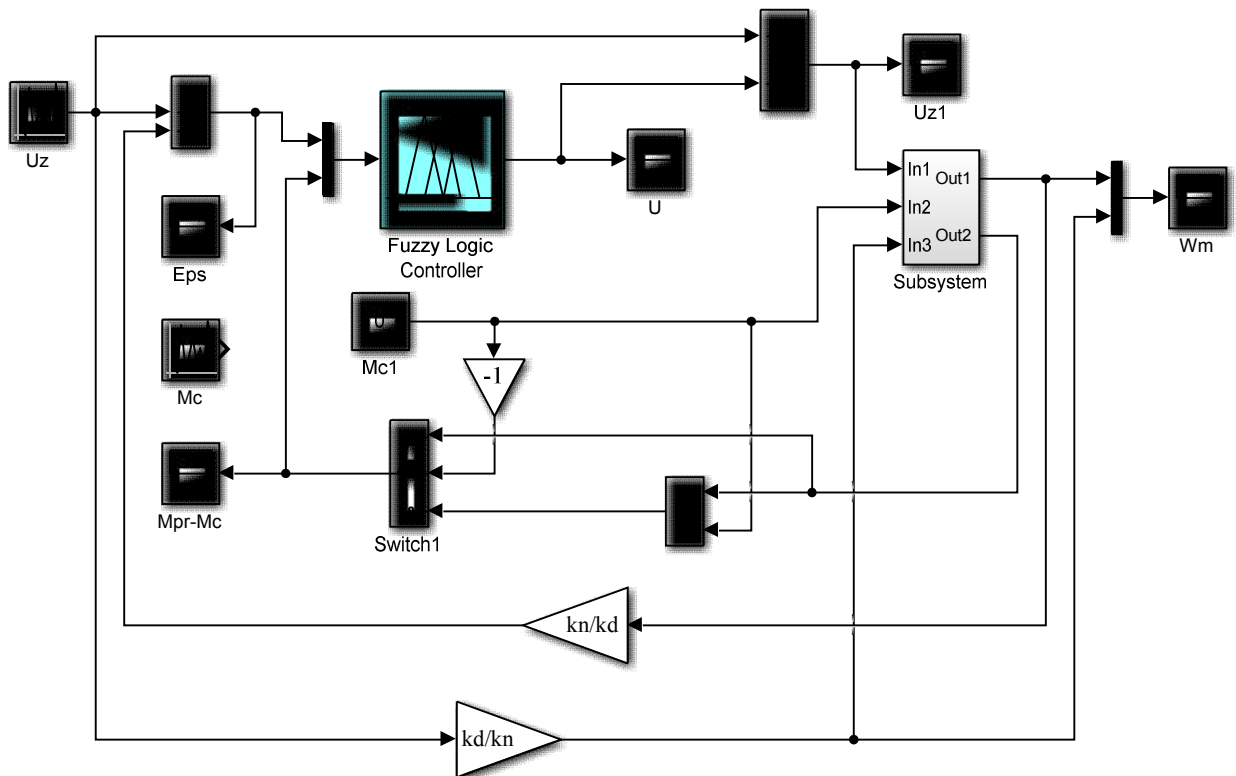


Рисунок 4.1 – Загальна Simulink-модель електромеханічної системи, керованої нечітким регулятором

Для всіх змінних використовуємо симетричні терм-множини, що складаються з п'яти базових лінгвістичних термів: "негативна велика", "негативна мала", "близька до нуля", "позитивна мала", "позитивна велика".

Для скорочення позначень застосуємо умовні маркери: NG – негативна велика, NS – негативна мала, ZR – близька до нуля, PS – позитивна мала, PG – позитивна велика.

Тоді терм-множини для кожної змінної матимуть вигляд:

$$T_{1,2,3} = \{NG, NS, ZR, PS, PG\}.$$

Функції приналежності для кожного терма вводяться у середовищі **Membership Function Editor** та задаються окремо для помилки, моменту й вихідної величини.

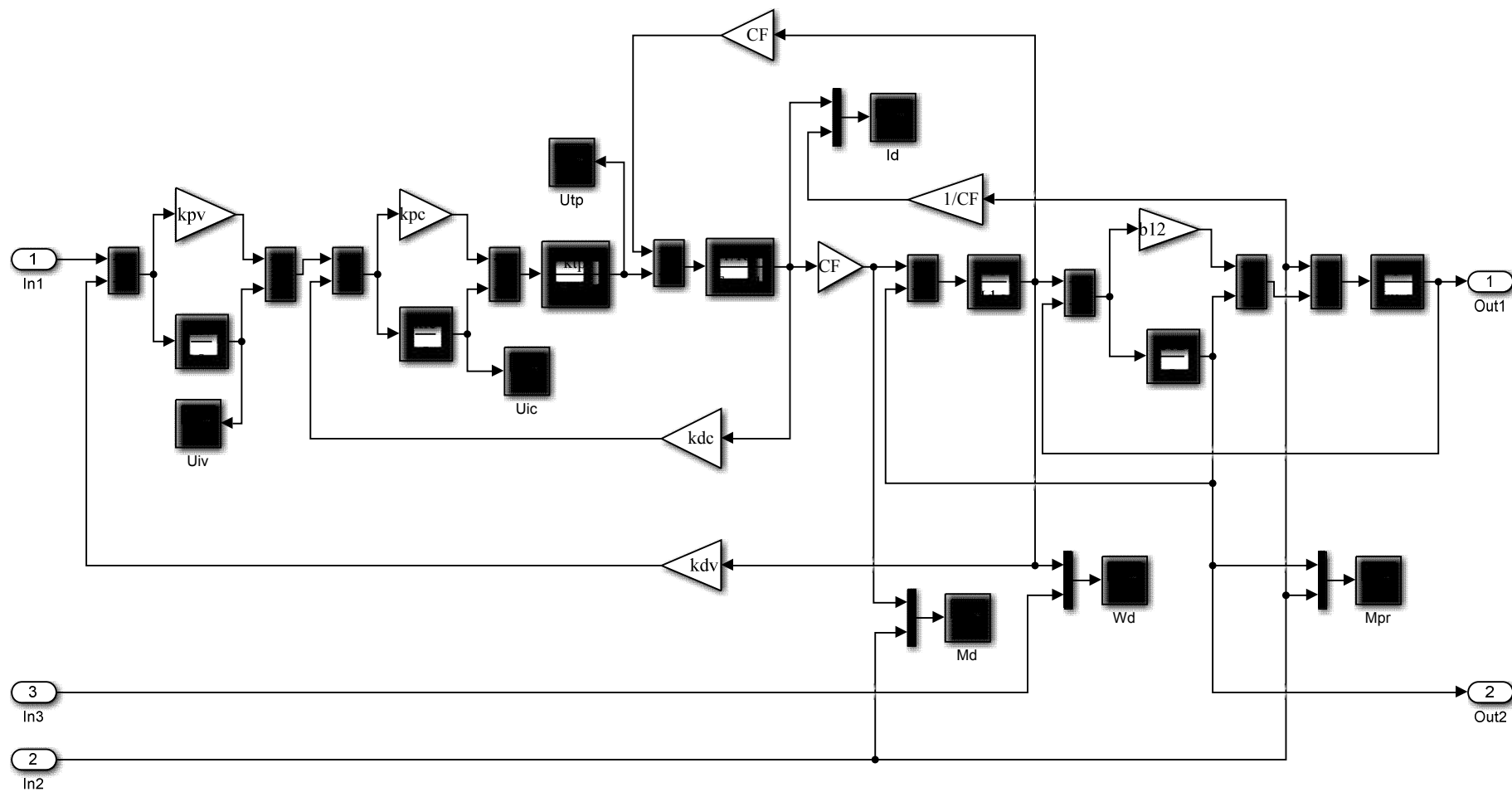


Рисунок 4.2 – Внутрішня структура підсистеми, що реалізує модель об'єкта управління

На основі аналізу експериментальних перехідних процесів – зокрема, поведінки системи під час пуску та при раптовому прикладенні навантаження – сформовано базу нечітких продукційних правил. Оскільки кожна з двох вхідних лінгвістичних змінних має по 5 термів, повна матриця нечітких рішень складається з 25 правил типу:

Якщо (помилка = терм_i) і (момент = терм_j), то (напруга регулятора = терм_k).

Для системи, що розглядається, сформовано наступні правила:

ПРАВИЛО_1: ЯКЩО " $\varepsilon \in NG$ " І " $M_{np} \in NG$ " ТО " $U \in PG$ "

ПРАВИЛО_2: ЯКЩО " $\varepsilon \in NG$ " І " $M_{np} \in NS$ " ТО " $U \in PS$ "

ПРАВИЛО_3: ЯКЩО " $\varepsilon \in NG$ " І " $M_{np} \in ZR$ " ТО " $U \in PS$ "

ПРАВИЛО_4: ЯКЩО " $\varepsilon \in NG$ " І " $M_{np} \in PS$ " ТО " $U \in ZR$ "

ПРАВИЛО_5: ЯКЩО " $\varepsilon \in NG$ " І " $M_{np} \in PG$ " ТО " $U \in NS$ "

ПРАВИЛО_6: ЯКЩО " $\varepsilon \in NS$ " І " $M_{np} \in NG$ " ТО " $U \in PS$ "

ПРАВИЛО_7: ЯКЩО " $\varepsilon \in NS$ " І " $M_{np} \in NS$ " ТО " $U \in PS$ "

ПРАВИЛО_8: ЯКЩО " $\varepsilon \in NS$ " І " $M_{np} \in ZR$ " ТО " $U \in PS$ "

ПРАВИЛО_9: ЯКЩО " $\varepsilon \in NS$ " І " $M_{np} \in PS$ " ТО " $U \in ZR$ "

ПРАВИЛО_10: ЯКЩО " $\varepsilon \in NS$ " І " $M_{np} \in PG$ " ТО " $U \in NS$ "

ПРАВИЛО_11: ЯКЩО " $\varepsilon \in NS$ " І " $M_{np} \in NG$ " ТО " $U \in PS$ "

ПРАВИЛО_12: ЯКЩО " $\varepsilon \in NS$ " І " $M_{np} \in NS$ " ТО " $U \in ZR$ "

ПРАВИЛО_13: ЯКЩО " $\varepsilon \in NS$ " І " $M_{np} \in ZR$ " ТО " $U \in ZR$ "

ПРАВИЛО_14: ЯКЩО " $\varepsilon \in NS$ " І " $M_{np} \in PS$ " ТО " $U \in ZR$ "

ПРАВИЛО_15: ЯКЩО " $\varepsilon \in NS$ " І " $M_{np} \in PG$ " ТО " $U \in NS$ "

ПРАВИЛО_16: ЯКЩО " $\varepsilon \in PS$ " І " $M_{\text{пр}} \in NG$ " ТО " $U \in PS$ "

ПРАВИЛО_17: ЯКЩО " $\varepsilon \in PS$ " І " $M_{\text{пр}} \in NS$ " ТО " $U \in ZR$ "

ПРАВИЛО_18: ЯКЩО " $\varepsilon \in PS$ " І " $M_{\text{пр}} \in ZR$ " ТО " $U \in NS$ "

ПРАВИЛО_19: ЯКЩО " $\varepsilon \in PS$ " І " $M_{\text{пр}} \in PS$ " ТО " $U \in NS$ "

ПРАВИЛО_20: ЯКЩО " $\varepsilon \in PS$ " І " $M_{\text{пр}} \in PG$ " ТО " $U \in NS$ "

ПРАВИЛО_21: ЯКЩО " $\varepsilon \in PG$ " І " $M_{\text{пр}} \in NG$ " ТО " $U \in NS$ "

ПРАВИЛО_22: ЯКЩО " $\varepsilon \in PG$ " І " $M_{\text{пр}} \in NS$ " ТО " $U \in ZR$ "

ПРАВИЛО_23: ЯКЩО " $\varepsilon \in PG$ " І " $M_{\text{пр}} \in ZR$ " ТО " $U \in NS$ "

ПРАВИЛО_24: ЯКЩО " $\varepsilon \in PG$ " І " $M_{\text{пр}} \in PS$ " ТО " $U \in NS$ "

ПРАВИЛО_25: ЯКЩО " $\varepsilon \in PG$ " І " $M_{\text{пр}} \in PG$ " ТО " $U \in NG$ "

Для зручності всі 25 правил подані у табличній формі (табл. 4.2), що значно полегшує перевірку сумісності та логічної завершеності набору продукцій.

Таблиця 4.2 – Набір продукційних правил формування вихідної лінгвістичної змінної нечіткого регулятора

		Помилка регулювання				
		<i>NG</i>	<i>NS</i>	<i>ZR</i>	<i>PS</i>	<i>PG</i>
Момент пружності	<i>NG</i>	<i>PG</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>ZR</i>	<i>ZR</i>	<i>ZR</i>
	<i>ZR</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>ZR</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
	<i>PS</i>	<i>ZR</i>	<i>ZR</i>	<i>ZR</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
	<i>PG</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NG</i>

Представленого теоретичного та графічного матеріалу достатньо, щоб перейти до практичного етапу побудови нечіткої системи керування. Проєктвана система нечіткого виведення матиме два незалежні входи, один вихідний

канал, п'ять функцій приналежності для кожної змінної та двадцять п'ять правил продукційного типу «якщо... то...», сформованих на основі таблиці 4.2. Для реалізації процедури нечіткого висновку обрано алгоритм Мамдані, який зазвичай вважається найбільш інтуїтивно зрозумілим та придатним для систем керування технічними об'єктами.

Перейдемо до побудови системи. Використавши командний рядок MATLAB, виконуємо оператор **fuzzy**, який запускає головний інтерфейс пакета **Fuzzy Logic Toolbox** – редактор нечіткої системи (**FIS Editor**). Після виконання цієї команди на екрані відкривається вікно, зображене на рис. 4.3.

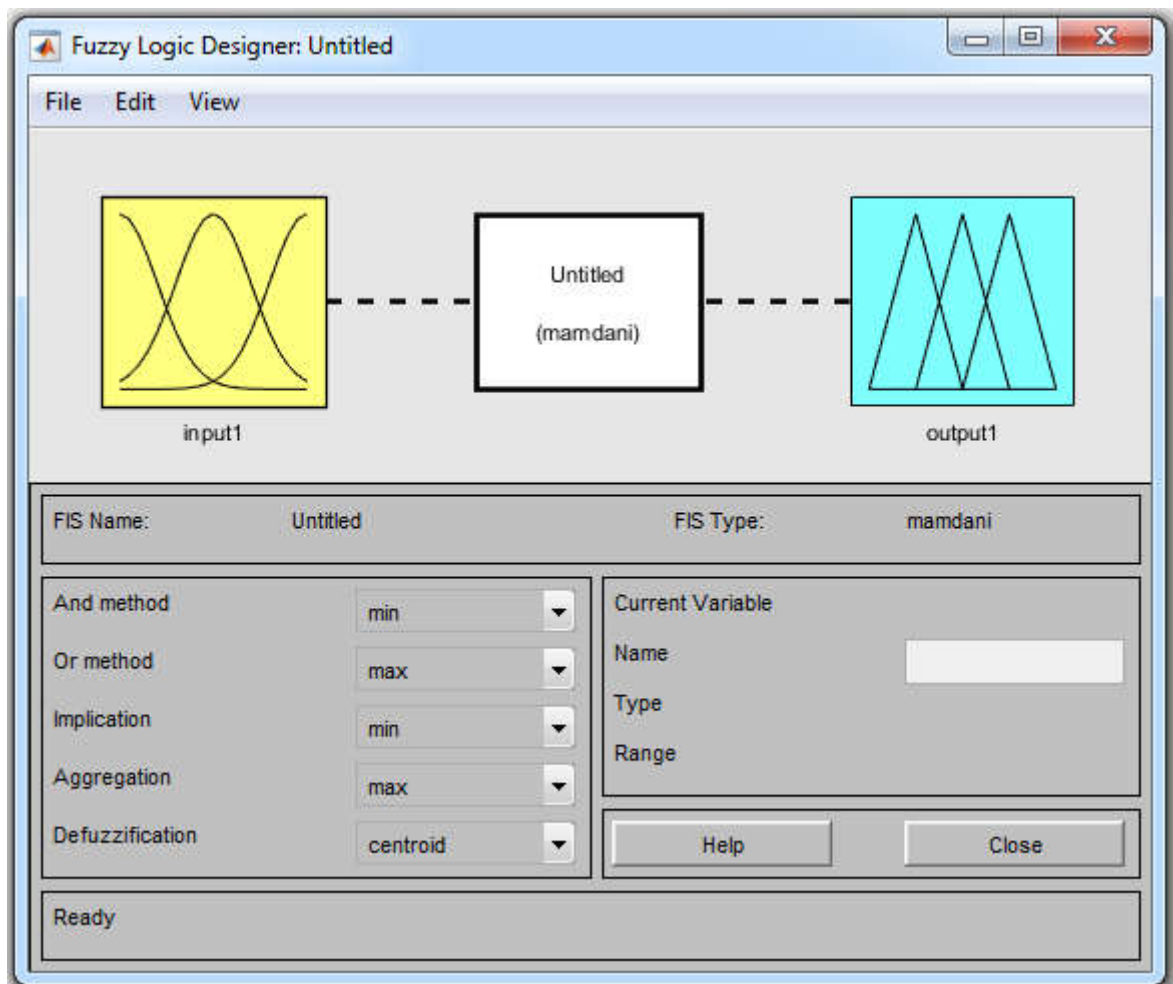


Рисунок 4.3 – Інтерфейс редактора FIS після запуску з командного рядка

У верхній частині інтерфейсу міститься стандартна панель меню, де доступні такі розділи:

- **File** – операції зі створенням, відкриттям, записом і друкуванням моделей нечітких систем;
- **Edit** – засоби редагування структури, зокрема додавання та вилучення входів і виходів;
- **View** – доступ до додаткових інструментів моделювання.

У вихідному стані інтерфейс редактора нечітких систем MATLAB автоматично пропонує використання класичного алгоритму нечіткого висновку типу **Mamdani**, про що свідчить відповідний напис у центральній частині робочого вікна. Оскільки в рамках розроблюваної системи регулювання необхідно забезпечити обробку двох незалежних інформаційних сигналів, структуру моделі потрібно доповнити ще одним входом. Для цього скористаємося пунктом меню **Edit** → **Add Variable** → **Input**, унаслідок чого в робочій області редактора з'являється додатковий жовтий блок із назвою *input2*.

Подальша настройка елементів виконується шляхом виділення кожної змінної та присвоєння їй змістовного найменування. Так, блок *input1* перейменується на **Epsilon**, що відображає фізичний зміст цієї величини – *миттєву похибку регулювання*. Після введення нового імені підтверджуємо дію клавішею *Enter*. Аналогічний спосіб застосовуємо й для другого входу *input2*, якому присвоюємо назву **Mpr**, що трактує пружний момент у кінематичному ланцюзі. Вихідний блок *output1* отримує найменування **U**, яке відповідає величині керуючого впливу, сформованого Fuzzy-регулятором.

З метою подальшої ідентифікації та зберігання параметрів моделі доцільно одразу задати назву всієї нечіткої системи. Через меню **File** → **Export** → **To Workspace** присвоюємо їй ім'я «*ShahtnyPidjom*» («механізм підйому шахтної підіймальної установки»), . Після виконання описаних дій вікно редактора набуває вигляду, наведеного на рисунку 4.4.

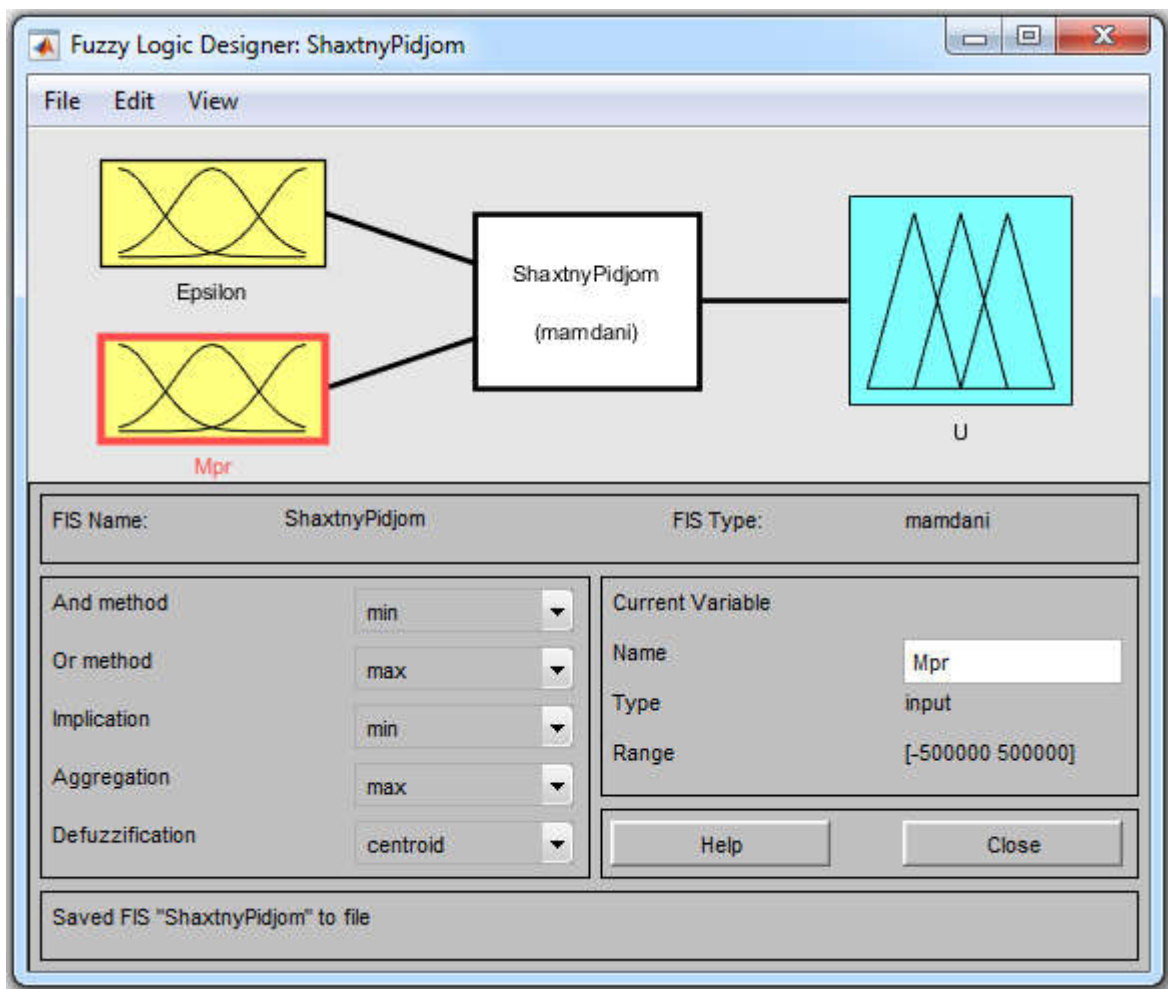


Рисунок 4.4 – Сформована структурна схема нечіткої системи керування у FIS Editor

Завдання функцій приналежності.

Наступний етап полягає у визначенні функцій приналежності всіх лінгвістичних змінних. Перейти до редактора функцій приналежності можна одним із трьох способів:

1. через меню **Edit** → **Membership Functions**;
2. подвійним клацанням на графічному символі відповідної змінної;
3. за допомогою комбінації клавіш **Ctrl** + **2**.

Після відкриття редактора почнемо з налаштування вхідної змінної **Epsilon** (рис. 4.5). Передусім задаємо робочий діапазон її зміни – від -24 до $+24$, після чого командами **Edit** → **Remove All MFs** і **Edit** → **Add MFs** відкри-

ваємо діалогове вікно (рис. 4.6), де обираємо п'ять функцій приналежності. Це можуть бути як трикутні функції (*trimf*), так і гаусові (*gaussmf*), залежно від подальшої процедури оптимізації.

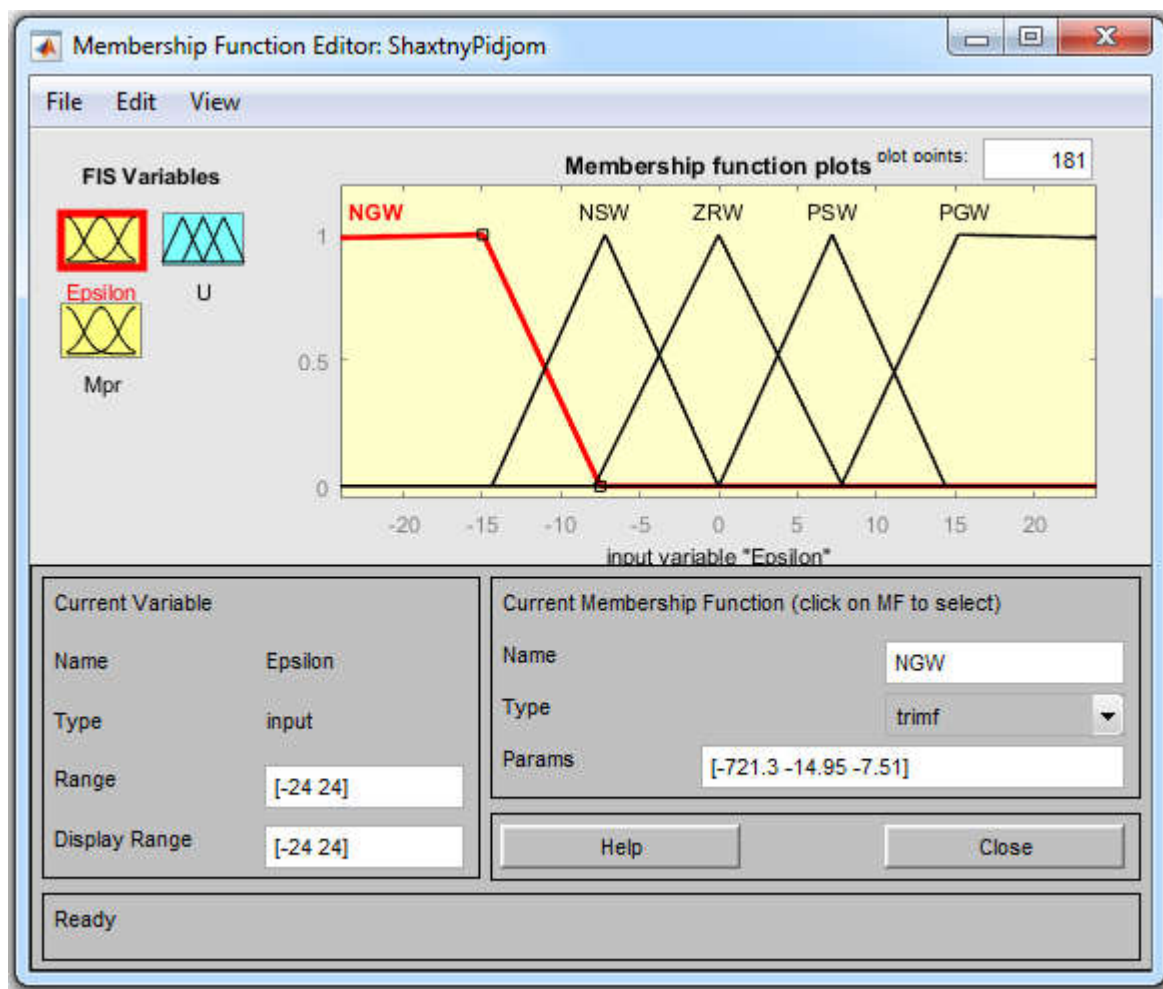


Рисунок 4.5 – Набір функцій приналежності для змінної «Epsilon»

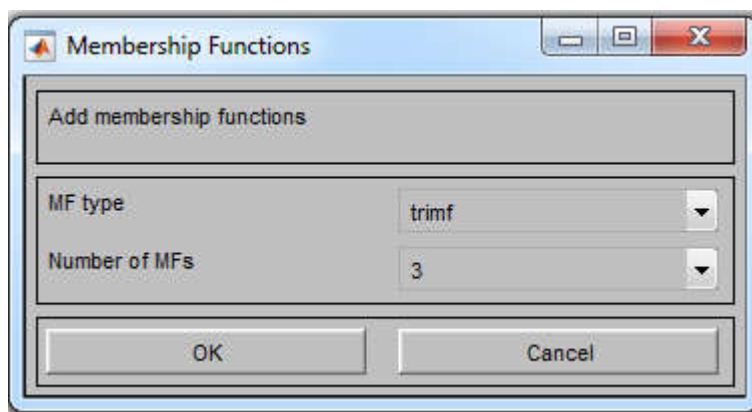


Рисунок 4.6 – Вибір типів та кількості функцій приналежності для змінної

Після повернення до редактора функцій приналежності переходимо до перейменування кожної кривої. Виділивши потрібну функцію клацанням миші, отримуємо можливість змінювати її положення, форму та числові параметри в полі **Params**. Для трикутних функцій визначаємо три параметри, що відповідають координатам основних точок; для гаусових – два параметри (ширина та центр).

Кожній функції присвоюємо осмислену лінгвістичну назву, наприклад: **NGW** – негативна велика; **NSW** – негативна мала; **ZRW** – близька до нуля; **PSW** – позитивна мала; **PGW** – позитивна велика.

Змінюючи форму та границі функцій приналежності, здійснюємо первинне налаштування Fuzzy-регулятора, що в подальшому буде удосконалене під час моделювання перехідних процесів багатомасової системи.

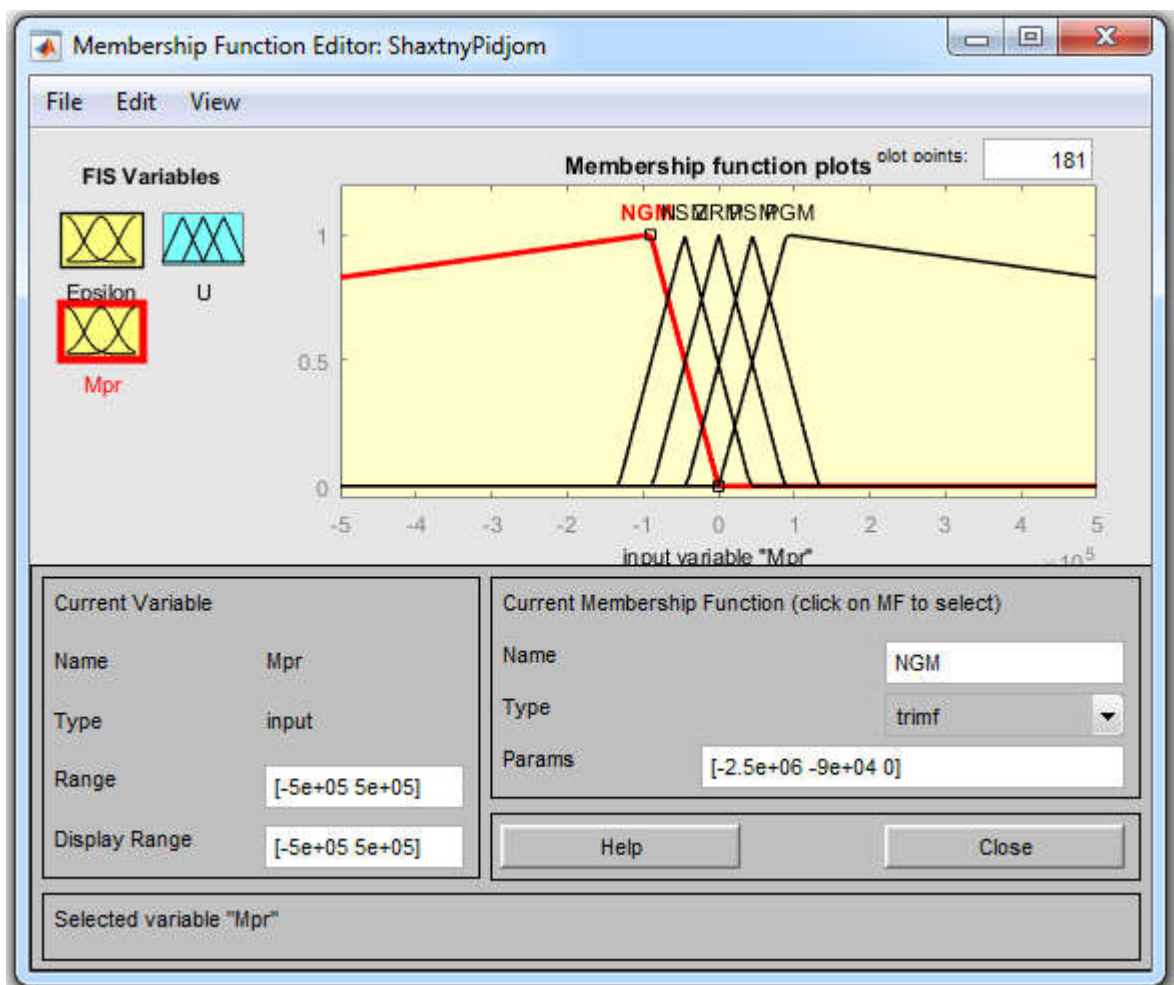


Рисунок 4.7 – Повний набір функцій приналежності для змінної «Mpr»

Аналогічні дії виконуються і для другої змінної **Mpr** (рис. 4.7). Для неї встановлюємо діапазон від $-5 \cdot 10^{-5}$ до $+5 \cdot 10^{-5}$, після чого формуємо п'ять функцій приналежності типу *trimf* або *gaussmf* з іменами: **NGM**, **NSM**, **ZRM**, **PSM**, **PGM**.

Вихідна змінна **U**, на відміну від вхідних, матиме набір гауссових функцій. Діапазон встановлюється від -25 до $+25$. Центральна функція задається типом **gauss2mf**, решта – **gaussmf**. Назви функцій: **NGU**, **NSU**, **ZRU**, **PSU**, **PGU**. Приклад показано на рис. 4.8.

Тип і параметри функцій уточнюються в процесі налаштування Fuzzy регулятора, як було вказано раніше.

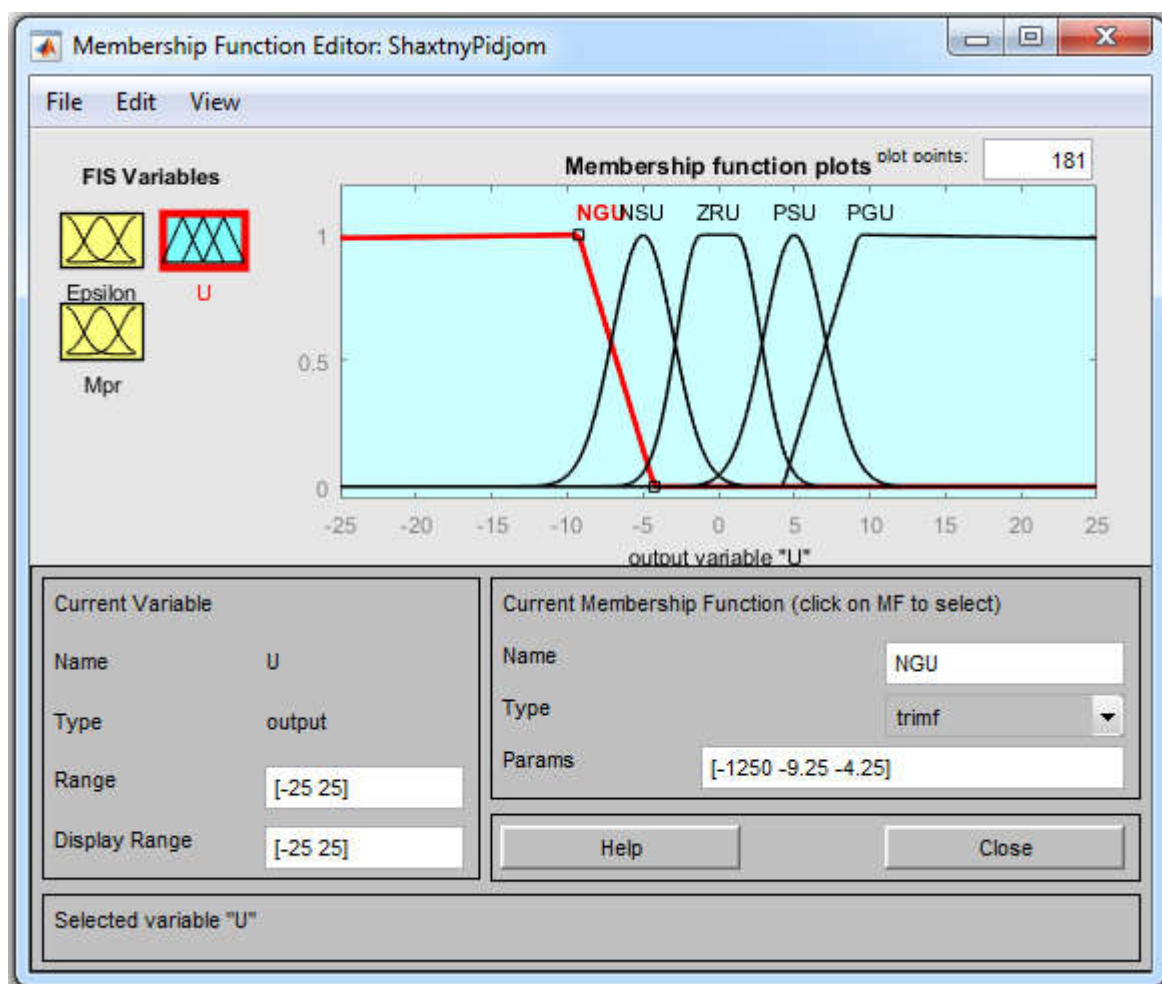


Рисунок 4.8 – Формування функцій приналежності вихідної змінної «U»

Формування бази правил.

Конструювання логічної основи регулятора виконуємо у вікні редактора правил, яке викликається через **Edit** → **Rules** (рис. 4.9). Тут у табличній формі задаються всі 25 правил виду «якщо... то...», що описують залежність реакції системи від поєднань значень **Epsilon** і **Mpr**.

Для перевірки коректності побудованих правил використовуємо режим їх перегляду, який активується командою **View** → **Rules**. У вікні Rule Viewer (рис. 4.10) представлена наочна візуалізація роботи механізму нечіткого висновку. Червона вертикальна лінія дозволяє динамічно змінювати вхідні значення та спостерігати, як це впливає на вихід **U**, що значно полегшує процес налаштування регулятора.

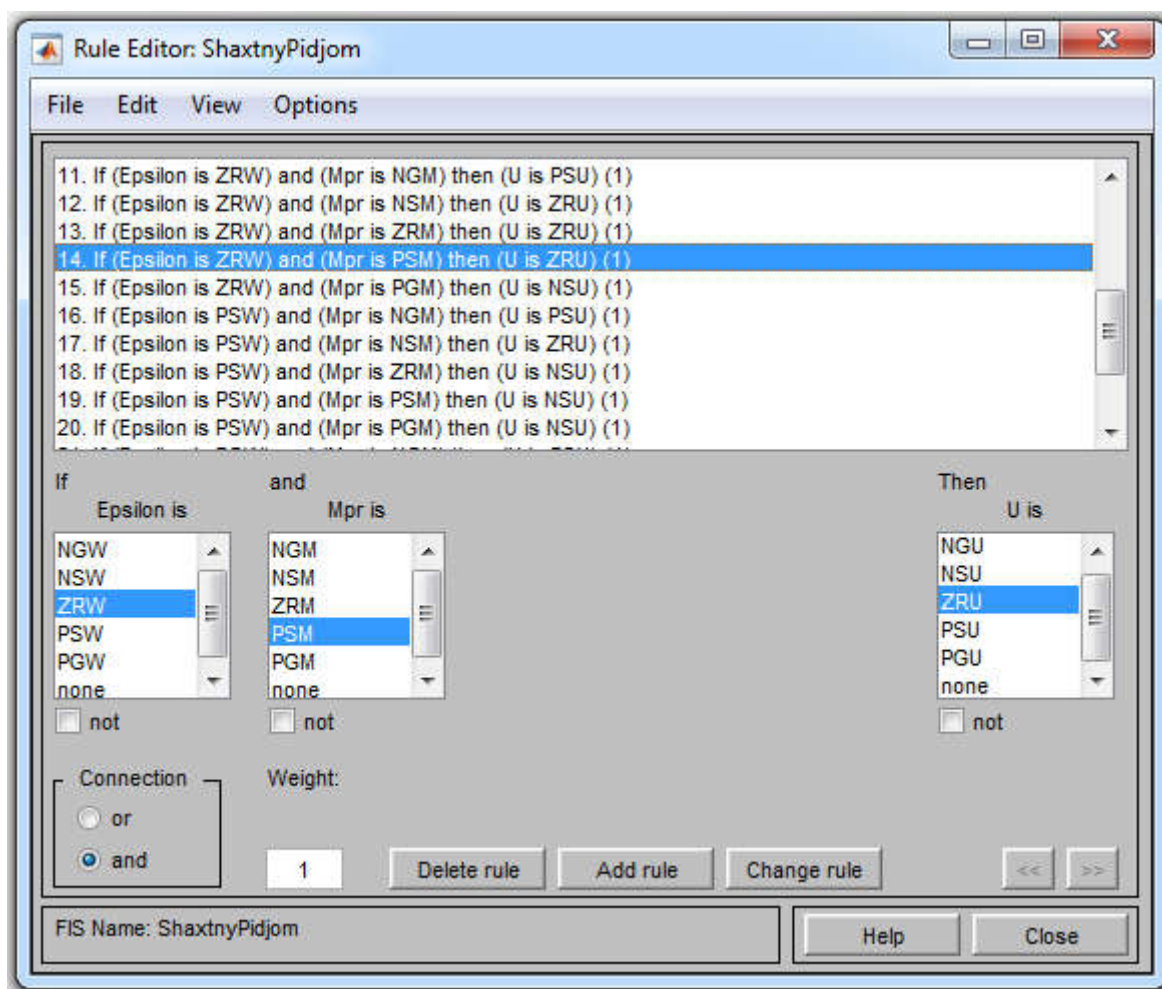


Рисунок 4.9 – Панель введення правил нечіткого висновку

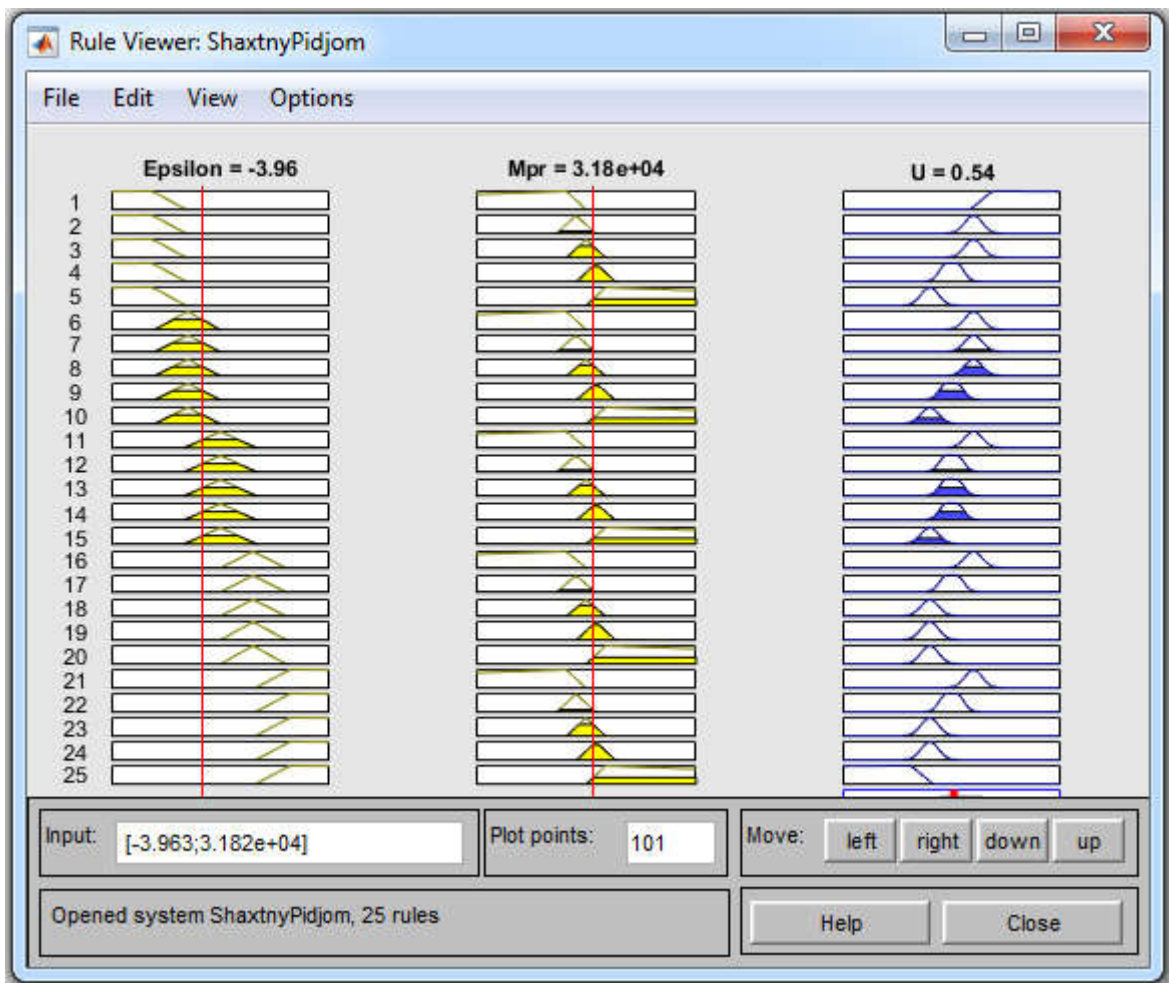


Рисунок 4.10 – Наочна демонстрація роботи системи у вікні Rule Viewer

Перегляд поверхні нечіткого висновку.

Далі відкриваємо інструмент **Surface Viewer (View → Surface)** – і одержуємо тривимірну поверхню залежності вихідної змінної від двох ПОверхня можливість аналізувати взаємозв'язок між входними змінними і виходом у тривимірному просторі. Цей інструмент дозволяє швидко оцінити адекватність побудованих функцій приналежності та структури правил.

Для виведення одновимірних залежностей (одновимірних перерізів) у вікні **Surface Viewer** змінюємо параметри **X** та **Y**, наприклад обираючи **U** від **Epsilon** або **U** від **Mpr**, що робить аналіз ще детальнішим (рис. 4.12).

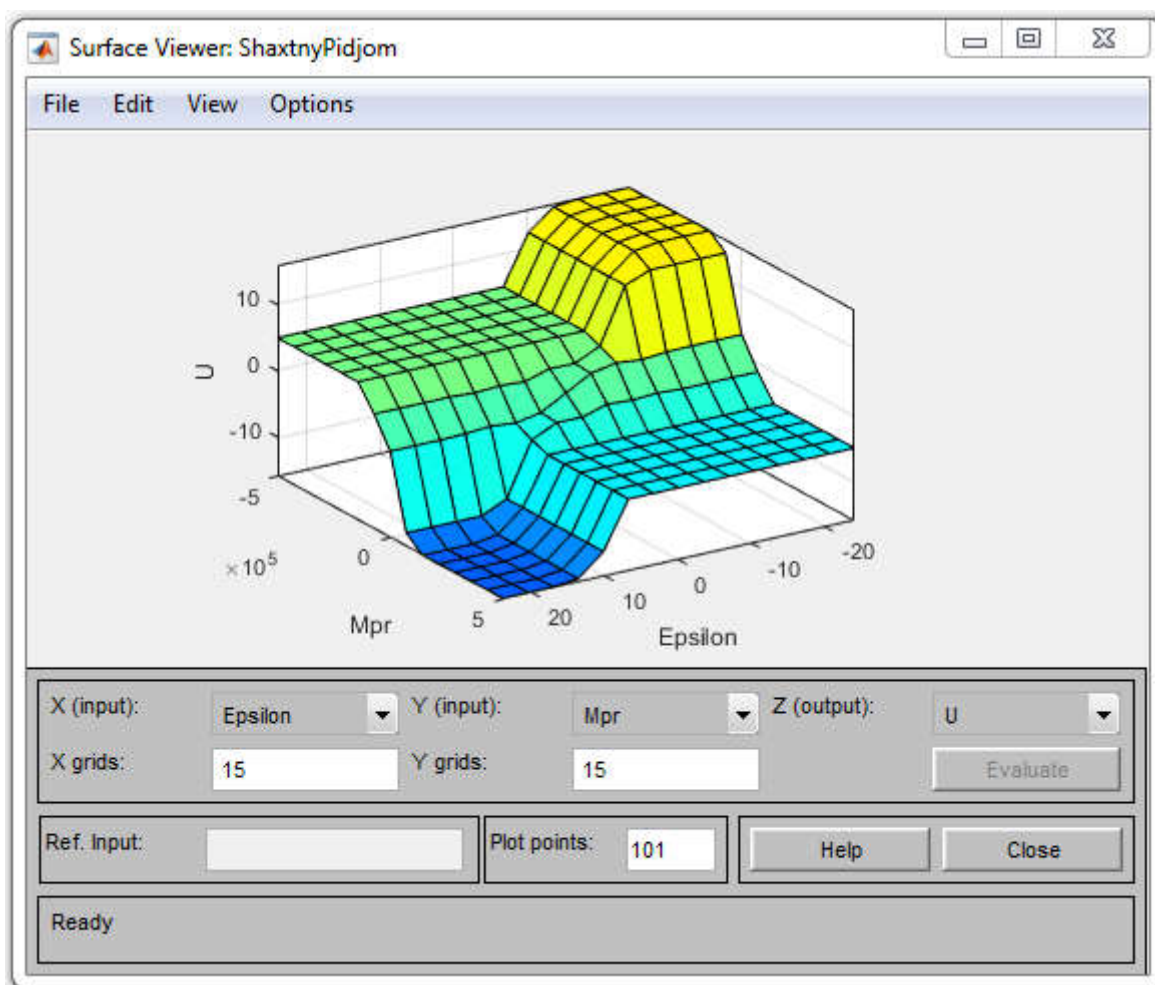


Рисунок 4.11 – Просторова поверхня залежності вихідної величини від вхідних параметрів

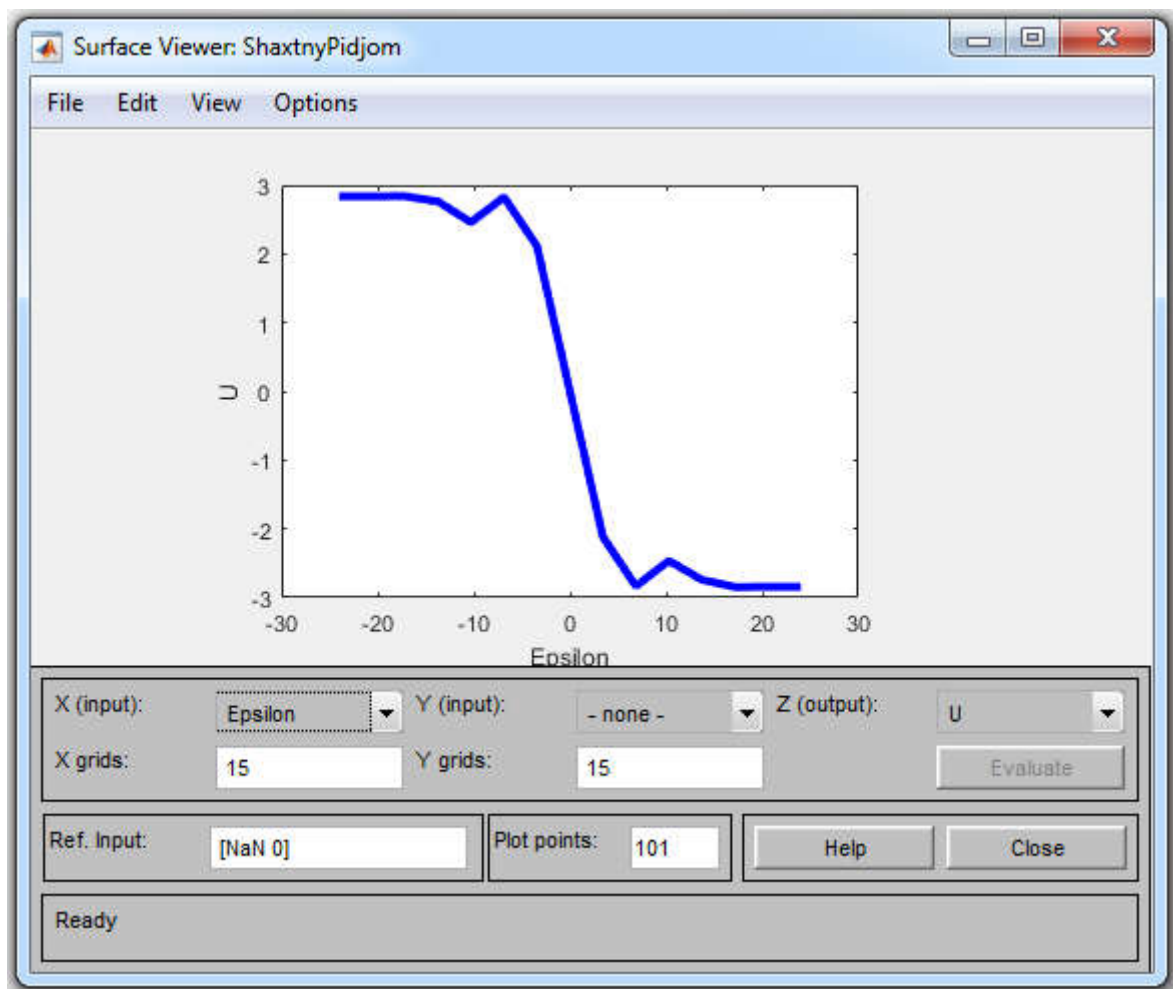


Рисунок 4.12 – Приклад одновимірної залежності керувального сигналу від помилки регулювання)

Модельовання системи з Fuzzy-регулятором.

Результати моделювання свідчать, що коректним добором типів функцій приналежності, їхніх параметрів і діапазонів зміни можна сформувати ефективний Fuzzy-регулятор, здатний зменшувати ударні навантаження в двомасовій електромеханічній системі. Моделювання виконується у Simulink-моделі, наведеної на рис. 4.1 або 4.13.

На рис. 4.14–4.17 наведено графічні результати модельних досліджень системи при роботі в режимах пуску та прикладання зовнішніх навантажень. Аналіз цих графіків показує, що система з нечітким регулятором формує плавні, практично безрезонансні перехідні процеси, істотно знижуючи динамічні перевантаження у валах і з'єднувальних елементах привода.

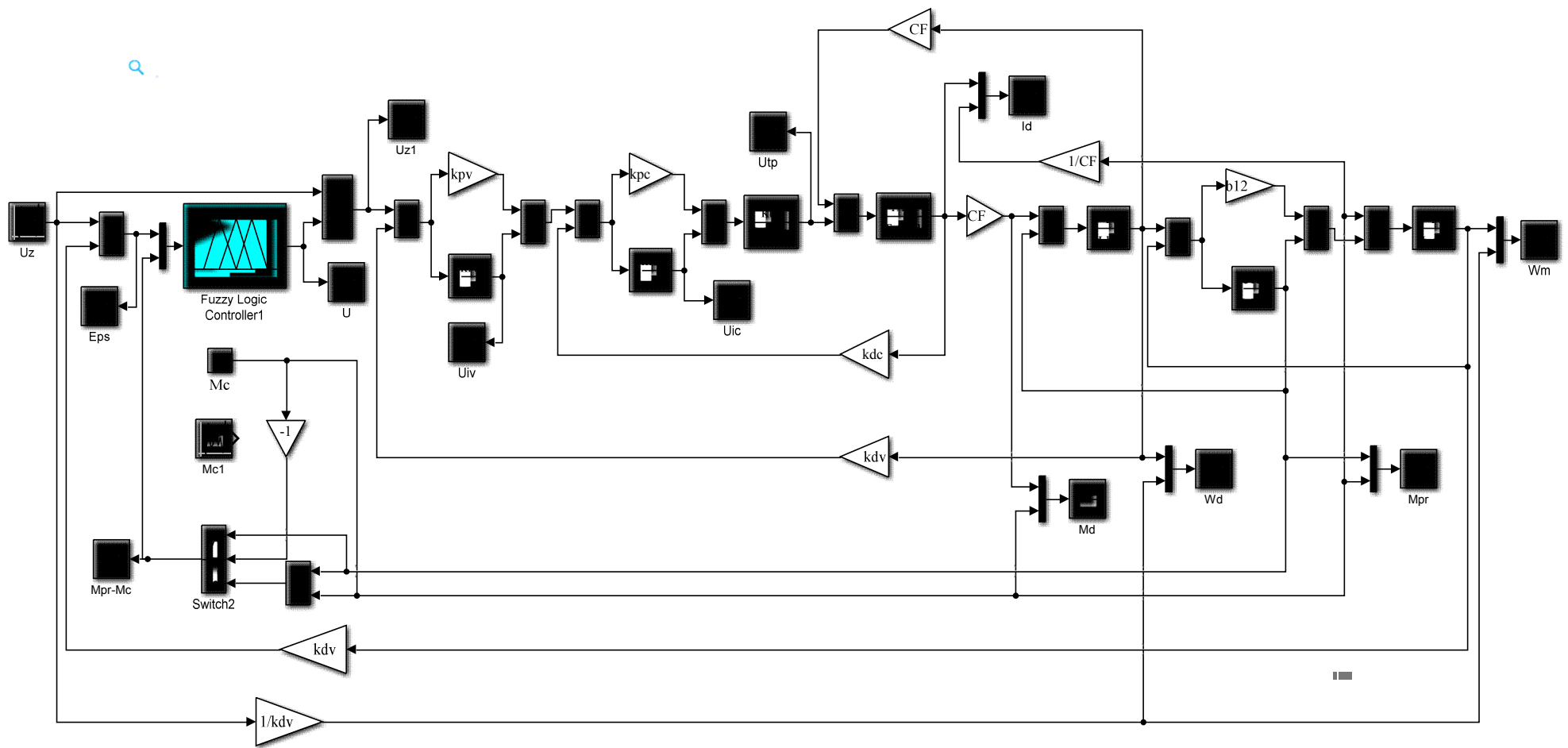
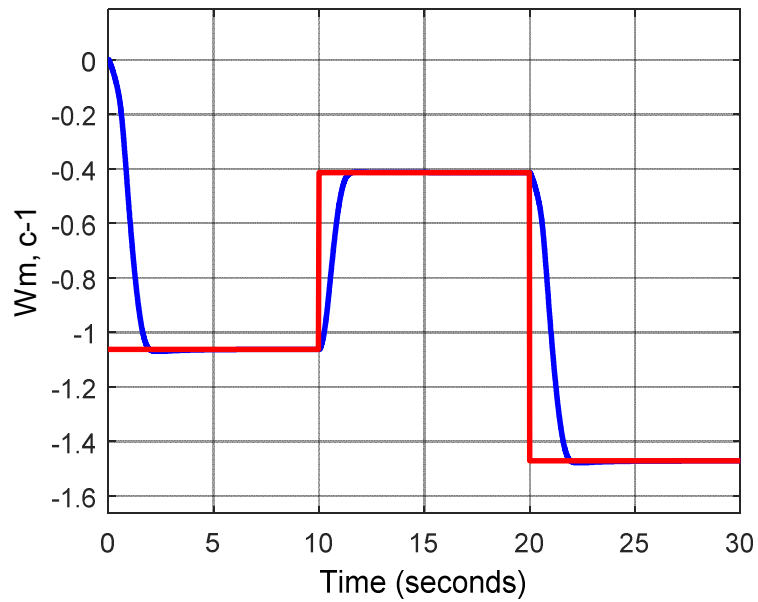
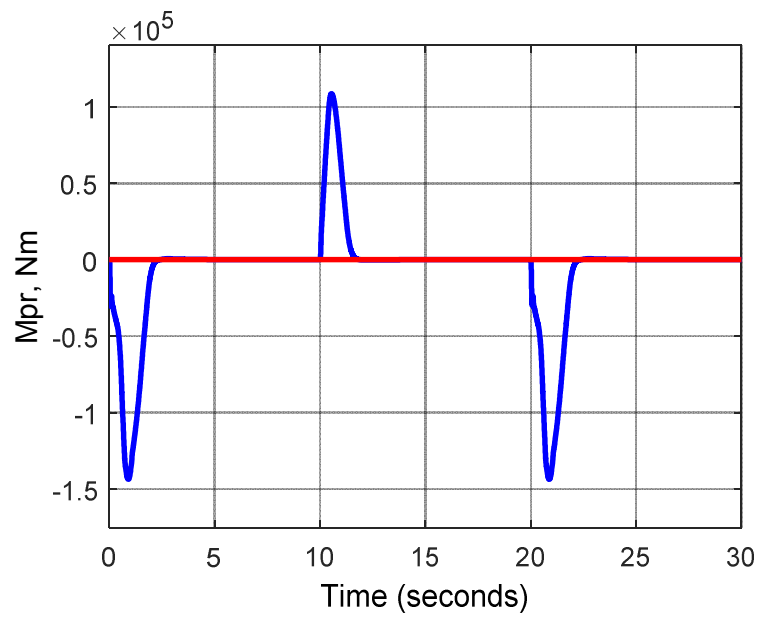


Рисунок 4.13 – Структурна схема двомасової системи з нечітким регулятором у середовищі Simulink



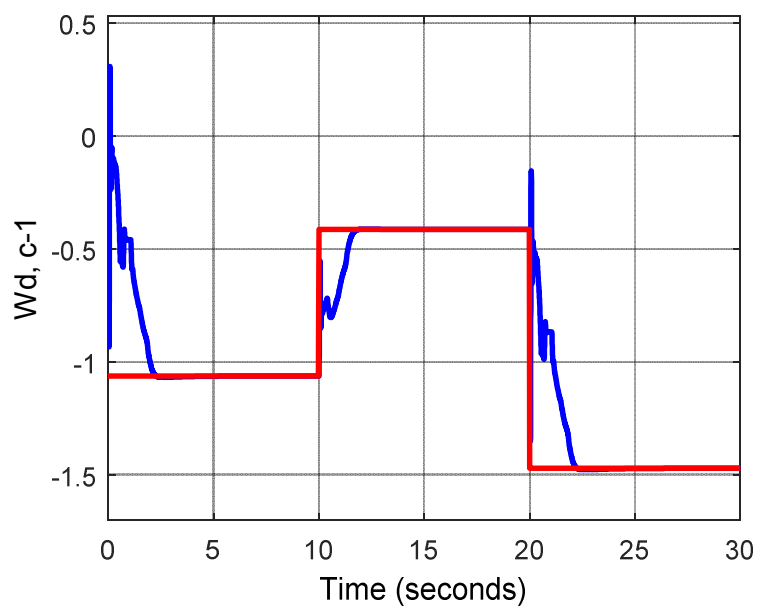
a)



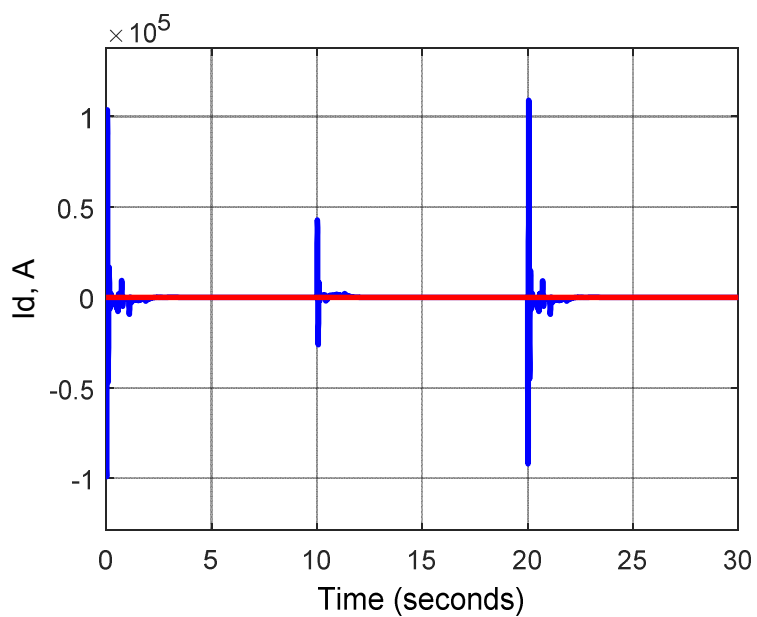
б)

Рисунок 4.14 – Графічне відображення перехідних процесів двомасової системи з Fuzzy-регулятором за задавальним впливом: а) динаміка швидкості механізму

$$\omega_m = f(t); \text{ б) розвиток пружного моменту } M_{np} = f(t)$$



а)



б)

Рисунок 4.15 – Графічне відображення перехідних процесів двомасової системи з Fuzzy-регулятором за задавальним впливом: а) динаміка швидкості двигуна

$$\omega_d = f(t); \text{ б) зміна струму двигуна } I_d = f(t)$$

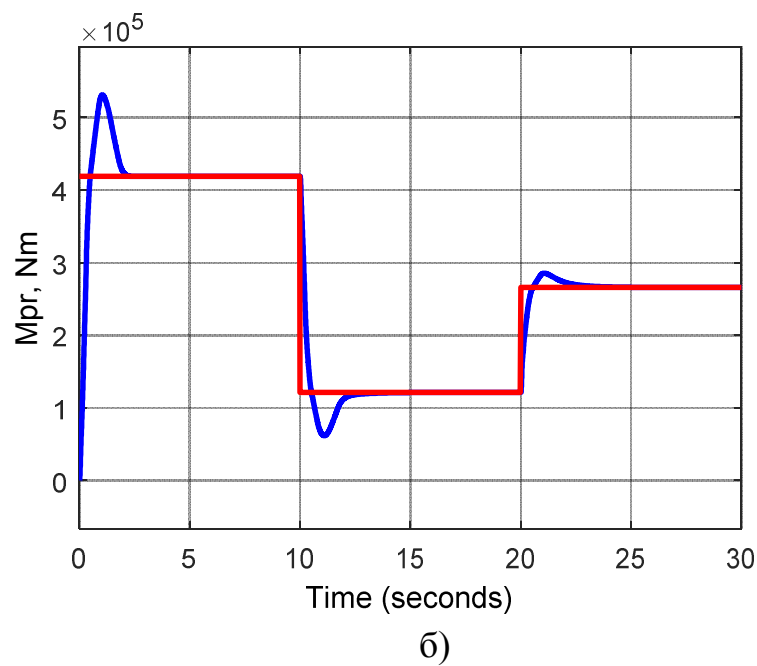
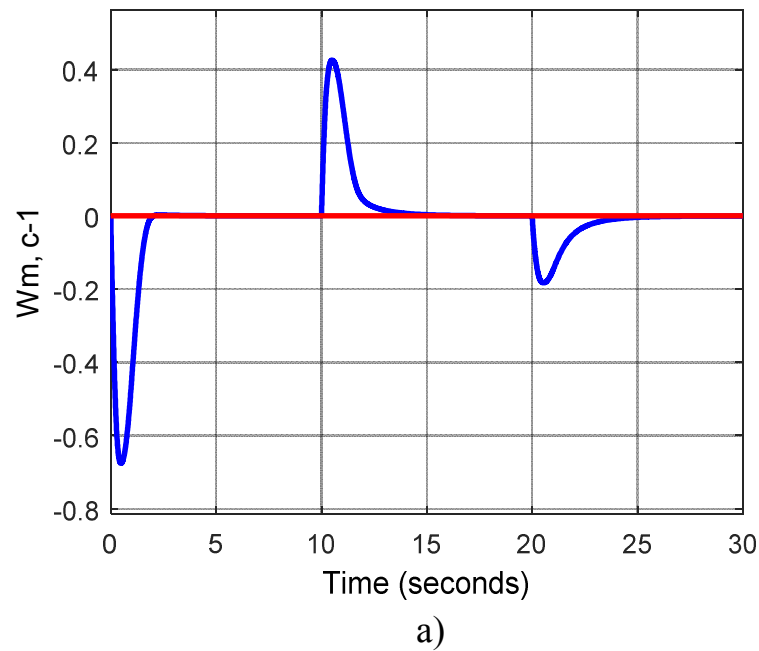
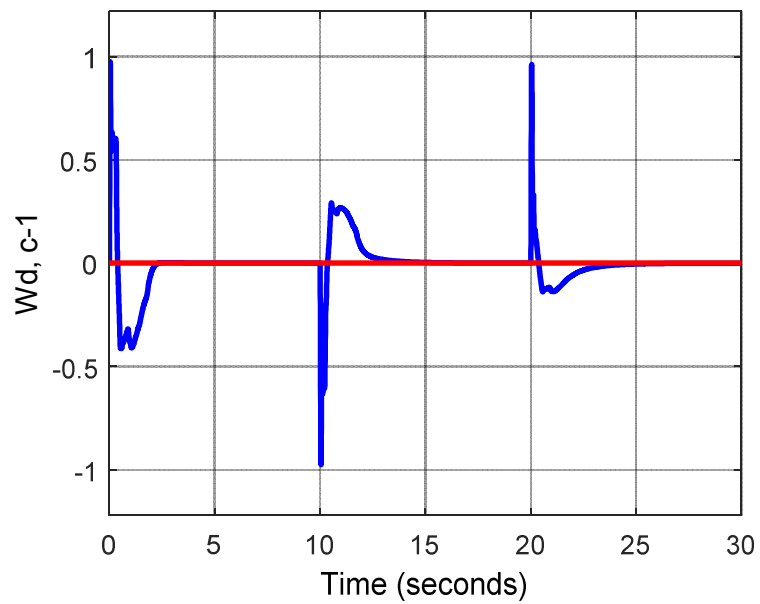
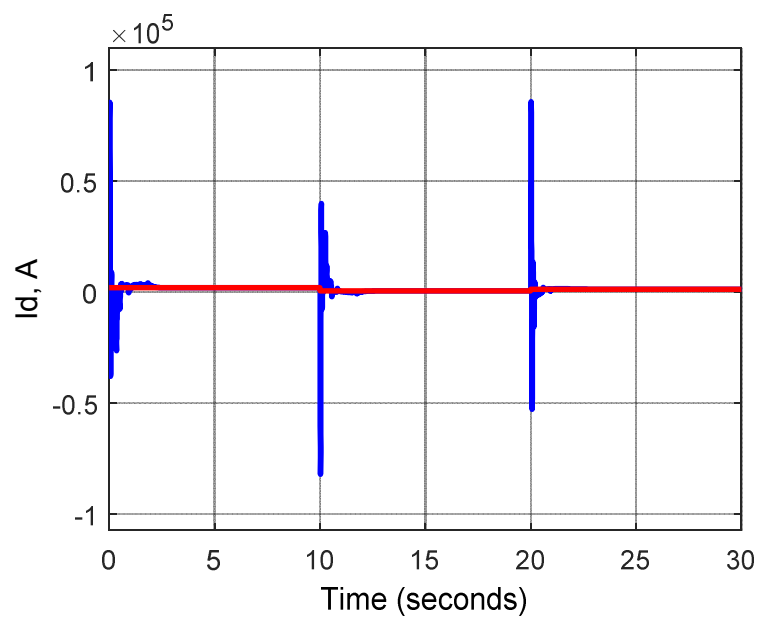


Рисунок 4.16 – Графічне відображення перехідних процесів двомасової системи з Fuzzy-регулятором при дії збурення: а) динаміка швидкості механізму $\omega_m = f(t)$; б) розвиток пружного моменту $M_{пр} = f(t)$



а)



б)

Рисунок 4.17 – Графічне відображення перехідних процесів двомасової системи з Fuzzy-регулятором при дії збурення: а) динаміка швидкості двигуна

$$\omega_d = f(t); \text{ б) зміна струму двигуна } I_d = f(t)$$

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Проаналізовано програмні засоби реалізації нечітких систем управління за допомогою MATLAB 7 та пакету Fuzzy Logic Toolbox. Цей пакет дозволяє створювати і досліджувати моделі, засновані на теорії нечітких множин, що забезпечує гнучкість у побудові так званих нечітких експертних систем та нечітких систем керування. Використання даного інструментарію дозволяє інтегрувати логіку експертних знань у процес управління складними динамічними об'єктами, забезпечуючи адаптивність та високий рівень стійкості системи до зовнішніх впливів і непередбачуваних коливань.

2. Розроблено структурну схему системи з Fuzzy-регулятором, а також схему моделі керованого об'єкта, що контролюється Fuzzy-регулятором. Система має два входи та один вихід. На вхід подається помилка регулювання $\varepsilon(t)$, тобто різниця між заданою швидкістю обертання механізму $\omega_z(t)$ і фактичною швидкістю $\omega_m(t)$, а також момент пружності $M_{\text{пр1}}(t)$, що відображає швидкісну похідну сигналу та інерційні властивості двомасової системи. Вихідним сигналом регулятора є $U(t)$, який формує керуючий вплив на електропривод. Такий підхід дозволяє враховувати не лише миттєву помилку регулювання, але й динамічну реакцію механічної системи на зміни навантаження.

3. Визначено вхідні та вихідні лінгвістичні змінні, які використовуються в Fuzzy-регуляторі. Першою вхідною змінною є помилка регулювання ε , що позначена як «помилка регулювання», другою – перший момент пружності $M_{\text{пр1}}$, що відображає швидкісну складову динаміки системи, позначений як «момент пружності». Вихідною змінною є напруження на виході регулятора U , яка впливає на систему управління та алгебраїчно підсумовується з напруженням завдання. Для всіх лінгвістичних змінних використовуються терм-множини: {"негативна велика", "негативна мала", "нульова", "позитивна мала", "позитивна велика"}. Функції приналежності кожного терма налаштовуються в процесі синтезу Fuzzy-регулятора та забезпечують гнучке відображення нечітких правил експертного управління.

4. Сформовано базу правил нечіткої логіки на основі експериментального аналізу перехідних процесів під час запуску та при зміні навантаження. Оскільки система має дві вхідні змінні по п'ять термів кожна, кількість правил нечіткого висновку становить 25. Кожне правило представлено у формі «якщо...то», що дозволяє адаптивно обирати керуючий вплив залежно від одночасного стану помилки регулювання та моменту пружності.

5. Виконано синтез Fuzzy-регулятора за допомогою FIS-редактора пакету MATLAB, використовуючи алгоритм Мамдані (Mamdani). Встановлено, що регулювання форми та параметрів функцій приналежності в межах допустимого діапазону дозволяє створити ефективний Fuzzy-регулятор, який значно знижує динамічні навантаження у багатоканальній системі та підвищує стабільність роботи електроприводу. Такий підхід забезпечує адаптивну реакцію системи на різні режими роботи та коливання зовнішніх впливів.

6. Проведено комп'ютерне моделювання системи з синтезованим Fuzzy-регулятором. Результати підтвердили, що перехідні процеси системи під час запуску та при зміні навантаження мають високу якість: коливання швидкості та інших змінних стану невеликі, система демонструє астатизм, перерегулювання не перевищує 2%, а час виходу на задане значення швидкості складає близько 3 секунд. Такі характеристики повністю відповідають технічному завданню і забезпечують безпечну та ефективну роботу електроприводу шахтної підйомної установки.

7. Зроблено висновок про ефективність Fuzzy-регулювання: використання нечіткої логіки дозволяє враховувати як миттєву помилку регулювання, так і динамічну реакцію механічної системи через момент пружності, що забезпечує адаптивне та плавне керування. Такий підхід особливо доцільний для багатоканальних електроприводів з інерційними та пружними елементами, де класичні ПІ-регулятори можуть не забезпечувати оптимальну динаміку без додаткових корекцій.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу розробки та дослідження нечіткої системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму підйому шахтної підіймальної установки. Запропоновані підходи та отримані результати спрямовані на підвищення якості регулювання, покращення динамічних характеристик системи та забезпечення надійної роботи електроприводу в умовах змінних навантажень і пружних зв'язків.

У ході виконання роботи отримано такі основні результати:

1. Проведено ґрунтовний аналіз існуючих систем управління механізмами підйому шахтних підіймальних установок з точки зору забезпечення високої якості регулювання та відповідності сучасним вимогам до систем автоматизованого електроприводу. На основі цього аналізу науково обґрунтовано доцільність і перспективність застосування нечітких апроксимуючих систем управління для багатомасових електромеханічних систем, які характеризуються нелінійністю, змінними параметрами та наявністю пружних елементів.

2. На підставі аналізу технічних характеристик, режимів роботи та експлуатаційних вимог до підйомних установок обґрунтовано вибір безредукторного електроприводу постійного струму, виконаного за системою ТП–Д, для головного підйому. Здійснено вибір електродвигуна та основного електрообладнання силового ланцюга електроприводу. Проведено перевірку двигуна за перевантажувальною здатністю, що підтвердило його відповідність заданим умовам роботи та вимогам надійності.

3. Виконано вибір структури та розрахунок системи автоматичного управління координатами електроприводу. Обрано двоконтурну систему підлеглого регулювання з внутрішнім контуром струму та зовнішнім контуром швидкості. Розраховано параметри силового ланцюга електроприводу, необхідні для синтезу системи автоматичного управління. Проведено синтез послідовних коригувальних пристроїв із оптимізацією контуру струму за модульним крите-

рієм, а контуру швидкості — за симетричним критерієм. Моделювання системи здійснено з використанням пакету прикладних програм MATLAB, що дозволило оцінити динамічні та статичні характеристики електроприводу.

4. Розроблено математичну модель двомасової електромеханічної системи, яка враховує пружні властивості підйимального канату. Проведено комп'ютерне моделювання цієї системи, результати якого показали наявність значних коливань основних координат у перехідних режимах, що негативно впливає на якість регулювання та може призводити до підвищених динамічних навантажень елементів механізму.

5. З метою надання системі бажаних динамічних властивостей виконано синтез системи управління з використанням нечіткого (Fuzzy) регулятора. Розглянуто принципи побудови та функціонування Fuzzy-регулятора, наведено послідовність його синтезу та налаштування. Побудовано перехідні процеси в двомасовій системі з нечітким регулятором. Аналіз результатів моделювання показав, що реакція системи на ступінчасту дію з випадковою амплітудою є задовільною, має коливальний характер із достатньо швидким загасанням. Система є астатичною, перерегулювання не перевищує 2%, а час регулювання становить близько 3 с, що повністю відповідає вимогам технічного завдання.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування нечітких систем управління для багатомасових електромеханічних систем механізмів підйому шахтних підйимальних установок та доцільність їх впровадження в сучасні системи управління електроприводами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Желдак Т.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: навч. посіб. / Т.А. Желдак, Л.С. Коряшкіна, С.А. Ус, за редакцією С.А. Ус ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2020. – 387 с.
2. Кирик В. В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник / В. В. Кирик.– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка» 2019.– 224с.
3. Антоненко В. М., Мамченко С.Д., Рогушина Ю.В. Сучасні інформаційні системи і технології: управління знаннями: навчальний посібник. – Ірпінь : Національний університет ДПС України, 2016. – 212 с.
4. Глибовець М.М., Отецький О.В. Штучний інтелект. – К.: Вид. дім «КМ Академія», 2002. – 366 с.
5. Ямпольський Л. С. Системи штучного інтелекту в плануванні, моделюванні та управлінні : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Л. С. Ямпольський, Б. П. Ткач, О. І. Лісовиченко. - К. : ДП «Вид. дім «Персонал», 2011. - 544 с.
6. Методи та системи штучного інтелекту: Теорія і практика: Навчальний посібник / О.С. Булгаков, В.В. Зосімов, В.О. Поздєєв. – Одеса. : Олді плюс, 2020. – 356с.
7. Методи та системи штучного інтелекту: Навчальний посібник—/ Уклад. : А.С. Савченко, О. О. Синельніков. – К. : НАУ, 2017. – 190 с.
8. Методи та системи штучного інтелекту: Навчальний посібник / Уклад.: І.М. Удовик, Г.М. Коротенко, Л.М. Коротенко, В.О. Трусів, А.Т. Харь. – Д.: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2017. – 105 с.
9. Методи та системи штучного інтелекту: навч. посіб. / укл.Д.В. Лубко, С.В. Шаров. – Мелітополь: ФОП Однорог Т.В., 2019. – 264 с.
10. Паламар М. І. Комп'ютерні технології штучного інтелекту для прецизійного управління у мехатронних системах : навч. посіб. / Михайло Паламар, Михайло Стрембіцький ; Тернопіл. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. Тернопіль :

Тернопіл. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя, 2018. 127 с.

11. Литвин В.В. Інтелектуальні системи : підручник / В.В. Литвин, В.В. Пасічник, Ю.В. Яцишен. – Львів: Новий світ, 2009. – 405 с.

12. Троцько В.В., Методи штучного інтелекту: навчально-методичний і практичний посібник. / Троцько В.В. – Київ: Університет економіки та права «КРОК», 2020. – 86 с.

13. Куклін В. М. К Подання знань і операції над ними; навчальний посібник. / В. М. Куклін. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019 – 164 с.

14. Снитюк В. Є. Прогнозування. Моделі, методи, алгоритми / В. Є. Снитюк. – Київ : Маклаут, 2008. – 364 с.

15.Івахів, Орест Васильович. Основи побудови систем керування з нечіткою логікою : навчальний посібник /О. Івахів, М. Наконечний.– Львів :Растр-7,2017. – 129 с.

17. Коротка, Лариса Іванівна. Обчислювальний інтелект : теорія нечітких множин: навчальний посібник / Коротка Л.І., Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю.,Ляшенко О.А., Солодка Н.О.– Дніпро :ДВНЗ УДХТУ,2020. – 161 с.

18. Шушура О.М. Методологічні основи побудови інформаційних технологій для автоматизації управління складними системами на принципах нечіткої логіки : дис. ... доктора технічних наук : 05.13.06 / Шушура Олексій Миколайович. К., 2018. 332 с.

19.Zadeh L. A. Fuzzy sets. – Information and Control, vol. 8, 1965, pp. 338–353.

20.Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. – Information Sciences, vol. 8, 1975, pp. 43–80.

21.Zadeh L. A. *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes* / L. A. Zadeh // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1973. – Vol. SMC-3, No. 1. – P. 28-44.

22.Zadeh L. A. *Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic* / L. A. Zadeh // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1997. – Vol. 90, No. 2. – P. 111-127.

23. Zadeh L. A. *From computing with numbers to computing with words - from manipulation of measurements to manipulation of perceptions* / L. A. Zadeh // *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. – 2002. – Vol. 12, No. 3. – P. 307-324
24. Dubois, H. Prade. – *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*, vol. 144, 1980, 385. p.
25. Dubois D. and H. Prade, Unfair coins and necessity measures: Towards a possibilistic interpretation of histograms. *Fuzzy Sets and Systems*, 10, No. 1, 1983.
26. Dubois D., Prade H. *Fuzzy Numbers, on Overview // Analysis of Fuzzy Information (Mathematics)*. GRC Press, 1988. P. 3–39.
27. M. Sugeno. *Theory of fuzzy integrals and its applications*. PhD thesis, Tokyo Institute of Technology, 1974.
28. M. Sugeno. Fuzzy measures and fuzzy integrals: a survey. In M.M Gupta, G.N Saridis, and B.R Gains, editors, *Fuzzy automata and decision processes*, pages 89-102. North Holland, Amsterdam, 1977.
29. M. Sugeno. An introductory survey on fuzzy control. *Information Sciences*, 36:59-83, 1985.
30. Bezdek J. C. A convergence theorem for the fuzzy ISODATA clustering algorithm. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 2, No.1, 1980, pp. 1–8.
31. Bezdek J.C. Some recent applications of fuzzy c-means in pattern recognition and image processing. – *IEEE Workshop Lang. Autom.*, 1983, pp. 247–252.
32. Yager R. R. (Ed.) *Fuzzy Set and Possibility Theory*. - Academic Publishers, New York, 1982.
33. Bezdek J. C. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms* : моногр. – New York : Plenum Press, 1981. – 239 с.
34. Takagi T., Sugeno M. *Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control* : журн. стаття / T. Takagi, M. Sugeno. – *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1985. – Vol. SMC-15, No. 1, P. 116–132.

35. Kosko B. *Fuzzy cognitive maps* : журн. стаття / B. Kosko. – International Journal of Man-Machine Studies. – 1986. – Vol. 24, Issue 1, P. 65–75.
36. Babuška R. *Fuzzy Modeling for Control* : моногр. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 1998. – 328 с.
37. Klir G. J., Yuan B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications* : моногр. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 1995. – 574 с.
38. Zadeh L. A. *Fuzzy logic = computing with words*/ L. A. Zadeh // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 1996. – Vol. 4, No. 2. – P. 103-111
39. Chen G., Pham T. T. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*. Boca Raton : CRC Press, 2001. – 328 с
40. Buckley J. J., Eslami E. *An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets*. Berlin ; Heidelberg : Physica-Verlag, 2002. – 285 с
41. Mendel J. M., John R. I. «Type-2 fuzzy sets made simple» // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2002. – Vol.10, No.2 (Apr. 2002). – C.117–127
42. Mendel J. M. «Type-2 fuzzy sets and systems: an overview» // *IEEE Computational Intelligence Magazine*. – 2007. – Vol.2, No.1. – C.20–29
43. Ross T. J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 3rd ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2010. – ISBN 978-0-470-74376-8
44. Mendel J. M., Hagsras H., Tan W. W., Melek W. W., Ying H. *Introduction to Type-2 Fuzzy Logic Control: Theory and Applications*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2014. – 376 с
45. Castillo O. «A review on interval type-2 fuzzy logic applications in intelligent control» // *Information Sciences / Applied Soft Computing* (огляд). – 2014
46. Wu D., Mendel J. M. «Recommendations on Designing Practical Interval Type-2 Fuzzy Systems» (технічний звіт/arXiv; рекомендації та практичні підходи) – 2019
47. Mittal K., et al. «A comprehensive review on Type-2 fuzzy logic applications» // *Applied Soft Computing* (огляд). – 2020.

48. Yera R., Martínez L. «Fuzzy tools in recommender systems: a survey» // *International Journal of Computational Intelligence Systems*. – 2017. – Vol.10, No.1, pp. 776–803
49. Castillo O., Melin P. «Review of recent Type-2 fuzzy image processing» // *Information (MDPI)*. – 2017.
50. Kambalimath S., Deka P. C. «A basic review of fuzzy logic applications in hydrology and water resources» // *Applied Water Science*. – 2020. – Vol.10, Art.191.
51. Hamza M. F., et al. «A survey on advancement of hybrid type-2 fuzzy sliding mode control» // *Neural Computing & Applications / Soft Computing*. – 2018.
52. Vadiati M., Adamowski J., Asghari-Moghaddam A. «A comparative study of fuzzy logic-based models for groundwater quality evaluation» // *Journal of Water and Land Development*. – 2019. – No.43, pp.158–170.
53. Aslam S. Model predictive control for Takagi–Sugeno fuzzy systems // *Information Sciences*. – 2023.
54. Beşkardeş A. A survey on fuzzy control for mechatronics applications / A. Beşkardeş. – 2023.
55. Vidal-Martínez R., García-Martínez J. R., Rojas-Galván R., Álvarez-Alvarado J. M., Gozález-Lee M., Rodríguez-Reséndiz J. *A Review of Mamdani, Takagi–Sugeno, and Type-2 Fuzzy Controllers for MPPT and Power Management in Photovoltaic Systems* / R. Vidal-Martínez, J. R. García-Martínez, R. Rojas-Galván, J. M. Álvarez-Alvarado, M. Gozález-Lee, J. Rodríguez-Reséndiz. - *Technologies*, 2025. - Vol. 13, № 9, Art. 422.
56. Zhang Y. Takagi–Sugeno–Kang. Fuzzy system fusion: A survey // *Fuzzy Sets and Systems*. - 2024.
57. Miron A., Beleiu H. G. Fuzzy Control Systems for Power Quality Improvement - A Systematic Review // *Applied Sciences*. - 2024. -T. 14, № 11.
58. *Relaxed Model Predictive Control of T-S Fuzzy Systems via Homogeneous Polynomial Techniques* // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2024.

59. Mohindru P. Review on PID, fuzzy and hybrid fuzzy PID controllers for controlling non-linear dynamic behaviour of chemical plants // *Artificial Intelligence Review*. - 2024.
60. Rahman M. M., Rahman M. A., Ahmad M. W., Islam M. R. *Type-3 Fuzzy System-Based Intelligent Control Approaches and Applications*] / M. M. Rahman, M. A. Rahman, M. W. Ahmad, M. R. Islam // *IEEE Access*. - 2024. – Vol. 12. – P. 78319–78345.
61. Mohindru P., Pankaj, Kumar D. *Review on PID, fuzzy and hybrid fuzzy PID controllers for controlling non-linear dynamic behaviour of chemical plants* / P. Mohindru, Pankaj, D. Kumar // *Artificial Intelligence Review*. - 2024.
62. Beşkardeş A. A comprehensive review on fuzzy logic control systems for all, hybrid, and fuel cell electric vehicles // *Soft Computing*. - 2024.
63. Qin H., Li Y., Zhang S. A fuzzy adaptive PID coordination control strategy for hybrid energy storage systems // *Energies*. - 2024. - T. 17, № 21.
64. Chang W.-J., Lin Y.-H., Ku C.-C. A comprehensive survey on advanced control techniques for T-S fuzzy systems subject to control input and system output requirements // *Processes*. - 2025. - T. 13, № 3.
65. Wang, L. X., and J. M. Mendel. "Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning." *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 3, no. 5, 1992, pp. 807–814.
66. Castro, J. L. "A fuzzy logic controller: Introduction and applications." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 25, no. 4, 1995, pp. 665–685.
67. Kosko, Bart. "Fuzzy systems as universal approximators." *IEEE Transactions on Computers*, vol. 43, no. 11, 1993, pp. 1329–1333.
68. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / П. В. Леонт'єв та ін. ; за заг. ред. П. В. Леонт'єва. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 296 с.
69. Теорія автоматичного управління : навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. / О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В. П. Бунь. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.

70. Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи [Електронний ресурс] : навчальний посібник / О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 98 с.

71. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / П. В. Леонтьєв та ін. ; за заг. ред. П. В. Леонтьєва. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 296 с.

72. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / О. К. Аблесімов – К. : «Освіта України», 2019. – 270 с.

73. Навчальний посібник з дисципліни "Теорія автоматичного керування" : у 2 ч. Ч. 1 / А. П. Гуров, С. І. Ольшевський, О. О. Черно, Л. І. Бугрім. – Миколаїв : НУК, 2018. – 111 с.

74. Теорія автоматичного управління : курс лекцій / Т. М. Боровська. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 256 с.

75. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с

76. Лістровий С. В., Мірошник М. А., Клименко Л. А. Теорія автоматичного керування, штучний інтелект і автоматизація процесу прийняття рішення: Навч. посібник. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 120 с.

77. Автоматизований електропривод. Розділ 1. Теорія електропривода. Навчальний посібник. / Н.Д. Красношاپка – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. - 2023. – 101 с.

78. Возняк, О.М., Штуць. А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика. Частина 1. Навчальний посібник. – Вінниця: ТВОРИ, 2021. – 280 с.

79. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.

80.Панкратов А.І. Системи керування електроприводами. Видання 2: Навч. посібник з дисципліни «Системи керування електроприводами» (для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» денної і заочної форми навчання) – Краматорськ: ДДМА, 2018. – 225 с.

81.Колб Ант. А, Колб А. А.Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. – Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.

82.Василега П. О. Електропривод робочих машин : підручник / П. О. Васи-
лега. – Суми: Сумський державний університет, 2022. – 290 с. ISBN 978-966-
657-900-6.

83.Шефер О.В. Автоматизований електропривод загальнопромислових ме-
ханізмів: конспект лекцій. – Полтава: ПолтНТУ, 2020. – 154 с.

84.Електропривод виробничих машин і механізмів: Навчальний посібник /
О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, В.Я. Бунько, В.Ю. Рамш; За ред. О.Ю. Си-
нявського. – К.: ФОП Ямчинський О.В. , 2020. – 444 с.

85.Гурко О.Г. Аналіз та синтез систем автоматичного управління у MATLAB:
Навчальний посібник / О.Г. Гурко, І.Ф. Єрмоменко. Харків, ХНАДУ, 2012. – 284 с.

86.Модельювання систем управління в SIMULINK : навч. посібник / В. О. Бо-
гомолов, О. Г. Гурко, В. І. Клименко, Д. М. Леонтьєв, О. М. Красюк. Харків
ХНАДУ, 2018. – 220 с.

ДОДАТОК А

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА БАЗОВІ ПОНЯТТЯ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

А.1 Визначення нечітких множин та методи їх формалізованого завдання

Нечітка множина (fuzzy set) – це сукупність елементів довільної природи, щодо яких не можна з повною визначеністю затверджувати, – чи належить той або інший елемент даної сукупності даній множині чи ні. Іншими словами, нечітка множина відрізняється від звичайної множини тим, що для всіх або частини його елементів не існує однозначної відповіді на питання: «Належить або не належить той або інший елемент даній нечіткій множині?» Можна це питання поставити і по-іншому: «Чи володіють його елементи деякою характеристичною властивістю, яка може бути використана для завдання цієї нечіткої множини?»

Формально нечітка множина A визначається як множина впорядкованих пар або кортежів вигляду: $\langle x, \mu_A(x) \rangle$ де x є елементом деякої універсальної множини або універсуму E , а $\mu_A(x)$ – функція приналежності (або ступінь приналежності), яка ставить у відповідність кожному з елементів $x \in E$ деяке дійсне число з інтервалу $[0, 1]$, тобто дана функція визначається у формі відображення

$$\mu_A(x): E \rightarrow [0,1].$$

При цьому $\mu_A(x) = 1$ для деякого $x \in E$ означає, що елемент x безумовно належить нечіткій множині, а значення $\mu_A(x) = 0$ означає, що елемент x безумовно не належить нечіткій множині A .

Функція приналежності може бути визначена явним чином у вигляді функціональної залежності (наприклад $\mu_A(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-1}{2}\right)^2\right)$) або дискретно –

шляхом завдання кінцевій послідовності значень $x \in (x_i)$ у вигляді

$$A = \{\mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n\},$$

або у вигляді

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \right\},$$

при цьому коса і горизонтальна межа служить просто роздільником, а знак «+» позначає не арифметичну суму, а теоретико-множинне об'єднання окремих елементів. Нескінченні нечіткі множини іноді записують із знаком інтеграла у вигляді $\int \mu_A(x)/x$. Все це скоріше дань традиції, ніж щось, що має змістовний сенс. Тим паче, що сам знак інтеграла може бути сприйнятий як нечіткий інтеграл, чим він тут ніяк не є. Бажаючи підкреслити або явно вказати, що множина A є нечіткою, іноді часто записують нечітку множину із знаком тильда «~» вгорі, тобто у формі $\tilde{A}$.

Зі всіх нечітких множин виділимо два окремі випадки, які, по суті, співпадають з своїми класичними аналогами і використовуються надалі при визначенні інших нечітких понять.

Порожня нечітка множина. У теорії нечітких множин зберігають свій сенс деякі спеціальні класичні множини. Так, наприклад, порожня нечітка множина або множина, яка не містить жодного елементу, як і раніше позначається через $\emptyset$ і формально визначається як така нечітка множина, функція приналежності якої тотожно рівна нулю для всіх без виключення елементів: $\mu_{\emptyset} = 0$.

Універсум. Що стосується іншої спеціальної множини, то так званий універсум, що позначається через E , вже був використаний вище як звичайна множина, що містить в рамках деякого контексту всі можливі елементи. Формально зручно вважати, що функція приналежності універсуму як нечіткої множини тотожно рівна одиниці для всіх без виключення елементів: $\mu_E = 1$.

Приклад завдання нечіткої множини. Нехай $E = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$; A – нечітка множина, для якої $\mu_A(x_1) = 0,3$, $\mu_A(x_2) = 0$, $\mu_A(x_3) = 1$, $\mu_A(x_4) = 0,5$, $\mu_A(x_5) = 0,9$.

Тоді A можна представити, наприклад, у вигляді

$$A = 0,3/x_1 + 0/x_2 + 1/x_3 + 0,5/x_4 + 0,9/x_5,$$

або у вигляді:

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
$A =$	0,3	0	1	0,5	0,9

Приклади нечітких множин.

1. Нехай $E = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$; A – нечітку множину «декілька» можна визначити таким чином: «декілька» = $0,5/3 + 0,8/4 + 1/5 + 1/6 + 0,8/7 + 0,5/8$.

2. Нехай $E = \{1, 2, 3, \dots, n, \dots\}$. Нечітка множина «малий» можна визначити за допомогою функції приналежності

$$\mu_{\ll\text{малий}\gg}(n) = \frac{1}{1 + \left(\frac{n}{10}\right)^2}.$$

3. Нехай $E = \{1, 2, 3, \dots, 100\}$ і відповідає поняттю «вік», тоді нечітка множина «молодий» визначена за допомогою функції приналежності

$$\mu_{\ll\text{молодий}\gg}(x) = \begin{cases} 1, & x \in [1, 25] \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{x-25}{5}\right)^2}, & x > 25 \end{cases}.$$

4. Нехай E – множина цілих чисел:

$$E = \{-8, -5, -3, 0, 1, 2, 4, 6, 9\}.$$

Тоді нечітку підмножину чисел, що по абсолютній величині близькі до нуля, можна визначити, наприклад, так:

$$A = \{0/-8 + 0,5/-5 + 0,6-3 + 1/0 + 0,9/1 + 0,8/2 + 0,6/4 + 0,3/6 + 0/9\}.$$

Використовуються наступні поняття.

Нечіткі числа – нечіткі змінні, визначені на числовій осі, тобто нечітке число визначається як нечітка множина A на множині дійсних чисел з функцією приналежності $\mu_A(x) \in [0,1]$, де x – дійсне число.

У теорії нечітких множин, крім змінних числового типу, існують так звані *лінгвістичні змінні* з приписуваними ним значеннями (термами). Так, нехай змінна x визначає вік ($x = \text{«вік»}$). Тоді, за аналогією з вищенаведеним прикладом, можна визначити нечіткі поняття «молодий», «літній», «старий», що характеризуються деякими функціями приналежності $\mu_{\text{«молодий»}}(x)$, $\mu_{\text{«пожилий»}}(x)$, $\mu_{\text{«старий»}}(x)$. Так само, як звичайна змінна може приймати різні значення, лінгвістична змінна «вік» може приймати різні значення. В нашому прикладі «молодий», «літній», «старий».

Лінгвістичною змінною називається змінна, значеннями якої можуть бути слова або словосполучення деякої природної або штучної мови.

Терм-множиною називається множина всіх можливих значень лінгвістичної змінної.

Термом називається будь-який елемент терм-множини. У теорії нечітких множин терм формалізується нечіткою множиною за допомогою функції приналежності.

Кожна нечітка множина має певний носій (англ.: support). Носієм множини $Supp(A)$ є підмножина тих елементів A , для яких ступінь приналежності до A не рівна нулю, тобто $Supp(A) = \{x, \mu_A(x) > 0\}$. У наведеному вище прикладі носієм підмножини «молодий» є множина років в інтервалі від 1 до 100.

А.2 Структура, типи та властивості функцій приналежності в нечітких логічних системах

Вищенаведене формальне визначення нечіткої множини не накладає ніяких обмежень на вибір конкретної функції приналежності для його представлення. Проте на практиці зручно використовувати ті з них, які допускають аналітичне представлення у вигляді деякої простої математичної функції. Це спрощує не тільки відповідні чисельні розрахунки, але і скорочує обчислювальні ресурси, необхідні для зберігання окремих значень цих функцій приналежності. Необхідність типізації окремих функцій приналежності також обумовлена наявністю реалізацій відповідних функцій у відомих інструментальних засобах (наприклад, в системі MATLAB).

Найчастіше в нечіткій логіці для завдання функцій приналежності використовуються наступні типові форми приведених нижче функцій (рис.А.1):

- трикутна (trimf);
- трапецеїдальна (trapmf);
- гаусова (gaussmf);
- подвійна гаусова (gauss2mf);
- узагальнена колоколоподібна (gbellmf);
- сигмоїдальна (sigmf);
- подвійна сигмоїдальна (dsigmf);
- добуток двох сигмоїдальних функцій (psigmf);
- Z-функція;
- S-функція;
- Pi-функція.

Конкретний вид даних функцій визначається значеннями параметрів, що входять в їх аналітичні представлення, наприклад:

$$\text{trimf}(x, a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{x-a}{b-a}\right), 0\right);$$

$$\text{trapmf}(x, a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-a}{c-b}\right), 0\right);$$

$$\text{gaussmf}(x, \sigma, c) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2};$$

$$\text{bellmf}(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}};$$

$$\text{sigmf}(x, a, c) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))} \text{ і т.д.}$$

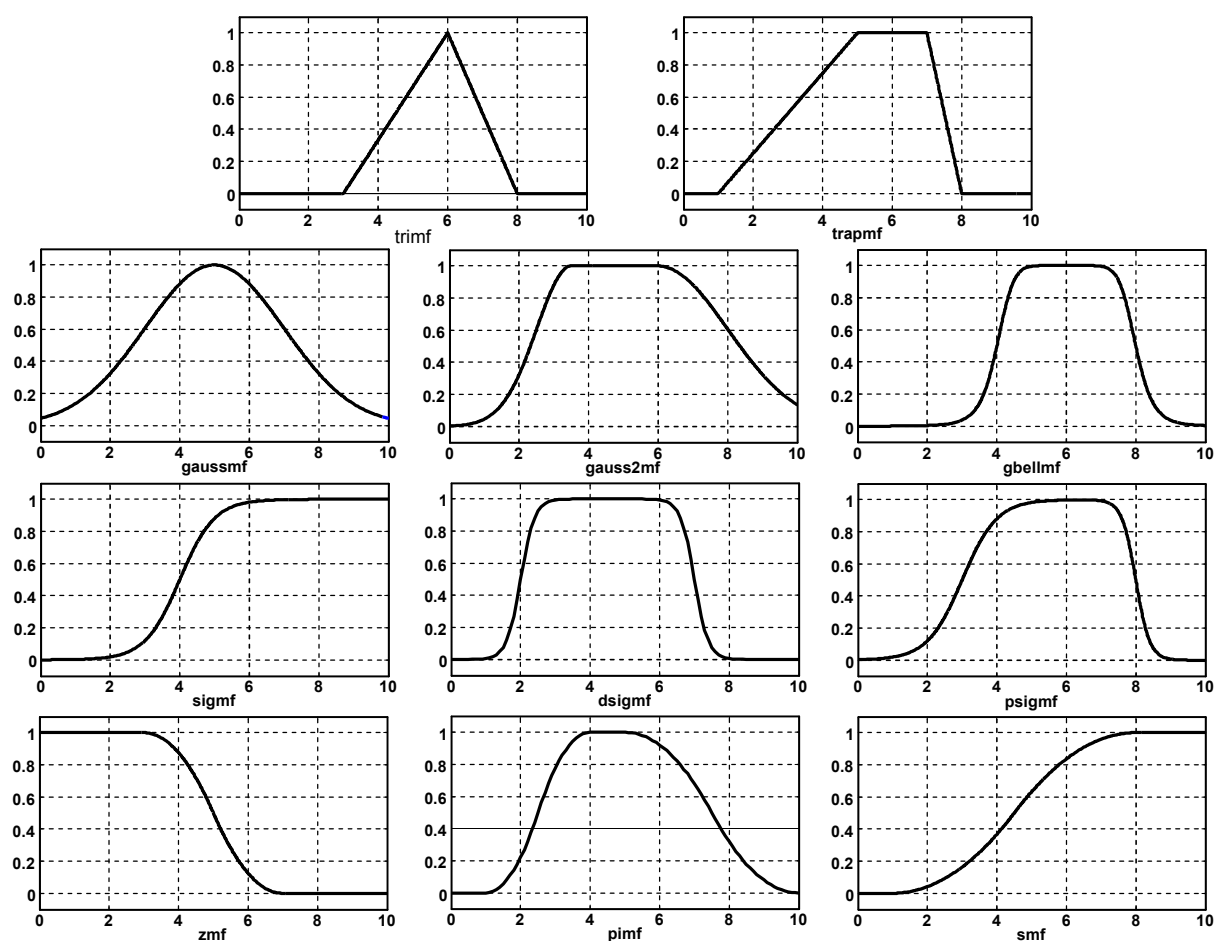


Рисунок А.1 – Типові функції приналежності нечітких множин

ДОДАТОК Б

ОПЕРАЦІЙНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Б.1 Логічні операції та правила комбінування нечітких множин

Основні логічні операції, які можливі з нечіткими множинами, наступні.

Включення. Хай A і B – нечіткі множини на універсальній множині E .

Говорять, що A міститься в B , якщо $\forall x \in E \quad \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$.

Позначення: $A \subset B$.

Іноді використовують термін *домінування*, тобто у разі, коли говорять, що B домінує A .

Рівність. A і B рівні, якщо $\forall x \in E \quad \mu_A(x) = \mu_B(x)$.

Позначення: $A = B$.

Доповнення. Хай $M = [0, 1]$, A і B – нечіткі множини, задані на E . A і B доповнюють один одного, якщо $\forall x \in E \quad \mu_A(x) = 1 - \mu_B(x)$

Позначення: $B = \bar{A}$ або $A = \bar{B}$.

Очевидно, що $\bar{\bar{A}} = A$ (доповнення визначене для $M = [0, 1]$, але очевидно, що його можна визначити для будь-якого впорядкованого M).

Перетин. $A \cap B$ – найбільша нечітка підмножина, що міститься одночасно в A і B :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$$

Об'єднання. $A \cup B$ – найменша нечітка підмножина, що включає як A , так і B , з функцією приналежності:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$$

Різниця. $A - B = A \cap \bar{B}$ з функцією приналежності:

$$\mu_{A-B}(x) = \mu_{A \cap \bar{B}}(x) = \min(\mu_A(x), 1 - \mu_B(x))$$

Диз'юнктивна сума $A \oplus B = (A - B) \cup (B - A) = (A \cap \bar{B}) \cup (\bar{A} \cap B)$ з функцією приналежності:

$$\mu_{A-B}(x) = \max(\min(\mu_A(x), 1 - \mu_B(x)); \min(1 - \mu_A(x), \mu_B(x)))$$

Приклади. Нехай

$$A = 0,4/x_1 + 0,2/x_2 + 0/x_3 + 1/x_4,$$

$$B = 0,7/x_1 + 0,9/x_2 + 0,1/x_3 + 1/x_4,$$

$$C = 0,1/x_1 + 1/x_2 + 0,2/x_3 + 0,9/x_4.$$

Тут:

$A \subset B$, тобто A міститься в B або B домінує A . C незрівняне ні з A , ні з B , тобто пари $\{A, C\}$ і $\{B, C\}$ – пари недомініруємих нечітких множин.

- 1) $A \neq B \neq C$.
- 2) $\bar{A} = 0,6/x_1 + 0,8/x_2 + 1/x_3 + 0/x_4$; $\bar{B} = 0,3/x_1 + 0,1/x_2 + 0,9/x_3 + 0/x_4$.
- 3) $A \cap B = 0,4/x_1 + 0,2/x_2 + 0/x_3 + 1/x_4$.
- 4) $B \cup A = 0,7/x_1 + 0,9/x_2 + 0,1/x_3 + 1/x_4$.
- 5) $A - B = A \cap \bar{B} = 0,5/x_1 + 0,1/x_2 + 0/x_3 + 0/x_4$.
- 6) $B - A = \bar{A} \cap B = 0,6/x_1 + 0,8/x_2 + 0,1/x_3 + 0/x_4$.
- 7) $A \oplus B = 0,6/x_1 + 0,8/x_2 + 0,1/x_3 + 0/x_4$.

На відміну від чітких множин, для нечітких множин в загальному випадку:

$$A \cap \bar{A} \neq 0, \quad A \cup \bar{A} \neq E,$$

(що, зокрема, проілюстровано вище в прикладі наочного представлення нечітких множин).

Для нечітких множин можна будувати візуальне уявлення. Розглянемо прямокутну систему координат, на осі ординат якої відкладаються значення, а на осі абсцис в довільному порядку розташовані елементи E . Якщо E за своєю природою впорядковано, то цей порядок бажано зберегти в розташуванні елементів на осі абсцис. Таке уявлення робить наочними прості логічні операції над нечіткими множинами (рис. Б.1).

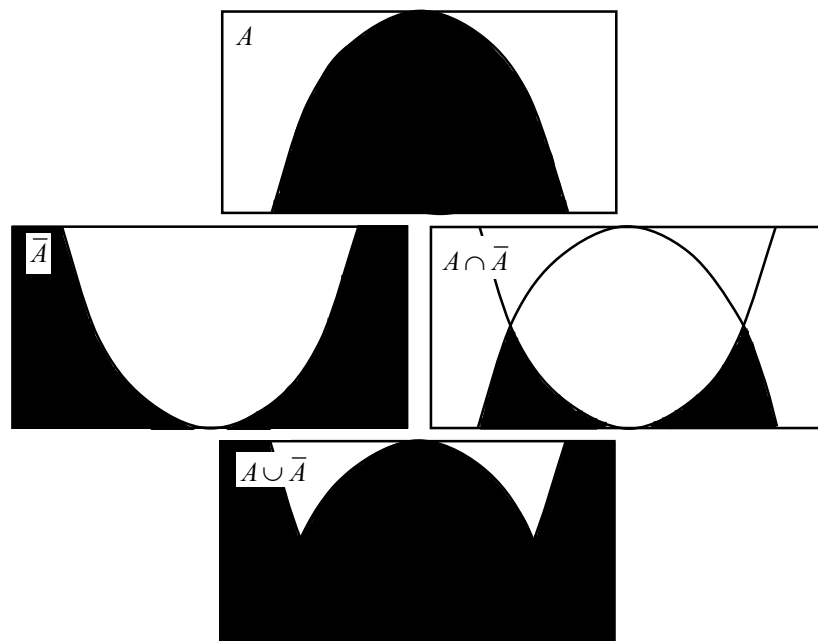


Рисунок Б.1 – Графічна інтерпретація логічних операцій

У верхній частині рисунка заштрихована область відповідає нечіткій множині A і, якщо говорити точно, зображає область значень A і всіх нечітких множин, що містяться в A . У нижній частині рисунка показані $\bar{A}$, $A \cap \bar{A}$, $A \cup \bar{A}$.

Введені вище операції над нечіткими множинами засновані на використанні операцій $\max$ і $\min$. У теорії нечітких множин розробляються питання побудови узагальнених операторів перетину, об'єднання і доповнення, що дозволяють врахувати різноманітні смислові відтінки відповідних ним зв'язок, що параметризуються, «І», «АБО», «НЕ».

Один з підходів до операторів перетину і об'єднання полягає в їх визначенні в класі *трикутних норм і конорм*.

Трикутною нормою (*T-нормою*) називається двомісна дійсна функція $T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, що задовольняє наступним умовам:

- 1) $T(0,0) = 0$; $T(\mu_A, 1) = \mu_A$; $T(1, \mu_A) = \mu_A$ – обмеженість;
- 2) $T(\mu_A, \mu_B) \leq T(\mu_C, \mu_D)$, *если* $\mu_A \leq \mu_C, \mu_B \leq \mu_D$ – монотонність;
- 3) $T(\mu_A, \mu_B) = T(\mu_B, \mu_A)$ – комутативність;
- 4) $T(\mu_A, T(\mu_B, \mu_C)) = T(T(\mu_A, \mu_B), \mu_C)$ – асоціативність.

Простим випадком трикутних норм є:

- $\min(\mu_A, \mu_B)$;
- добуток $\mu_A \cdot \mu_B$;
- $\max(0, \mu_A + \mu_B - 1)$.

Трикутною конормою (*T-конормою*) називається двомісна дійсна функція, з властивостями:

- 1) $S(1, 1) = 1$; $S(\mu_A, 0) = \mu_A$; $S(0, \mu_A) = \mu_A$ – обмеженість;
- 2) $S(\mu_A, \mu_B) \geq S(\mu_C, \mu_D)$, *если* $\mu_A \geq \mu_C, \mu_B \geq \mu_D$ – монотонність;
- 3) $S(\mu_A, \mu_B) = S(\mu_B, \mu_A)$ – комутативна;
- 4) $S(\mu_A, S(\mu_B, \mu_C)) = S(S(\mu_A, \mu_B), \mu_C)$ – асоціативність;

Приклади *T* - конорм:

- $\max(\mu_A, \mu_B)$;
- $\mu_A + \mu_B - \mu_A \cdot \mu_B$;
- $\min(1, \mu_A + \mu_B)$.

Б.2 Алгебраїчні операції та їх застосування у формальних моделях нечіткості

Алгебраїчний добуток A і B позначається $A \cdot B$ і визначається так:

$$\forall x \in E \quad \mu_{A \cdot B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x).$$

Алгебраїчна сума цих множин позначається $A + B$ і визначається так:

$$\forall x \in E \quad \mu_{A+B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x)$$

Для операцій $\{\cdot, +\}$ виконуються властивості:

- 1) $\left. \begin{array}{l} A \cdot B = B \cdot A \\ A \hat{+} B = B \hat{+} A \end{array} \right\} - \text{комутативність},$
- 2) $\left. \begin{array}{l} (A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C) \\ (A \hat{+} B) \hat{+} C = A \hat{+} (B \hat{+} C) \end{array} \right\} - \text{асоціативність},$
- 3) $A \cdot \emptyset = \emptyset, A \hat{+} \emptyset = A, A \cdot E = A, A \hat{+} E = E,$
- 4) $\left. \begin{array}{l} \overline{A \cdot B} = \bar{A} \hat{+} \bar{B} \\ \overline{A \hat{+} B} = \bar{A} \cdot \bar{B} \end{array} \right\} - \text{теореми де Моргана}.$

Не виконуються:

- 1) $\left. \begin{array}{l} A \cdot A = A \\ A \hat{+} A = A \end{array} \right\} - \text{ідемпотентність},$
- 2) $\left. \begin{array}{l} A \cdot (B \hat{+} C) = (A \cdot B) \hat{+} (A \cdot C) \\ A \hat{+} (B \cdot C) = (A \hat{+} B) \cdot (A \hat{+} C) \end{array} \right\} - \text{дистрибутивність},$
- 3) а також $A \cdot \bar{A} = \emptyset, A \hat{+} \bar{A} = E.$

При сумісному використанні операцій $\{\cup, \cap, \hat{+}, \cdot\}$ виконуються властивості:

$$1) A \cdot (B \cup C) = (A \cdot B) \cup (A \cdot C),$$

$$2) A \cdot (B \cap C) = (A \cdot B) \cap (A \cdot C),$$

$$3) A \hat{+} (B \cup C) = (A \hat{+} B) \cup (A \hat{+} C),$$

$$4) A \hat{+} (B \cap C) = (A \hat{+} B) \cap (A \hat{+} C).$$

На основі операції алгебраїчного добутку визначається *операція піднесення до ступеня α нечіткої множини A* , де α – позитивне число. Нечітка множина A^α визначається функцією приналежності $\mu_A^\alpha = \mu_A^\alpha(x)$. Окремим випадком піднесення до ступеня є:

$$1) \text{CON}(A) = A^2 \text{ – операція концентрації (ущільнення),}$$

$$2) \text{DIL}(A) = A^{0.5} \text{ – операція розтягування}$$

які використовуються при роботі з лінгвістичними невизначеностями.

Множення на число. Якщо α – позитивне число, таке, що $\alpha \max_{x \in A} \mu_A(x) \leq 1$, то нечітка множина αA має функцію приналежності:

$$\mu_{\alpha A}(x) = \alpha \mu_A(x).$$

Опукла комбінація нечітких множин. Хай $A_1, A_2, \dots, A_n$ – нечіткі множини універсальної множини E , а $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ – ненегативні числа, сума яких рівна 1.

Опуклою комбінацією $A_1, A_2, \dots, A_n$ називається нечітка множина A з функцією приналежності:

$$\forall x \in E \quad \mu_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \omega_1 \mu_{A_1}(x) + \omega_2 \mu_{A_2}(x) + \dots + \omega_n \mu_{A_n}(x).$$

Декартовий (прямий) добуток нечітких множин. Хай $A_1, A_2, \dots, A_n$ – нечіткі підмножини універсальних множин $E_1, E_2, \dots, E_n$ відповідно. Декартовий, або прямий добуток $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$ є нечіткою підмножиною множини $E = E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$ з функцією приналежності:

$$\mu_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)).$$

Оператор збільшення нечіткості використовується для перетворення чітких множин в нечіткі і для збільшення нечіткості нечіткої множини.

Хай A – нечітка множина, E – універсальна множина і для всіх $x \in E$ визначені нечіткі множини $K(x)$. Сукупність всіх $K(x)$ називається ядром оператора збільшення нечіткості Φ . Результатом дії оператора Φ на нечітку множину A є нечітка множина вигляду

$$\Phi(A, K) = \bigcup_{x \in E} \mu_A(x) K(x),$$

де $\mu_A(x)K(x)$ – добуток числа на нечітку множину.

Приклад. Нехай

$$E = \{1, 2, 3, 4\};$$

$$A = 0,8/1 + 0,6/2 + 0/3 + 0/4;$$

$$K(1) = 1/1 + 0,4/2; K(2) = 1/2 + 0,4/1 + 0,4/3;$$

$$K(3) = 1/3 + 0,5/4; K(4) = 1/4.$$

Тоді

$$\begin{aligned} \Phi(A, K) &= \mu_A(1)K(1) \cup \mu_A(2)K(2) \cup \mu_A(3)K(3) \cup \mu_A(4)K(4) = \\ &= 0,8(1/1 + 0,4/2) \cup 0,6(1/2 + 0,4/1 + 0,4/3) = \\ &= 0,8/1 + 0,6/2 + 0,24/3. \end{aligned}$$

Чітка множина α – рівня (або рівня α). Множиною α -рівня нечіткої множини A універсальної множини E називається чітка підмножина A_α універсальної множини E , визначуваної у вигляді

$$A_\alpha = \{x / \mu_A(x) \geq \alpha\},$$

де $\alpha \leq 1$.

ДОДАТОК В

НЕЧІТКІ ВІДНОШЕННЯ: ПОНЯТТЯ, ФОРМИ ПОДАННЯ ТА ОПЕРАЦІЇ

В.1 Методи визначення і формалізації нечітких відношень

Нехай $E = E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$ – прямий добуток універсальних множин і M – деяка множина приналежностей (наприклад $M = [0, 1]$). Нечітке n -арне відношення визначається як нечітка підмножина R на E , що приймає свої значення в M . У випадку $n=2$ і $M = [0, 1]$ нечітким відношенням R між множинами $X = E_1$ і $Y = E_2$ називатиметься функція $R: (X, Y) \rightarrow [0, 1]$, яка ставить у відповідність кожній парі елементів $(x, y) \in X \times Y$ величину $\mu_R(x, y) \in [0, 1]$.

Позначення: нечітке відношення на $X \times Y$ запишеться у вигляді

$$x \in X, y \in Y: xRy.$$

У разі, коли $X = Y$, тобто X і Y співпадають, нечітке відношення $R: X \times X \rightarrow [0, 1]$ називається нечітким відношенням на множині X .

Приклади.

1) Хай $X = \{x_1, x_2, x_3\}$, $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$, $M = [0, 1]$. Нечітке відношення $R = XRY$ може бути задане, наприклад, табл. В.1.

Таблиця В.1 – Завдання нечіткого відношення

	y_1	y_2	y_3	y_4
x_1	0	0	0,1	0,3
x_2	0	0,8	1	0,7
x_3	1	0,5	0,6	1

2) Хай $X = Y = (-\infty, \infty)$ тобто множина всіх дійсних чисел. Відношення $x \gg y$ (x багато більше y) можна задати функцією приналежності:

$$\mu_A = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x \leq y, \\ \frac{1}{1 + (1 / (x - y)^2)} & \text{якщо } x > y. \end{cases}$$

3) Відношення R , для якого $\mu_R(x, y) = e^{-k(x-y)^2}$, при достатньо великих k можна інтерпретувати так: « x і y близькі один до одного числа».

В.2 Основні операції над нечіткими відношеннями та їх властивості

Об'єднання двох відношень R_1 і R_2 . Об'єднання двох відношень позначається $R_1 \cup R_2$ і визначається виразом

$$\mu_{R_1 \cup R_2}(x, y) = \mu_{R_1}(x, y) \vee \mu_{R_2}(x, y).$$

Перетин двох відношень. Перетин двох відношень R_1 і R_2 позначається $R_1 \cap R_2$ і визначається виразом

$$\mu_{R_1 \cap R_2}(x, y) = \mu_{R_1}(x, y) \wedge \mu_{R_2}(x, y).$$

Алгебраїчний добуток двох відношень. Алгебраїчний добуток двох відношень R_1 і R_2 позначається $R_1 \cdot R_2$ і визначається виразом

$$\mu_{R_1 \cdot R_2}(x, y) = \mu_{R_1}(x, y) \cdot \mu_{R_2}(x, y).$$

Алгебраїчна сума двох відношень. Алгебраїчна сума двох відношень R_1 і R_2 позначається $R_1 + R_2$ і визначається виразом

$$\mu_{R_1 + R_2}(x, y) = \mu_{R_1}(x, y) + \mu_{R_2}(x, y) - \mu_{R_1}(x, y) \cdot \mu_{R_2}(x, y).$$

Для введених операцій справедливі наступні властивості дистрибутивності:

$$R_1 \cap (R_2 \cup R_3) = (R_1 \cap R_2) \cup (R_1 \cap R_3),$$

$$R_1 \cup ((R_2 \cap R_3)) = (R_1 \cup R_2) \cap (R_1 \cup R_3),$$

$$R_1 \cdot (R_2 \cup R_3) = (R_1 \cdot R_2) \cup (R_1 \cdot R_3),$$

$$R_1 \cdot (R_2 \cap R_3) = (R_1 \cdot R_2) \cap (R_1 \cdot R_3),$$

$$R_1 + (R_2 \cup R_3) = (R_1 + R_2) \cup (R_1 + R_3),$$

$$R_1 + (R_2 \cap R_3) = (R_1 + R_2) \cap (R_1 + R_3).$$

Доповнення відношення. Доповнення відношення R позначається $\bar{R}$ і визначається функцією приналежності:

$$\mu_{\bar{R}}(x, y) = 1 - \mu_R(x, y).$$

Диз'юнктивна сума двох відношень. Диз'юнктивна сума двох відносин R_1 і R_2 позначається $R_1 \oplus R_2$ і визначається виразом

$$R_1 \oplus R_2 = (R_1 \cap \bar{R}_2) \cup (\bar{R}_1 \cap R_2).$$

Звичайне відношення, найближче до нечіткого. Хай R – нечітке відношення з функцією приналежності $\mu_R(x, y)$. Звичайне відношення, найближче до нечіткого, позначається $\underline{R}$ і визначається виразом

$$\mu_{\underline{R}}(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \mu_R(x, y) < 0,5, \\ 1, & \text{якщо } \mu_R(x, y) > 0,5, \\ 0 \text{ або } 1, & \text{якщо } \mu_R(x, y) = 0,5 \end{cases}$$

За домовленістю приймають $\mu_{\underline{R}}(x, y) = 0$ при $\mu_R(x, y) = 0,5$.

Композиція (згортка) двох нечітких відношень. Хай R_1 – нечітке відношення $R_1: (X \times Y) \rightarrow [0, 1]$ між X і Y , і R_2 – нечітке відношення $R_2:$

$(X \times Z) \rightarrow [0, 1]$ між Y і Z . Нечітке відношення між X і Z , що позначається R_2 $\circ R_1$, визначене через R_2 і R_1 , виразом

$$\mu(x, z) = V_y(\mu_{R_2}(x, y) \wedge \mu_{R_1}(y, z)),$$

називається (max-min) – композицією ((max-min)-згортокою) відношень R_1 і R_2 .

Приклад. Хай

R_1	y_1	y_2	y_3
x_1	0,1	0,7	0,4
x_2	1	0,5	0

R_2	z_1	z_2	z_3	z_4
y_1	0,9	0	1	0,2
y_2	0,3	0,6	0	0,9
y_3	0,1	1	0	0,5

Тоді

$R_2 \circ R_1$	z_1	z_2	z_3	z_4
x_1	0,3	0,6	0,1	0,7
x_2	0,9	0,5	1	0,5

При цьому

$$\begin{aligned} \mu_{R_1 \circ R_2}(x_1 \cdot z_1) &= (\mu_{R_1}(x_1 \cdot y_1) \wedge \mu_{R_2}(y_1 \cdot z_1)) \vee \\ &\vee (\mu_{R_1}(x_1, y_2) \wedge \mu_{R_2}(y_2, z_1)) \vee (\mu_{R_1}(x_1, y_3) \wedge \mu_{R_2}(y_3, z_1)) = \\ &= (0,1 \wedge 0,9) \vee (0,7 \wedge 0,3) \vee (0,4 \wedge 0,1) = 0,1 \vee 0,3 \vee 0,1 = 0,3 \end{aligned}$$

Зауваження. У даному прикладі спочатку використаний «аналітичний» спосіб композиції відношень R_1 і R_2 , тобто i -й рядок R_1 «умножається» на j -й стовпець R_2 з використанням операції $\wedge$, отриманий результат «згортається» з використанням операції $\vee$ в $\mu(x_i, z_j)$.

Властивості (max-min)-композиції. Операція (max-min) – композиції асоціативна, тобто

$$R_3 \circ (R_2 \circ R_1) = (R_3 \circ R_2) \circ R_1,$$

дистрибутивна щодо об'єднання, але недистрибутивна щодо перетину:

$$R_3 \circ (R_2 \cup R_1) = (R_3 \circ R_2) \cup (R_3 \circ R_1),$$

$$R_3 \circ (R_2 \cap R_1) \neq (R_3 \circ R_2) \cap (R_3 \circ R_1).$$

Крім того, для (max-min) – композиції виконується наступна важлива властивість: якщо, то $R \circ R_1 \subset R \circ R_2$. max-композиція. У виразі

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = V_y(\mu_{R_1}(x, y) \wedge \mu_{R_2}(y, z))$$

для (max-min)-композиції відношень R_1 і R_2 операцію $\wedge$ можна замінити будь-якою іншою, для якої виконуються ті ж обмеження, що і для $\wedge$: асоціативність і монотонність (у сенсі неубування) по кожному аргументу. Тоді

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = V_y(\mu_{R_1}(x, y) * \mu_{R_2}(y, z)).$$

Зокрема, операція $\wedge$ може бути замінена алгебраїчним добутком, тоді говорять про (max-prod)-композицію.

ДОДАТОК Г

ТЕОРІЯ І МЕТОДИ ПОБУДОВИ НЕЧІТКИХ ВИСНОВКІВ

Г.1 Поетапне формування нечіткого висновку у системах логічного управління

Використовуваний в різного роду експертних управляючих системах механізм нечітких висновків в своїй основі має базу знань, що формується фахівцями предметної області у вигляді сукупності нечітких предикативних правил вигляду:

P_1 : якщо $x \in A_1$, тоді $y \in B_1$

P_2 : якщо $x \in A_2$, тоді $y \in B_2$

.....

P_n : якщо $x \in A_n$, тоді $y \in B_n$

де x – вхідна змінна (ім'я для відомих значень даних), y – змінна висновку (ім'я для значення даних, яке буде обчислено); A_i і B_i – нечіткі множини, визначені відповідно на X і Y .

Приклад подібного правила.

Якщо x – «низьке», то y – «високе».

Приведемо детальніше пояснення. Знання експерта $A \rightarrow B$ відображає нечітке причинне відношення передумови і висновку, тому його можна назвати нечітким відношенням і позначити через R :

$$R = A \rightarrow B,$$

де « $\rightarrow$ » називається нечіткою імплікацією.

Відношення R можна розглядати як нечітка підмножина прямого добутку $X \times Y$ повної множині передумов X і висновків Y . Таким чином, процес

отримання (нечіткого) результату висновку B' з використанням даного спостереження A' і знання $A \rightarrow B$ можна представити у вигляді формули

$$B' = A' \bullet R = A' \bullet (A \rightarrow B),$$

де « $\bullet$ » – введена вище операція згортки.

Як операцію композиції, так і операцію імплікації в алгебрі нечітких множин можна реалізовувати по-різному (при цьому, природно, різнитиметься і підсумковий отримуваний результат), але у будь-якому випадку загальний логічний висновок здійснюється за наступні чотири етапи.

1. *Нечіткість* (введення нечіткості, фазифікація, *fuzzification*). Функції приналежності, визначені на вхідних змінних застосовуються до їх фактичних значень для визначення ступеня істинності кожної передумови кожного правила.

2. *Логічний висновок*. Обчислене значення істинності для передумов кожного правила застосовується до висновків кожного правила. Це приводить до однієї нечіткої підмножини, яка буде призначена кожній змінній висновку для кожного правила. Як правила логічного висновку зазвичай використовуються тільки операції *min* (МІНІМУМ) або *prod* (МНОЖЕННЯ). У логічному виведенні МІНІМУМУ функція приналежності висновку «відсікається» по висоті, відповідному обчисленому ступеню істинності передумови правила (нечітка логіка «І»). У логічному виведенні МНОЖЕННЯ функція приналежності висновку масштабується за допомогою обчисленого ступеня істинності передумови правила.

3. *Композиція*. Всі нечіткі підмножини, призначені до кожної змінної висновку (у всіх правилах), об'єднуються разом, щоб формувати одну нечітку підмножину для кожної змінної висновку. При подібному об'єднанні зазвичай використовуються операції *max* (МАКСИМУМ) або *sum* (СУМА). При композиції МАКСИМУМУ комбіноване виведення нечіткої підмножини конструюється як поточечний максимум по всіх нечітких підмножинах (нечітка логіка «АБО»). При композиції СУМИ комбіноване виведення нечіткої підмножини конструю-

ється як поточечна сума по всіх нечітких підмножинах, призначених змінною висновку правилами логічного висновку.

4. На закінчення (додатково) – *приведення до чіткості (дефазифікація, defuzzification)*, яке використовується, коли необхідно перетворити нечіткий набір висновків в чітке число. Є велика кількість методів приведення до чіткості, деякі з яких розглянуті нижче.

Структурна схема нечіткої системи представлена на рис.Г.1.

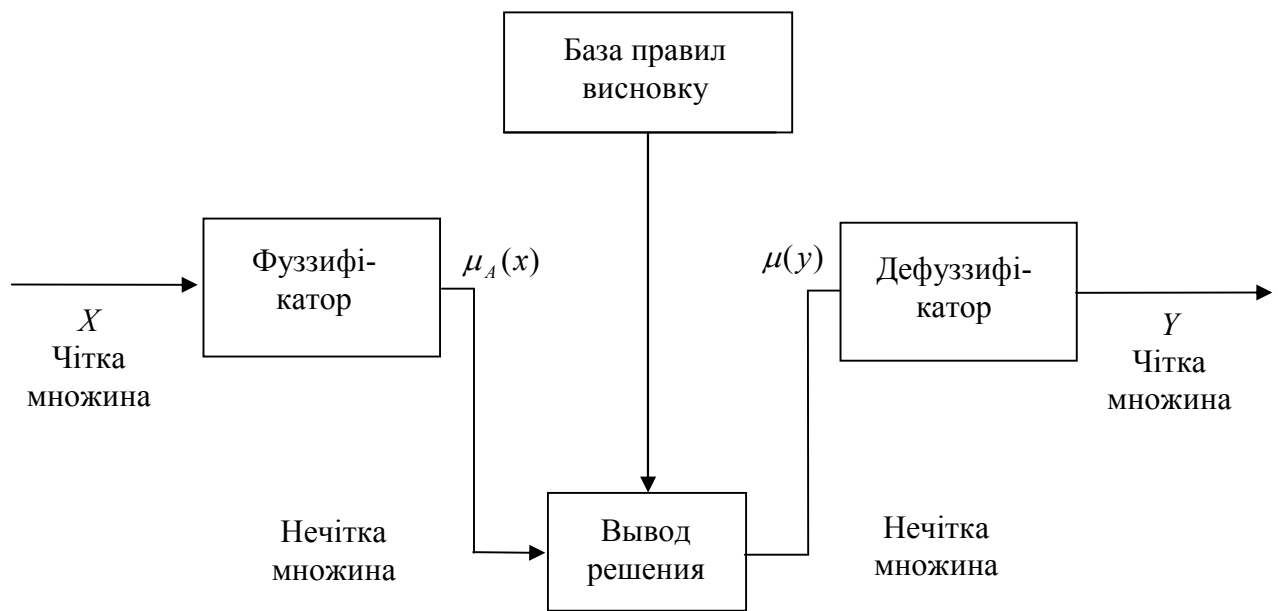


Рисунок Г.1 – Структура нечіткої системи з фузифікатором і дефузифікатором

Узагальнена функціональна структура системи, приведена на рис.Г.1, може бути представлена в розширеній формі, яка явному вигляді демонструє правила нечіткого висновку так, як це зображено на рис. Г.2. Оскільки допускається застосування множини нечіткі правил, в ній також передбачений блок агрегації, що найчастіше реалізовується у вигляді логічного суматора (оператор Max). Описувана система висновку називається системою Мамдані-Заді. Вона дуже популярна в звичайних (неадаптивних) нечітких системах.

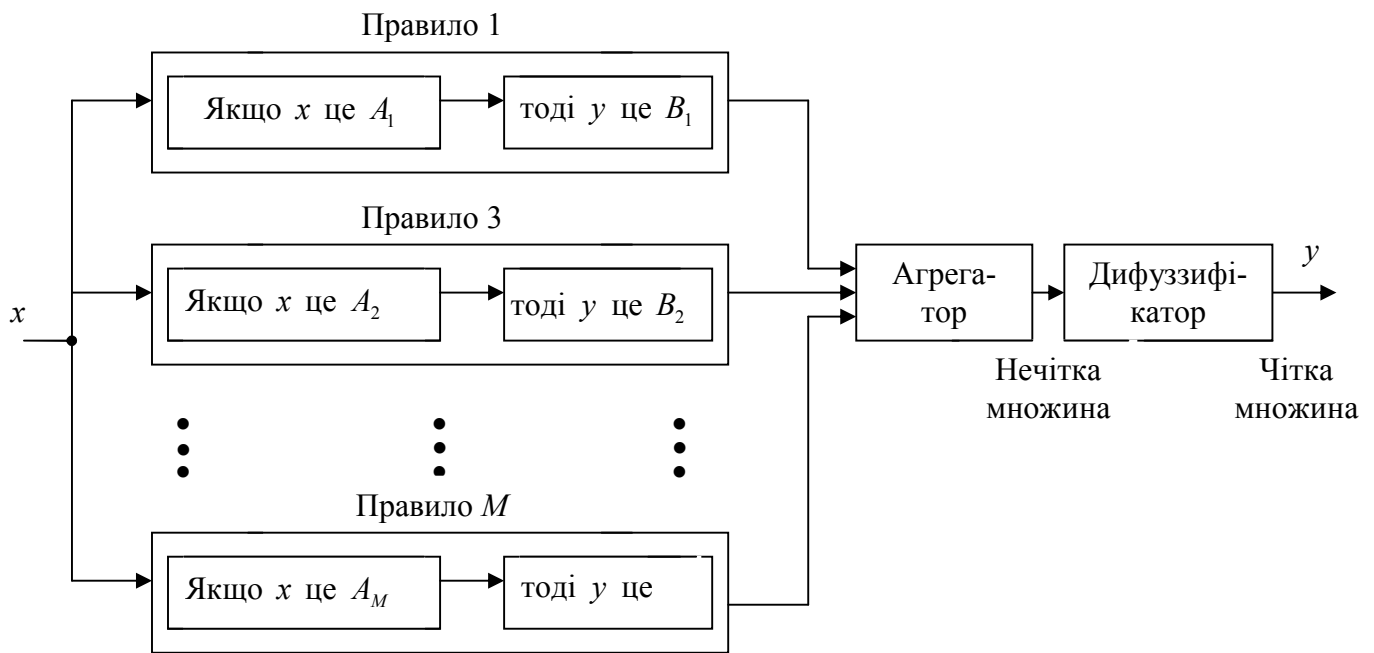


Рисунок Г.2 – Організація висновку в нечіткій системі при наявності M правил висновку

Приклад. Нехай деяка система описується наступними нечіткими правилами:

P_1 : якщо $x \in A$, тоді $w \in D$,

P_2 : якщо $y \in B$, тоді $w \in E$,

P_3 : якщо $z \in C$, тоді $w \in F$,

де x , y і z – імена вхідних змінних, w – ім'я змінної висновку, а A , B , C , D , E , F – деякі нечіткі числа (нечіткі множини, визначені на множині дійсних чисел) з функціями приналежності відповідно μ_A , μ_B , μ_C , μ_D , μ_E , μ_F .

Процедура отримання логічного висновку ілюструється рис. Г.3.

Передбачається, що вхідні змінні прийняли деякі конкретні (чіткі) значення – x_0 , y_0 і z_0

Відповідно до приведених етапів, на етапі 1 для даних значень і виходячи з функцій приналежності A , B і C , знаходяться ступені істинності $\alpha(x_0)$, $\alpha(y_0)$ і $\alpha(z_0)$ для передумов кожного з трьох приведених правил (диГ. рис.Г.3).

На етапі 2 відбувається «відсікання» функцій приналежності висновків правив (тобто μ_D , μ_E , μ_F) на рівнях $\alpha(x_0)$, $\alpha(y_0)$ і $\alpha(z_0)$.

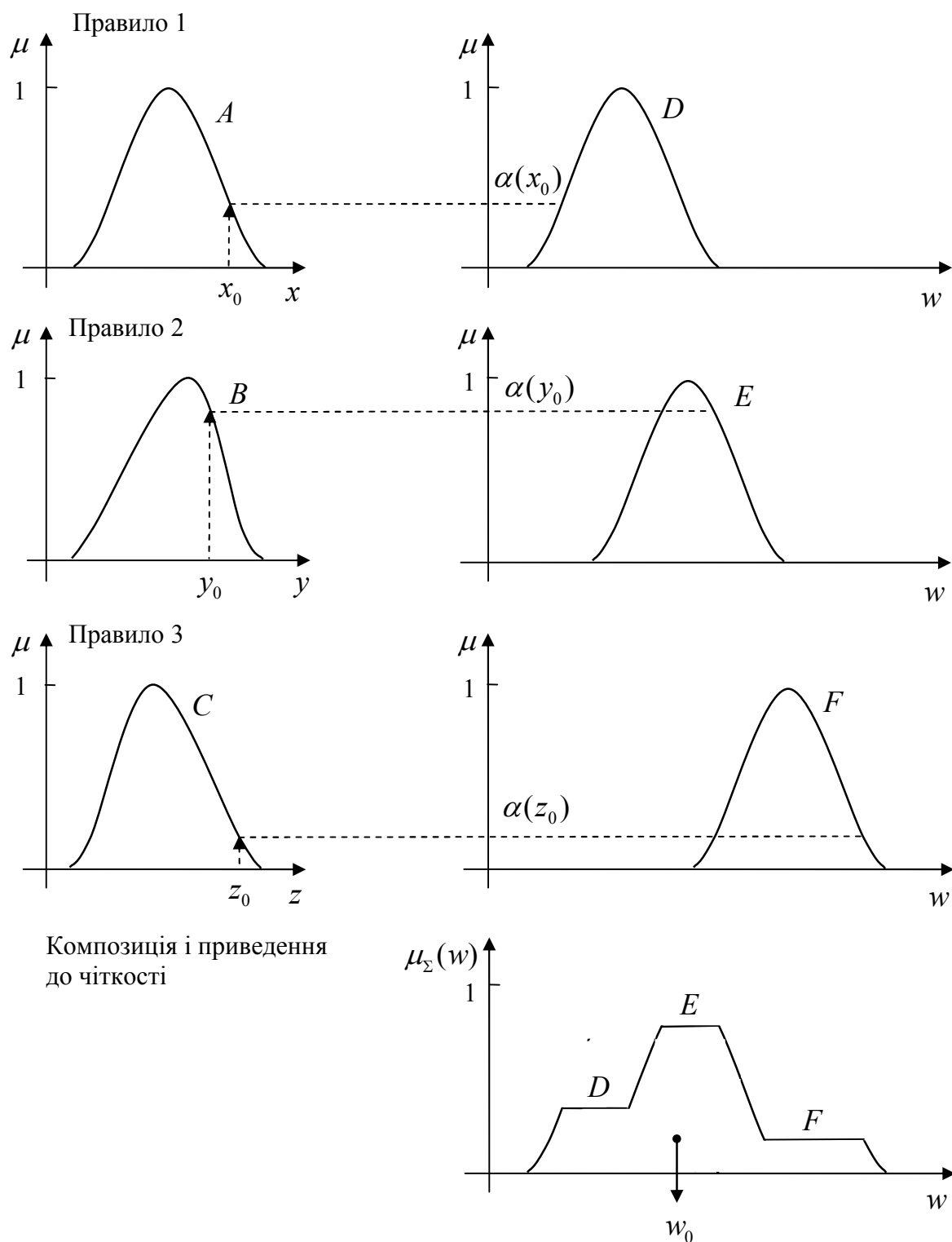


Рисунок Г.3 – Ілюстрація до процедури логічного висновку

На етапі 3 розглядаються усічені на другому етапі функції приналежності і проводиться їх об'єднання з використанням операції $\max$, внаслідок чого виходить комбінована нечітка підмножина, що описується функцією приналежності $\mu_{\Sigma}(w)$ і відповідна логічному висновку для вихідний змінної w .

Нарешті, на 4-му етапі (при необхідності) знаходиться чітке значення вихідний змінної, наприклад, із застосуванням центроїдного методу: чітке значення вихідний змінної визначається як центр тяжіння для кривої $\mu_{\Sigma}(w)$, тобто

$$w_0 = \frac{\int_{\Omega} w \mu_{\Sigma}(w) dw}{\int_{\Omega} \mu_{\Sigma}(w) dw}.$$

Тут Ω – область визначення $\mu_{\Sigma}(w)$.

Розглянемо наступні найбільш часто використовувані модифікації алгоритму нечіткого висновку, вважаючи, для простоти, що базу знань організовують два нечітких правила вигляду:

P_1 : якщо $x \in A_1$ і $y \in B_1$, тоді $z \in C_1$,

P_2 : якщо $x \in A_2$ і $y \in B_2$, тоді $z \in C_2$,

де x і y – імена вхідних змінних;

z – ім'я змінної висновку;

$A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ – деякі нечіткі множини, задані функціями приналежності $\mu_{A_1}, \mu_{A_2}, \mu_{B_1}, \mu_{B_2}, \mu_{C_1}, \mu_{C_2}$, при цьому чітке значення z_0 необхідно визначити на основі приведеної інформації і чітких значень x_0 і y_0 .

Г.2 Класичний алгоритм Mamdani та його особливості

Одним з найбільш поширених алгоритмів нечіткого висновку є *алгоритм Мамдані* (Mamdani.). Даний алгоритм відповідає розглянутому прикладу і рис.Г.3. У даній ситуації він математично може бути описаний таким чином.

1. Нечіткість: знаходяться ступені істинності для передумов кожного правила: $\mu_{A_1}(x_0)$, $\mu_{A_2}(x_0)$, $\mu_{B_1}(y_0)$, $\mu_{B_2}(y_0)$.

2. Нечіткий висновок: знаходяться рівні «відсічення» для передумов кожного з правил (з використанням операції МІНІМУМ)

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0),$$

$$\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0),$$

де через « $\wedge$ » позначена операція логічного мінімуму (min), потім знаходяться «усічені» функції приналежності

$$\mu_{C_1}(z) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(z)),$$

$$\mu_{C_2}(z) = (\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(z)),$$

3. Композиція: з використання операції МАКСИМУМ (max, що далі позначається як « $\vee$ ») проводиться об'єднання знайдених усічених функцій, що приводить до отримання підсумкової нечіткої підмножини для змінній виходу з функцією приналежності

$$\mu_{\Sigma}(z) = \mu_C(z) = \mu_{C_1}(z) \vee \mu_{C_2}(z) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(z)) \vee (\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(z)).$$

4. Нарешті, приведення до чіткості (для знаходження z_0) проводиться, наприклад, центроїдним методом.

Г.3 Алгоритм формування висновків у моделі Цукамото

Початкові посилки – як у попереднього алгоритму, але в даному випадку передбачається, що функції $\mu_{C_1}(z)$, $\mu_{C_2}(z)$ є монотонними.

1. Перший етап – такий же, як в алгоритмі Mamdani.

2. На другому етапі спочатку знаходяться (як в алгоритмі Mamdani) рівні «відсікання» z_1 і z_2 , а потім – за допомогою рішення рівнянь

$$\alpha_1 = \mu_{C_1}(z_1), \quad \alpha_2 = \mu_{C_2}(z_2)$$

чіткі значення (z_1 і z_2) для кожного з вихідних правил.

3. Визначається чітке значення змінної висновку (як зважене середнє z_1 і z_2):

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2}{\alpha_1 + \alpha_2};$$

у загальному випадку (дискретний варіант центроїдного методу)

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}.$$

Приклад. Нехай маємо $\mu_{A_1}(x_0) = 0,7$, $\mu_{A_2}(x_0) = 0,6$, $\mu_{B_1}(y_0) = 0,3$, $\mu_{B_2}(y_0) = 0,8$, відповідні рівні відсікання

$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)) = \min(0,7; 0,3) = 0,3,$$

$$\alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0)) = \min(0,6; 0,8) = 0,6$$

і значення $z_1 = 8$ і $z_2 = 4$, знайдені в результаті рішення рівнянь

$$\mu_{C_1}(z_1) = 0,3, \quad \mu_{C_2}(z_2) = 0,6,$$

При цьому чітке значення змінної висновку (див. рис. Г.4)

$$z_0 = (8 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,6) / (0,3 + 0,6) = 6.$$

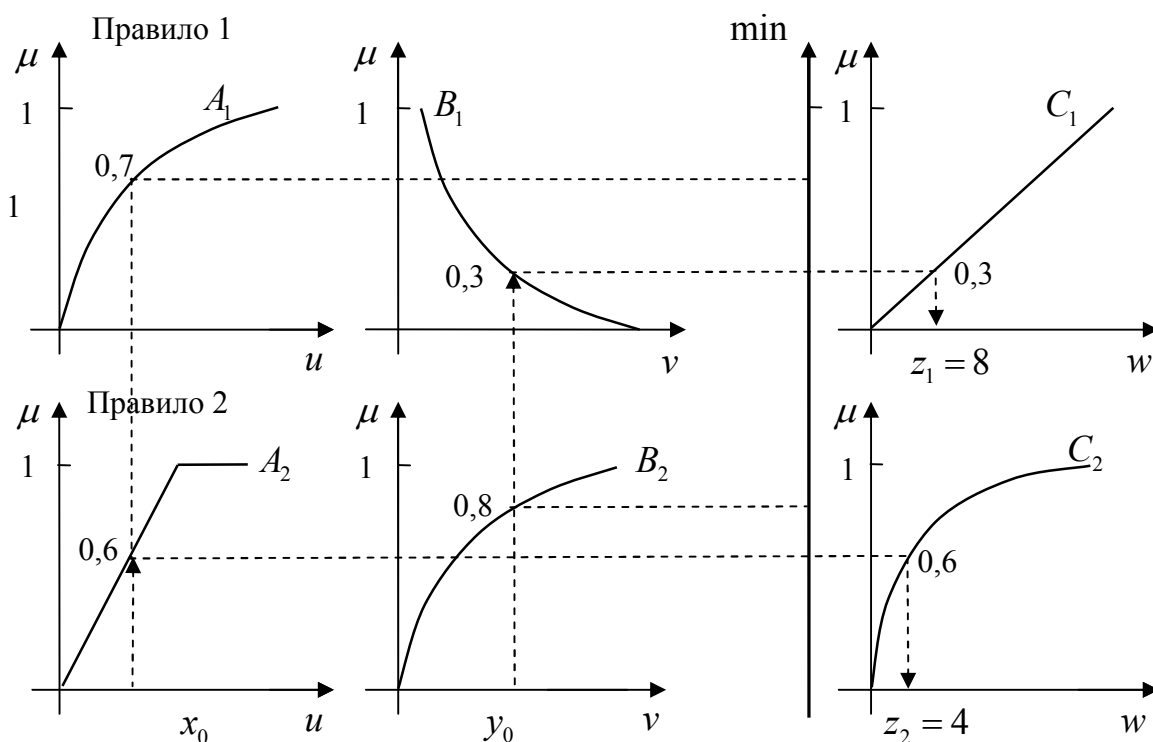


Рисунок Г.4 – Ілюстрації до алгоритму Tsukamoto

Г.4 Методика нечіткого висновку за схемою Сугено

Sugeno і Takagi використовували набір правил в наступній формі (як і раніше, приводиться приклад двох правил):

P_1 : якщо $x \in A_1$ і $y \in B_1$, тоді $z_1 = \alpha_1 x + b_1 y$,

P_2 : якщо $x \in A_2$ і $y \in B_2$, тоді $z_2 = \alpha_2 x + b_2 y$.

Представлення алгоритму.

1. Перший етап – як в алгоритмі Mamdani.
2. На другому етапі знаходяться, $\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$ і індивідуальні виходи правил:

$$z_1^* = \alpha_1 x_0 + b_1 y_0,$$

$$z_2^* = \alpha_2 x_0 + b_2 y_0.$$

3. На третьому етапі визначається чітке значення змінної висновку:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

Ілюструє алгоритм рис. Г.5.

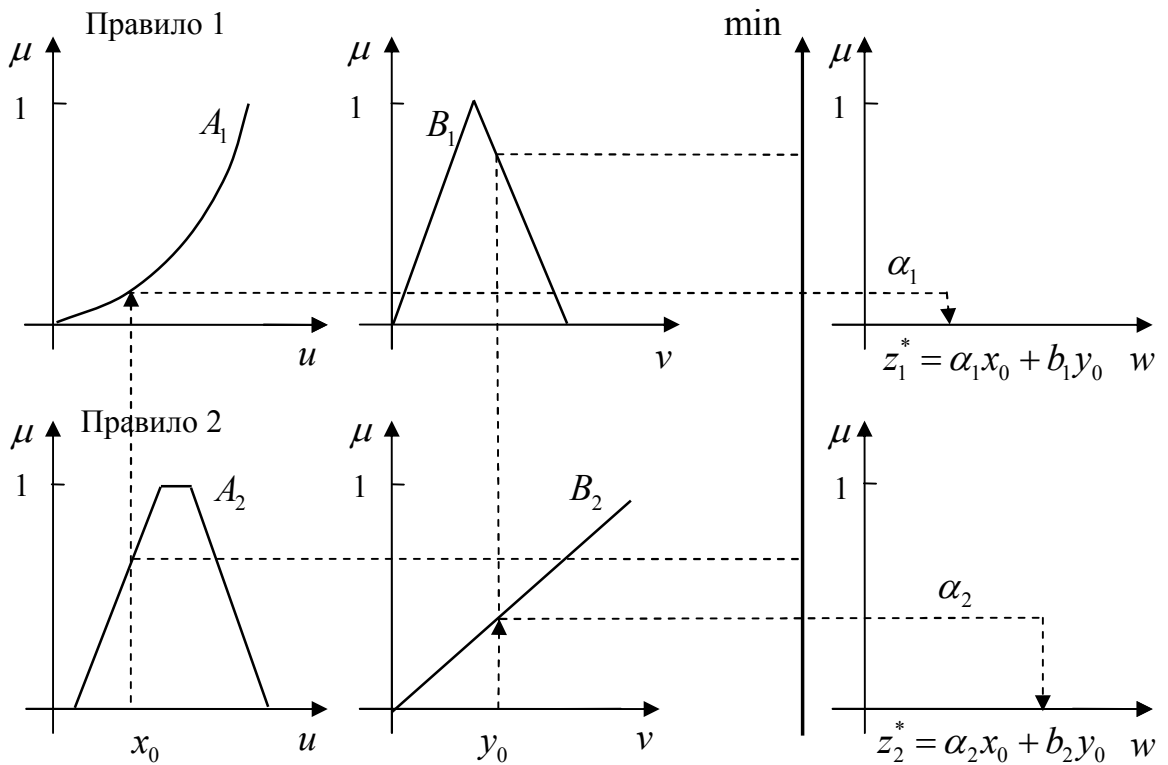


Рисунок Г.5 – Ілюстрація до алгоритму Sugeno

Г.5 Алгоритм нечіткої інференції Ларсена

У алгоритмі Larsen нечітка імплікація моделюється з використанням оператора множення.

Опис алгоритму.

1. Перший етап – як в алгоритмі Mamdani.
2. На другому етапі, як в алгоритмі Mamdani спочатку знаходяться значення

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0),$$

$$\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0),$$

а потім – часткові нечіткі підмножини

$$\alpha_1 \mu_{C_1}(z), \quad \alpha_2 \mu_{C_2}(z)$$

3. Знаходиться підсумкова нечітка підмножина з функцією приналежності.

$$\mu_{\Sigma}(z) = \mu_C(z) = (\alpha_1 \mu_{C_1}(z)) \vee (\alpha_2 \mu_{C_2}(z))$$

(у загальному випадку n правил $\mu_{\Sigma}(z) = \mu_C(z) = \bigvee_{i=1}^n (\alpha_i \mu_{C_i}(z))$).

4. При необхідності проводиться приведення до чіткості (як в раніше розглянутих алгоритмах).

Алгоритм Larsen ілюструється рис. Г.6.

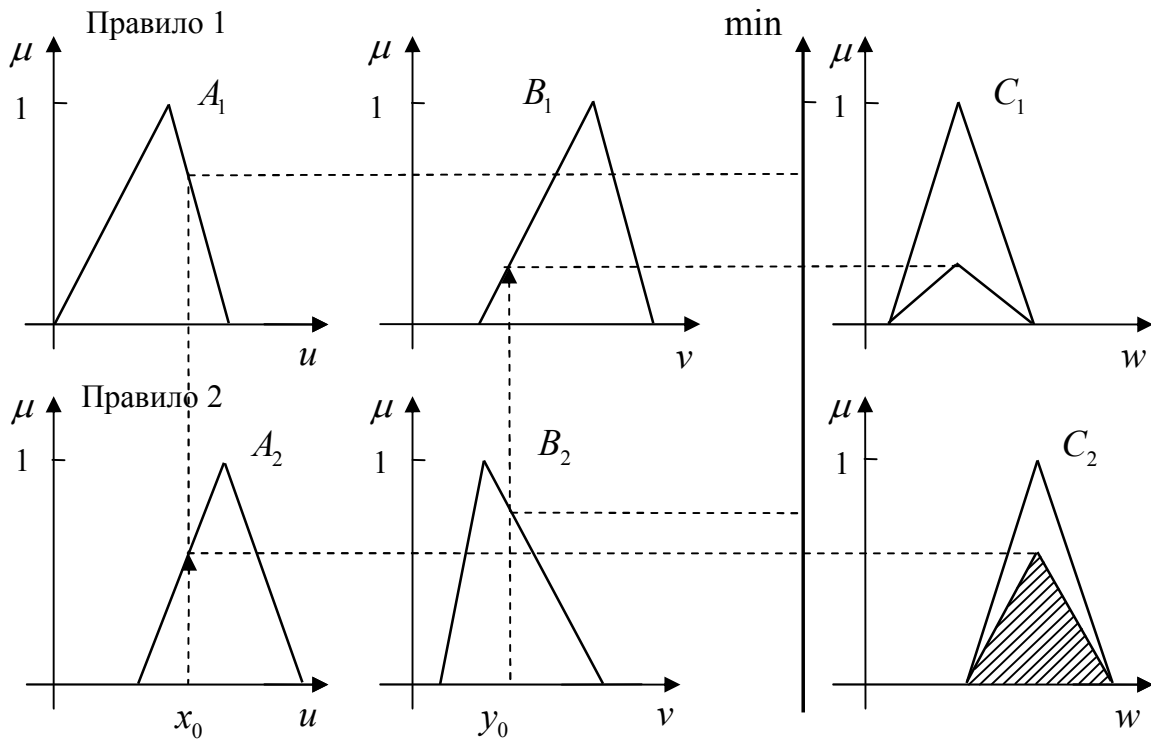


Рисунок Г.6 – Ілюстрація алгоритму Larsen

Г.6 Модифіковані та спрощені підходи до побудови нечітких висновків

Початкові правила в даному випадку задаються у вигляді:

Π_1 : якщо $x \in A_1$ і $y \in B_1$, тоді $z_1 = c_1$,

P_2 : якщо $x \in A_2$ і $y \in B_1$, тоді $z_2 = c_2$,
де c_1 і c_2 – деякі звичайні (чіткі) числа.

Опис алгоритму

1. Перший етап – як в алгоритмі Mamdani.
2. На другому етапі знаходяться числа $\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0)$,
 $\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$.

3. На третьому етапі знаходиться чітке значення вихідний змінної по формулі

$$z_0 = \frac{\alpha_1 c_1 + \alpha_2 c_2}{\alpha_1 + \alpha_2},$$

або – в загальному випадку наявності n правил – по формулі

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i c_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}.$$

Ілюстрація алгоритму приведена на рис. Г.7.

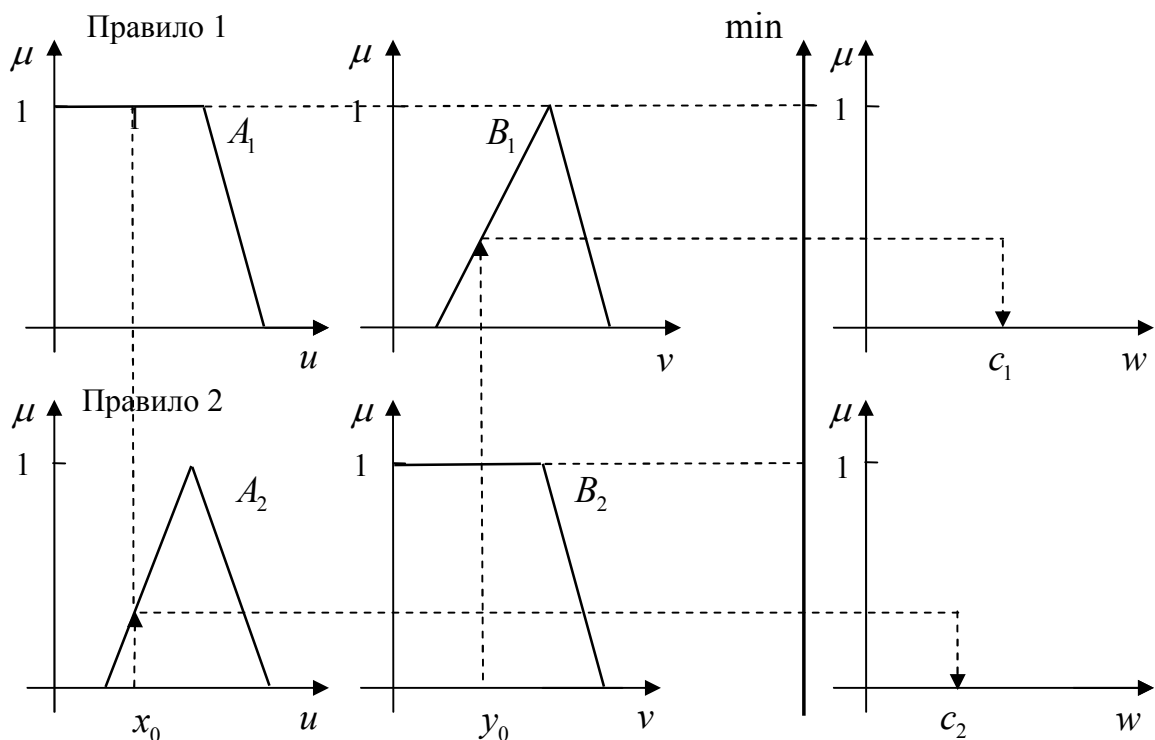


Рисунок Г.7 – Ілюстрація спрощеного алгоритму нечіткого висновку

Г.7 Техніки дефазифікації та переходу від нечітких результатів до чітких значень

1. Вище вже був розглянутий один з даних методів – центроїдний. Приведемо відповідні формули ще раз. Для безперервного варіанту:

$$z_0 = \frac{\int_{\Omega} z \mu_{\Sigma}(z) dz}{\int_{\Omega} \mu_{\Sigma}(z) dz},$$

для дискретного варіанту:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{\Sigma}(z_i) z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{\Sigma}(z_i)}.$$

2. Перший максимум (First-of-Maxima). Чітка величина змінної висновку знаходиться як найменше значення, при якому досягається максимум підсумкової нечіткої множини, тобто (див. рис. Г.8 а)

$$z_0 = \min(z \mid \mu_{\Sigma}(z) = \max_z \mu_{\Sigma}(z)).$$

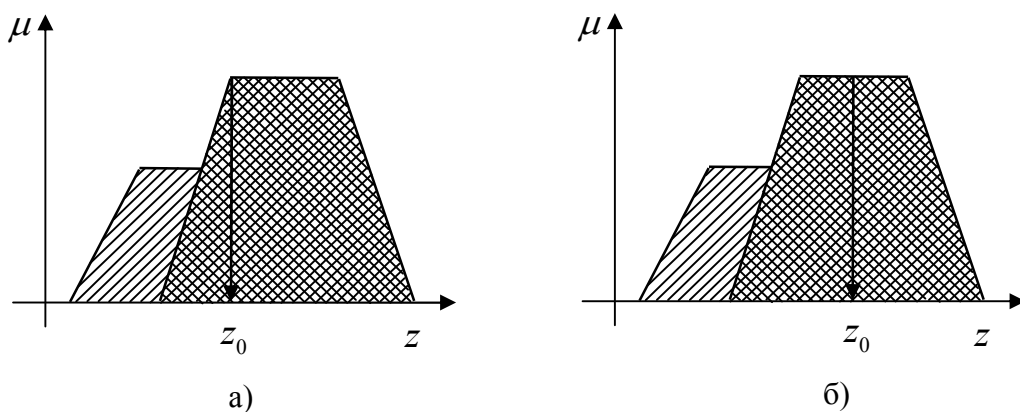


Рисунок Г.8 – Ілюстрація до методів приведення до чіткості:

а – перший максимум; б – середній максимум

3. Середній максимум (Middle-of-Maxima). Чітке значення знаходиться по формулі

$$z_0 = \frac{\int z dz}{\int_G dz},$$

де G – підмножина елементів, що максимізували μ_Σ (диГ. рис. Г.8 б).

Дискретний варіант (якщо μ_Σ – дискретне):

$$z_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_j.$$

4. Критерій максимуму (Max-Criterion). Чітке значення вибирається довільно серед безлічі елементів, що доставляють максимум, тобто

$$z_0 \in \{z \mid \mu_\Sigma(z) = \max_z \mu_\Sigma(z)\}.$$

5. Висотна дефазифікація (Height defuzzification). Елементи області значення, для яких значення функції приналежності менше, ніж деякий рівень α в розрахунок не приймаються, і чітке значення розраховується по формулі

$$z_0 = \frac{\int_{C_\alpha} z \mu_\Sigma(z) dz}{\int_{C_\alpha} \mu_\Sigma(z) dz},$$

де C_α – нечітка множина α – рівня (див. вище).

ДОДАТОК Д

ФАЙЛ ПОЧАТКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ

```
clear;clc;echo on;

% Система управління електроприводом
% механізму підйому шахтної підйимальної установки
% Система ТП-Д, двохмасова
% 2025 рік

% Вихідні дані
ktp=67;
Tm=0.005;
Tms=2*Tm;
Re=0.044;
Te=0.07;
CF=206;
kdc=0.0045;
kdv=8.28;
In=2130;
Mn=In*CF;
Jd=469700;
Jm=140400;
Js=Jd+Jm;
w0=3;
c12=(w0^2)*(Jd*Jm)/(Jd+Jm);
b12=0.01*c12;
Uz=24;

kic=Re/(2*Tm*kdc*ktp);
kpc=kic*Te;
kiv=(kdc*Js)/(32*Tm^2*CF*kdv);
kpv=8*Tm*kiv;

% Матриці
A=[-b12/Jm 1/Jm b12/Jm zeros(1,4);
-c12 0 c12 zeros(1,4);
b12/Jd -1/Jd -b12/Jd CF/Jd zeros(1,3);
0 0 -CF/(Re*Te) -1/Te 1/(Re*Te) 0 0;
0 0 (-kpv*kpc*ktp*kdv)/Tm -(kdc*kpc*ktp)/Tm -1/Tm ktp/Tm
ktp*kpc/Tm;
0 0 -kdv*kpv*kic -kic*kdc 0 0 kic;
0 0 -kdv*kiv zeros(1,4)]
B=[0 -1/Jm;
zeros(3,2);
(kpv*kpc*ktp)/Tm 0;
kpv*kic 0;
kiv 0]
C=zeros(6,7);
C(1,1)=1;C(2,2)=1;C(3,3)=1;C(4,4)=1;C(5,6)=1;C(6,7)=1;
D=zeros(6,2);
```