

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

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ Г-Д МЕХАНІЗМУ
ПІДЙОМУ ШАХТНОЇ ПІДЙІМАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ
З ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРОМ
(тема кваліфікаційної роботи)

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

_____ / Костянтин СІМОНОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Тетяна ВАСИЛЕЦЬ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Анатолій ТАРАСЕНКО
(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) _____ Костянтин СИМОНОВ _____
(ім'я, прізвище)

1. Тема роботи Система управління електроприводом Г-Д механізму підйому шахтної підйомальної установки з фаззі-регулятором
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 Вантажопідйомальна здатність установки $Q_{\Pi}=14,8 \cdot 10^3$ кг; продуктивність $A=600$ т/год; висота піднімання $H=580$ м; маса порожнього скипа $m_{\text{ск}}=9,8 \cdot 10^3$ кг; діаметр підйомного барабана $D_{\text{б}}=5$ м; довжина етапу потягування $S_{\text{дот}}=2$ м; швидкість дотягування $V_{\text{дот}}=0,5$ м/с; питома лінійна маса каната $m_{1\text{к}}=11,6$ кг; тривалість паузи між циклами $t_{\Pi}=1$ с. Допустиме перерегулювання швидкості під час ступінчастого впливу не повинно перевищувати 20%, а час виходу системи на встановлений режим має бути не довшим за 10 с.
4. Зміст роботи (перелік питань, що їх належить розробити). Обґрунтувати доцільність використання нечітких апроксимуючих систем для керування багатомасовою електромеханічною системою підйомного механізму шахтної підйомальної установки. Виконати розрахунок системи автоматичного регулювання координат електроприводу та дослідити її динамічні властивості. Побудувати математичну модель двомасової системи, провести її комп'ютерне моделювання й проаналізувати якість перехідних процесів змінних стану. Розробити структурну схему нечіткого контуру керування, а також здійснити синтез Fuzzy-регулятора на ЕОМ із використанням пакета Fuzzy Logic Toolbox у середовищі MATLAB. Провести аналіз отриманих результатів моделювання системи з Fuzzy-керуванням.
5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал) 1. Формальні характеристики магістрської 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 трьохмасової динамічної системи. 8. Аналіз перехідних процесів у трьохмасовій 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 магістрської роботи

6. Консультант:

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

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

Керівник

(підпис)

Тетяна ВАСИЛЕЦЬ

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Костянтин СІМОНОВ

(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 вико- нання за- вдань
1	Аналіз та обґрунтування можливості використан- ня нечітких апроксимувальних систем для керу- вання багатомасовою електромеханічною систе- мою підйомного механізму шахтної установки.	09.09.2025- 18.09.2025	
2	Розрахунок системи підлеглого регулювання ко- ординат електроприводу та оптимізація контурів керування за модульним і симетричним критеріа- ми. Проведення комп'ютерного моделювання сис- теми.	19.09.2025- 15.10.2025	
3	Аналіз роботи системи з урахуванням пружних характеристик підйимального каната. Побудова математичної моделі двомасової системи та її мо- делювання 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 кон- туру.	06.11.2025- 25.11.2025	
5	Підготовка та оформлення завершеної магістерсь- кої роботи.	26.11.2025- 05.12.2025	

Студент (ка)

(підпис)

Костянтин СІМОНОВ

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з: 156 сторінок, 43 рисунків, 2 таблиці, 64 використаних джерела, 3 додатки.

Головна мета проведеної роботи полягає у створенні та теоретичному обґрунтуванні комплексу методів синтезу системи керування електроприводом підйомного механізму шахтної підйимальної установки, зорієнтованих на суттєве покращення динамічної якості функціонування електромеханічної системи. Для цього використано сучасні концепції інтелектуального керування, зокрема принципи побудови регуляторів на основі нечіткої логіки (Fuzzy-регуляторів).

У роботі послідовно реалізовано розрахунковий підхід, що спирається на базові та прикладні положення класичної і сучасної теорії автоматичного керування. Це дало можливість визначити параметри системи керування для заданого технологічного об'єкта. Паралельно застосовано методи математичного моделювання, за допомогою яких побудовано узагальнену модель функціонування багатомасової електромеханічної структури. Використовуючи апарат теорії нечітких множин та алгоритмізацію процесів нечіткого висновку, було здійснено синтез Fuzzy-регулятора для керування трьохмасовою системою, що адекватно враховує особливості взаємодії елементів підйомного комплексу.

Комп'ютерне моделювання, виконане в середовищі MATLAB із залученням пакету прикладних засобів Fuzzy Logic Toolbox, дало можливість провести всебічне дослідження динамічних процесів в нечіткій системі керування та встановити характер її реакції на різні режими роботи та зовнішні впливи.

У результаті виконання роботи сформовано науково обґрунтовані висновки щодо доцільності та ефективності використання систем з нечіткими апроксимувальними властивостями для керування складними багатомасовими електромеханічними об'єктами шахтового підйому. Розроблено варіант системи керування координатами електроприводу, що реалізує нові підходи до формування керуючих сигналів. Отримано та проаналізовано параметри автоматизованої

системи регулювання та виконано її моделювання на електронних обчислювальних машинах.

Створено математичний опис тримасової системи з урахуванням пружно-інерційних властивостей підйимального каната, а також визначено її динамічні характеристики у перехідних режимах. Розроблено структурну організацію нечіткого контуру керування та сформовано Fuzzy-регулятор у MATLAB шляхом практичного застосування інструментальних засобів Fuzzy Logic Toolbox.

Проведене комп'ютерне моделювання системи керування із залученням нечіткого регулятора засвідчило, що синтезована структура характеризується високим рівнем стабільності, чіткістю відпрацювання керуючих впливів та покращеними якісними показниками перехідних процесів, що підтверджує її перспективність для реального застосування.

Основні наукові напрацювання магістерської роботи впроваджено в освітній процес кафедри АМЕТ ННІ «УІПА» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Матеріали використовуються під час проведення лекційних занять, практичних робіт і при підготовці студентів у галузі автоматизації та електромеханічних систем.

Окремі положення роботи та здобуті наукові результати пройшли апробацію на щорічній науково-практичній конференції студентів ННІ «УІПА» (Харків, 2025 р.).

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

ABSTRACT

An explanatory message consists of: 156 pages, 43 figures, 2 tables, 64 used sources, 3 additions

The main goal of the work is to create and theoretically substantiate a set of methods for synthesizing the control system of the electric drive of the lifting mechanism of a mine hoisting installation, aimed at significantly improving the dynamic quality of the functioning of the electromechanical system. For this purpose, modern concepts of intelligent control were used, in particular, the principles of constructing controllers based on fuzzy logic (Fuzzy controllers).

The work consistently implemented a computational approach based on the basic and applied provisions of the classical and modern theory of automatic control. This made it possible to determine the parameters of the control system for a given technological object. In parallel, mathematical modeling methods were applied, with the help of which a generalized model of the functioning of a multi-mass electromechanical structure was built. Using the apparatus of the theory of fuzzy sets and algorithmization of fuzzy inference processes, a Fuzzy controller was synthesized for controlling a three-mass system, which adequately takes into account the peculiarities of the interaction of the elements of the lifting complex.

Computer modeling performed in the MATLAB environment with the use of the Fuzzy Logic Toolbox application package made it possible to conduct a comprehensive study of dynamic processes in a fuzzy control system and establish the nature of its response to various operating modes and external influences.

As a result of the work, scientifically substantiated conclusions were formed regarding the feasibility and effectiveness of using systems with fuzzy approximating properties to control complex multi-mass electromechanical objects of mine hoisting. A variant of the electric drive coordinate control system was developed, which implements new approaches to the formation of control signals. The parameters of the automated control system were obtained and analyzed and its modeling was performed on electronic computers.

A mathematical description of a three-mass system was created taking into

account the elastic-inertial properties of the hoisting rope, and its dynamic characteristics in transient modes were also determined. The structural organization of the fuzzy control loop was developed and a Fuzzy controller was formed in MATLAB through the practical application of the Fuzzy Logic Toolbox tools.

Computer modeling of the control system using a fuzzy controller showed that the synthesized structure is characterized by a high level of stability, clarity of control effects and improved qualitative indicators of transient processes, which confirms its prospects for real application.

The main scientific developments of the master's thesis were implemented in the educational process of the AMET Department of the Research Institute "UIPA" of the V.N. Karazin Kharkiv National University. The materials are used during lectures, practical work and in the training of students in the field of automation and electromechanical systems.

Individual provisions of the work and the obtained scientific results were tested at the annual scientific and practical conference of students of the Research Institute "UIPA" (Kharkiv, 2025).

Keywords: FUZZY SET THEORY, FUZZY INDUCTION METHODS, MINE HOISTING INSTALLATION, ELECTRIC DRIVE OF THE LIFTING MECHANISM, AUTOMATED CONTROL SYSTEM, SINGLE-MASS AND THREE-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	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	18
1.1 Історичні передумови, сучасний стан та тенденції розвитку концепції нечітких множин і механізмів нечіткої логіки	18
1.2 Чинники, що визначають результативність і доцільність використання нечіткого висновку в задачах керування технічними системами.....	21
1.3 Загальні принципи побудови та організаційні особливості структур нечіткого керування.....	22
1.4 Основні вимоги до системи автоматизованого керування електроприводом підйомного обладнання шахтних установок.....	25
1.5 Формулювання наукової проблеми та постановка завдання с интезу нечіткої системи керування електроприводом механізму підйому шахтної підйомальної машини	29
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	32
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДЛЕГЛОГО РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	34
2.1 Технічні параметри та експлуатаційні характеристики шахтної підйомальної установки. Вимоги до системи керування.....	34
2.2 Вибір структури та типу електроприводу для реалізації підйомного процесу на шахтній установці	35
2.3 Алгоритм розрахунку та побудова швидкісної характеристики шахтного підйомника	38
2.4 Вибір електричного двигуна відповідно до необхідної потужності та режимів роботи.....	45
2.5 Обчислення параметрів силової частини електроприводу.....	48

2.6 Функціональна схема автоматизованої системи керування електроприводом шахтного підйомника	53
2.7 Синтез послідовного корегуючого пристрою контуру напруги	56
2.8 Синтез послідовного коригуючого пристрою струмового контуру	59
2.9 Синтез послідовного коригуючого пристрою контуру регулювання швидкості.....	63
2.10 Аналіз перехідних процесів та оцінка динамічних показників роботи системи	66
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	73
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДЙОМНОГО КАНАТА	75
3.1 Побудова математичної моделі двомасової системи	75
3.2 Розрахунок та дослідження перехідних процесів двомасової системи	86
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	96
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ	98
4.1. Процедура нечіткого моделювання та реалізація алгоритмів у середовищі MATLAB	103
4.2. Побудова, налаштування і дослідження багатомасової системи управління з використанням Fuzzy-регулятора	100
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	123
ВИСНОВКИ.....	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	127
ДОДАТОК А. ТЕОРЕТИКО-МАТЕМАТИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ	133
А.1 Формальне означення нечіткої множини та її базові характеристики.....	133
А.2 Операційні перетворення нечітких множин.....	135

А.3 Кількісні індикатори та метрики для оцінювання рівня нечіткості	138
А.4 Співвідношення між нечіткою невизначеністю та ймовірнісними моделями.....	140
АА.5 Принципи побудови нечітких продукційних правил і механізми логічного виведення.....	141
ДОДАТОК Б. АЛГОРИТМИ ТА СТРУКТУРИ СИСТЕМ	
НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ	144
Б.1 Класична архітектура систем Мамдані–Заде.....	144
Б.2 Модель Мамдані–Заде як узагальнений інструмент апроксимації складних залежностей.....	153
Б.3 Концепція та математичний апарат систем Такагі–Сугено–Канга.....	155
ДОДАТОК Д. ФАЙЛ ПОЧАТКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ	158

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку техніки і промислових технологій супроводжується суттєвим ускладненням вимог до систем автоматизованого управління. Від цих систем очікують не лише високої точності та швидкодії, а й здатності стабільно функціонувати в умовах змінних режимів роботи та невизначеності параметрів об'єкта керування. У зв'язку з цим наукова спільнота активно шукає нові теоретичні та інженерно-технічні підходи, які б дозволили істотно підвищити ефективність класичних систем регулювання.

За останні десятиліття значного поширення набули адаптивні та робастні стратегії керування. Їх застосування забезпечує працездатність систем, у яких динамічні характеристики змінюються під впливом зовнішніх умов або внутрішніх силових факторів. Адаптивні методи орієнтовані на динамічне переналаштування регулятора за результатами оцінки параметрів об'єкта, що є невідомими чи такими, що змінюються. Робастні ж підходи передбачають створення регуляторів із фіксованими властивостями, які гарантують стійкість системи при відомих межах варіацій параметрів.

Попри значний прогрес, слід визнати, що універсального підходу, який би забезпечував ідеальне керування для нелінійних, складних та некерованих у класичний спосіб систем, дотепер не існує. Це створює потребу у використанні альтернативних інтелектуальних методів.

Одним із таких перспективних напрямів став розвиток і впровадження теорії нечітких множин, уперше запропонованої Лотфі Заде. Ця теорія дозволила здійснити перехід від суворо формалізованих математичних моделей до моделей, здатних оперувати невизначеною, приблизною та якісною інформацією – тобто такою, якою звичайно оперує людина під час прийняття рішень. Подальші дослідження Л. Заде та його послідовників сформували теоретичний фундамент для практичного застосування нечітких систем управління в інженерії, що відображено у значній кількості наукових праць [1–18].

Нечіткі системи управління сьогодні розглядаються як один із найефективніших інструментів у галузі автоматизації складних технічних процесів. Вони особливо цінні у випадках, коли математичний опис об'єкта або неможливо отримати з достатньою точністю, або він виявляється занадто громіздким для використання у традиційних системах регулювання. Нечіткі методи знаходять застосування в найрізноманітніших галузях – від промислових робіт і доменного виробництва до побутової техніки, транспортних систем та інтелектуальних технологій розпізнавання зображень та мови.

Значуща перевага нечіткого управління полягає у його здатності імітувати логіку людського мислення, спираючись на якісні ознаки, експертні оцінки та лінгвістичні припущення. Це дозволяє будувати моделі, що відображають реальні процеси не гірше, а інколи – навіть точніше, ніж традиційні математичні моделі. Застосування таких систем у техніці забезпечує підвищення стійкості, зменшення енергетичних і ресурсних витрат, а також поліпшення керованості об'єктів, що функціонують у нестабільних умовах.

У контексті шахтних підймальних установок проблема побудови високо-ефективних систем управління є особливо актуальною. Електромеханічні системи цього типу мають складну багатомасову структуру з вираженими пружними ланками, що суттєво ускладнює їх математичний опис і традиційний синтез систем керування. Використання нечіткої логіки відкриває можливість створення регуляторів, здатних компенсувати нелінійність, інерційність та пружність системи, забезпечуючи при цьому високу якість керування.

З огляду на це, розробка нечіткої системи управління електроприводом механізму підйому шахтної підйальної установки є важливою науково-технічною задачею, що визначає актуальність даної роботи.

Мета роботи та завдання дослідження

Метою дослідження є синтез нечіткої системи керування багатомасовою електромеханічною системою підйомного механізму шахтної підйальної установки, здатної забезпечити високі показники якості регулювання з урахуванням пружних властивостей канату.

Для реалізації поставленої мети необхідно розв'язати такі ключові завдання:

1. Провести ґрунтовний аналіз чинників, що визначають ефективність використання нечітких систем у задачах управління складними технічними об'єктами.
2. Розробити систему підлеглого (ієрархічного) регулювання координат електроприводу механізму підйому шахтної підйимальної установки.
3. Побудувати математичну модель трьохмасової електромеханічної системи з урахуванням пружності канату.
4. Виконати синтез fuzzy-регулятора, здатного забезпечити задані показники якості для багатомасової системи.
5. Провести комп'ютерне моделювання нечіткої системи, оцінити її ефективність і порівняти результати з традиційними методами керування.

Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єкт дослідження – динамічні процеси в системі управління електроприводом механізму підйому шахтної підйимальної установки з урахуванням пружних властивостей канату.

Предмет дослідження – математичні моделі та методи синтезу нечіткої системи управління трьохмасовою електромеханічною системою підйомного механізму.

Методи дослідження. У роботі використано: фундаментальні положення теорії автоматичного управління; методи математичного моделювання для побудови структурних та динамічних моделей системи; апарат теорії нечітких множин і нечіткої логіки для синтезу fuzzy-регулятора; методи імітаційного моделювання для аналізу динамічних характеристик нечіткої системи управління у середовищі MATLAB.

Наукова новизна результатів. У ході виконання дослідження отримано такі науково нові результати:

1. Вперше обґрунтовано доцільність застосування нечіткого керування до багатомасової електромеханічної системи підйомного механізму шахтної підйимальної установки.

2. Запропоновано та синтезовано нечітку систему керування трьохмасовою електромеханічною системою, яка відповідає вимогам, що висуваються до систем керування механізмами підвищеної відповідальності.

3. Розвинено математичні моделі об'єктів управління зі складними кінематичними зв'язками у формалізованому представленні трьохмасових електромеханічних систем.

4. Удосконалено методи синтезу нечітких регуляторів для систем автоматичного керування з моделями типу «багатомасовий електромеханічний об'єкт».

Практичне значення роботи. Отримані результати мають прикладне значення, оскільки на їх основі розроблено повнофункціональну нечітку систему управління електроприводом підйомного механізму шахтної підйомальної установки. Запропонована система забезпечує підвищений рівень якості регулювання та може бути використана в інженерній практиці під час модернізації реальних шахтних підйомних агрегатів.

Окремі положення роботи впроваджені у навчальний процес кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Української інженерно-педагогічної академії.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, представлені в роботі, отримані автором самостійно. Зокрема: виконано синтез системи підлеглого керування; побудовано математичну модель із урахуванням пружності підйомального канату; розроблено структурну схему нечіткої системи; синтезовано fuzzy-регулятор у MATLAB; проведено повний цикл моделювання та аналізу; здійснено економічне обґрунтування та розроблено заходи з безпеки праці.

Апробація результатів. Основні результати роботи представлені та обговорені на науковій конференції студентів ННІ «УПА» ХНУ ім. В.Н. Каразіна (Харків, 2025 р.).

Структура роботи. Дипломна робота включає вступ, чотири розділи основного змісту, висновки, додатки та список використаних джерел. Загальний обсяг становить 156 сторінок, у тому числі 43 рисунків (21 – на окремих сторінках), 2 таблиці, 3 додатки (24 сторінки) та список із 63 джерел (6 сторінок).

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Історичні передумови, сучасний стан та тенденції розвитку концепції нечітких множин і механізмів нечіткої логіки

Поява теорії нечітких множин та нечіткої логіки, започаткована Лотфі Заде у 1965 році, стала відправною точкою для розвитку принципово нового підходу до опису невизначених процесів і побудови інтелектуальних систем керування [19]. Ця концепція дала змогу працювати не лише з чітко формалізованими математичними моделями, а й із лінгвістичними знаннями, які раніше неможливо було коректно представити в алгоритмічній формі. У правилах виду «якщо ... то ...» була закладена можливість передавати інтуїтивні або емпіричні уявлення операторів технологічних процесів, а саме поняття нечіткості дозволило математично описувати неповні, неточні або суперечливі відомості про об'єкт управління.

Хоча на початковому етапі ця теорія сприймалась науковою спільнотою досить скептично і навіть вважалась недостатньо строгою, її подальший розвиток довів протилежне. Значний внесок у формування математичного апарату зробили праці Заде [20–23], а також дослідження Дюбуа і Прада [24–26], присвячені теорії нечітких мір та можливісних підходів. Вагомими стали й розробки Сугено [27–29], який заклав основу нечіткого висновку, запропонував нечіткий інтеграл та низку важливих моделей представлення експертних знань. Роботи Бездека [30–31] сприяли становленню нечіткої кластеризації, а дослідження Ягера [32] поглибили розуміння логічних операцій над нечіткими множинами. Сукупність цих досліджень перетворила нечітку логіку на повноцінний математичний апарат.

Уже з 1980-х років теорія перестала бути суто методологічною: її почали активно впроваджувати в технічних системах і соціальних застосуваннях. У

Японії нечіткі регулятори швидко здобули практичне визнання: компанія Hitachi інтегрувала нечітку логіку в системи керування поїздами метро, де вона забезпечила плавність руху, зменшення споживання енергії та підвищення комфорту пасажирів. Згодом нечіткі методи з'явилися у побутовій техніці – у кондиціонерах, мікрохвильових печах, пральних машинах – дозволяючи приладами адаптуватися до змінних умов роботи [33]. Таким чином, було продемонстровано, що нечітка логіка може успішно замінити експертні дії оператора там, де побудувати точну модель поведінки об'єкта складно або неможливо.

Подальший етап розвитку припав на 1990–2000-ті роки, коли нечіткі регулятори почали масово використовувати у промислових системах автоматичного керування. У цей період активно формувалися гібридні інтелектуальні підходи, у яких нечітка логіка поєднувалась з методами машинного навчання – нейронними мережами, еволюційними алгоритмами, генетичними методами оптимізації. Завдяки цьому стало можливим автоматичне налаштування функцій належності та правил на основі реальних даних, що значно розширило гнучкість систем та підвищило точність керування [34].

Галузі застосування нечіткої логіки охопили широкий спектр промислових процесів: керування хімічними реакціями, стабілізація температурних режимів, контроль технологій очищення води, регулювання електроприводів, робототехніка. У роботах 2016 року, присвячених верстатним технологіям, підкреслено, що нечіткі регулятори здатні використовувати нечітку інформацію про стан процесу та адаптувати режими обробки в режимі реального часу [35]. У транспортній інженерії нечіткі методи дозволили моделювати поведінку водія, оцінювати дорожні умови та удосконалювати системи керування ходовою частиною авто, особливо за наявності неповних або шумових даних від сенсорів [36]. Одним з ключових досягнень того періоду стало створення нечітких ПД-регуляторів, які поєднали класичні властивості ПД-контролю з адаптивністю нечіткої логіки, що підвищило стійкість систем до збурень і параметричних змін [37].

У сучасних технічних системах нечітка логіка зберігає статус одного з основних інструментів для роботи з нелінійними, багатовимірними та погано формалізованими об'єктами. Особливо ефективною вона виявилася в енергетиці – зокрема, при оптимізації режимів роботи фотоелектричних станцій [38], у хімічних і біотехнологічних процесах [39], а також у холодильних та кліматичних системах, де моделі мають значну кількість нелінійностей та невизначених параметрів [40]. Нині інтенсивно досліджуються нечіткі системи типу 2 і типу 3, що дозволяють враховувати додатковий рівень невизначеності у самих функціях належності, забезпечуючи вищу робастність керування в умовах мінливої або неповної інформації [41].

Одним із перспективних напрямів стало поєднання нечіткої логіки з глибокими нейронними мережами, що дало змогу створювати системи, які одночасно можуть навчатися на даних і залишатися інтерпретованими завдяки нечітким правилам [42]. Такі моделі є особливо затребуваними в умовах Індустрії 4.0, де необхідно оптимізувати технологічні процеси, прогнозувати стан обладнання та приймати рішення в ситуаціях із невизначеними або швидкозмінними даними.

Якщо прослідкувати розвиток нечіткої логіки загалом, можна виділити кілька характерних еволюційних кроків: від перших експериментальних алгоритмів керування – до широкого промислового впровадження; від локальних регуляторів – до комплексних гібридних систем; від статичних моделей – до самонавчальних контролерів, що здатні адаптувати власні правила та параметри в процесі роботи. У сучасній промисловості нечіткі системи стали основою для побудови адаптивних, інтелектуальних і пояснюваних контролерів – властивостей, особливо важливих у складних автоматизованих комплексах.

Попри численні переваги – здатність працювати з неповною інформацією, інтегрувати експертні знання, забезпечувати гнучкість керування нелінійними системами – перед нечіткими системами стоять нові виклики. Це автоматизація налаштування функцій належності, інтеграція з великими потоками даних, забезпечення обчислювальної ефективності в режимі реального часу, а також по-

єднання пояснюваності з високою точністю моделей. Тому сучасні тенденції спрямовані на створення гібридних контролерів, інтегрованих із методами прогнозування, оптимізації та машинного навчання.

У підсумку, нечітка логіка пройшла шлях від концептуальної новації до універсального інструмента, що використовується в найрізноманітніших галузях промисловості. Її роль продовжує зростати, адже сучасна промисловість характеризується високим рівнем невизначеності, складністю об'єктів та необхідністю адаптивного інтелектуального керування.

У додатках А–В подано основні теоретичні відомості щодо нечітких множин, операцій над ними та систем нечіткого висновку, які становлять основу для проведених у роботі досліджень.

1.2 Чинники, що визначають результативність і доцільність використання нечіткого висновку в задачах керування технічними системами

Ефективність застосування нечіткої логіки в задачах керування динамічними системами ґрунтується на низці фундаментальних теоретичних результатів, які продемонстрували здатність нечітких моделей відтворювати складні залежності між вхідними й вихідними параметрами. Одним із ключових кроків у цьому напрямі стало доведення у 1992 році теореми Вана, згідно з якою будь-яка безперервна функція, визначена на компактній множині, може бути наближена нечіткою експертною системою з довільно малою похибкою. Цей факт засвідчив, що нечітка логіка здатна виступати універсальним інструментом апроксимації для широкого класу математичних відображень.

Подальші результати лише посилили ці висновки. У 1995 році Кастро продемонстрував, що класичний контролер Мамдані також володіє властивістю універсальної апроксимації за певних умов, тобто може відтворювати складні нелінійні залежності, не маючи формалізованої математичної моделі об'єкта. А знаменита теорема нечіткого апроксимування FAT, сформульована Б. Коско в 1993 році, узагальнила попередні здобутки, стверджуючи, що практично будь-

яку математичну систему можна відтворити засобами нечіткої логіки. Це остаточно закріпило нечіткі методи як потужний інструмент роботи з невизначеністю та складною динамікою.

Завдяки цьому нечіткі системи виявилися особливо корисними там, де побудова точної математичної моделі є складною або взагалі неможливою, а наявні знання про поведінку системи представлені у формі експертних лінгвістичних правил. У таких ситуаціях лінгвістичні конструкції типу «якщо... то...» дозволяють відобразити досвід фахівців, перетворюючи його на алгоритм керування навіть тоді, коли формальний опис об'єкта відсутній.

Разом із тим, нечіткі методи мають і свої характерні обмеження. База правил зазвичай створюється експертами вручну, що робить її чутливою до неповноти та суперечностей у формулюваннях. Крім того, вибір форм і параметрів функцій належності здебільшого залишається суб'єктивним, адже він відображає уявлення розробника про поведінку змінних, а не завжди точні властивості реального процесу. Тому якість системи істотно залежить від компетентності експерта та точності налаштування параметрів, що часом вимагає подальшої оптимізації або навчання.

1.3 Загальні принципи побудови та організаційні особливості структур нечіткого керування

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, керу-

ючим 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 прийнятного 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).

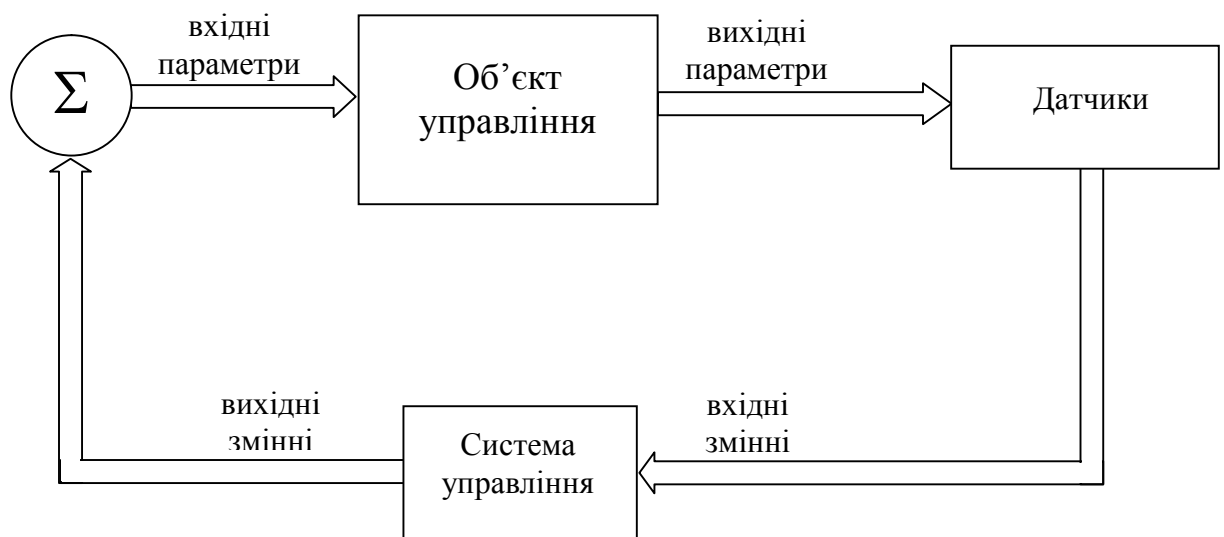


Рисунок 1.1 – Узагальнена схема процесу керування зі зворотним зв'язком

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.

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 Основні вимоги до системи автоматизованого керування електроприводом підйомного обладнання шахтних установок

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...20 м/с, прискор-

рення – $0,5 \dots 1 \text{ м/с}^2$, ривок – $0,5 \dots 2,5 \text{ м/с}^3$, при загальній похибці виконання програмної швидкості не більше $\pm 1 \%$.

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 промис-

лових 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 / ІоТ) 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 варіації її робочих параметрів.

1.5 Формулювання наукової проблеми та постановка завдання синтезу нечіткої системи керування електроприводом механізму підйому шахтної підйимальної машини

Аналіз сучасних наукових джерел переконливо демонструє, що використання апарату теорії нечітких множин та нечіткої логіки становить один із найбільш перспективних напрямів у розвитку методів синтезу систем автоматичного управління технічними об'єктами. На відміну від класичних детермінованих підходів, нечітка логіка надає можливість формально описувати неповні, нечіткі, якісні або експертні знання про поведінку системи, а також оперувати такими даними для прийняття керуючих рішень. Саме ця властивість дає змогу моделювати процеси, які важко піддаються строгій математичній формалізації через складність, нелінійність або наявність значної невизначеності.

Методи побудови інформаційних моделей на основі нечітких множин суттєво розширюють межі традиційного використання обчислювальної техніки. На цьому підґрунті формується окрема галузь досліджень – нечіткове моделювання, орієнтоване на опрацювання лінгвістичних знань, евристичних стратегій та якісних описів поведінки складних систем. Нечітка логіка, яка лежить в основі таких систем, є ближчою до природних механізмів людського мислення, ніж формальні бінарні структури класичної логіки. Вона дозволяє відобразити неповноту, мінливість та нечіткість реальних процесів, властивих практично кожному технічному чи технологічному об'єкту.

У цьому контексті математичні засоби подання нечітких знань стають потужним інструментом для проєктування регуляторів, які можуть забезпечувати високу якість керування навіть у ситуаціях, коли традиційні контролери – зокрема, ПІД-регулятори – не забезпечують потрібної точності, швидкодії чи стійкості. Впровадження нечітких систем управління, згідно з численними дослідженнями, дозволяє підвищити якість технологічних процесів, зменшити енергетичні витрати та забезпечити високу чутливість до змін зовнішніх умов або параметрів об'єкта управління.

Показово, що Л. Заде, засновник теорії нечітких множин, наголошував на важливості розширення меж класичної теорії управління. Занадто сильна концентрація на точності, яку часто неможливо забезпечити в реальних умовах, стримує розвиток керування складними об'єктами. Це зумовлено тим, що багато практичних задач є погано формалізованими: їхні цілі, параметри або умови функціонування не піддаються точному математичному опису. У таких ситуаціях саме інструменти нечіткого моделювання дають змогу створювати ефективні регулятори, що працюють на основі знань експертів або якісного опису процесу.

Сучасний розвиток нечітких систем управління виходить далеко за межі теоретичних досліджень та охоплює практичні аспекти – побудову апаратної бази, спеціалізованих процесорів для нечітких обчислень, інструментальних засобів проєктування, методів верифікації та оптимізації нечітких моделей. Поступовий перехід від теорії до практики зумовив появу нового спектра завдань, серед яких:

- розробка нових архітектур для реалізації нечітких алгоритмів на апаратному рівні;
- створення стандартів і методів для проєктування нечітких регуляторів;
- інтеграція нечітких моделей в існуючі системи автоматизації;
- забезпечення їх взаємодії з традиційними регуляторами й інформаційними системами.

Обґрунтування вибору нечіткого регулювання для механізму підйому.

Проведений аналіз специфіки роботи шахтних підйомних установок показав, що застосування нечітких технологій для побудови системи управління механізмом підйому є доцільним і технічно обґрунтованим. Основна складність полягає в тому, що механізм підйому є багатомасовою пружною системою, у поведінці якої значну роль відіграють деформації підйомного канату та їхній вплив на характер перехідних процесів.

Як продемонстровано в розділі 3, кінцева жорсткість канату спричиняє коливальні режими, які можуть призводити до небажаних динамічних наванта-

жень і погіршення точності позиціонування підйомних судин. Традиційні системи регулювання не завжди здатні подавити ці коливання і забезпечити оптимальні характеристики руху.

У зв'язку з цим застосування нечіткої системи управління дозволяє:

- адаптувати регулятор до зміни маси корисного вантажу;
- враховувати нелінійність та варіативність жорсткості канату;
- мінімізувати коливальні процеси;
- забезпечувати високу якість керування навіть при нестійких або непередбачуваних збуреннях.

Метою роботи є синтез нечіткої системи автоматичного управління механізмом підйому шахтної підйомної установки, здатної забезпечити високі динамічні та якісні показники керування багатомасовою пружною системою при діянні зовнішніх збурень та зміні параметрів роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Розробити систему регулювання параметрів електроприводу механізму підйому, попередньо розглянувши об'єкт управління в умовах одномасової моделі для аналізу та порівняння базових характеристик.

2. Створити математичну модель об'єкта управління з урахуванням пружних властивостей підйомного канату, що дозволить точніше відтворювати динаміку реального механізму та аналізувати вплив пружності на перехідні процеси.

3. Виконати синтез Fuzzy-регулятора, який забезпечуватиме покращену швидкодію, адаптивність і високу якість регулювання для багатомасової електромеханічної системи, що працює за складних експлуатаційних умов.

4. Провести моделювання сформованих систем управління та здійснити ґрунтовний аналіз отриманих результатів з оцінкою таких параметрів, як стабільність, швидкодія, перерегулювання, здатність до пригнічення коливань і стійкість до збурюючих впливів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Доведено доцільність використання систем нечіткого висновку для розв'язання задач управління. У ході аналізу показано, що значна частина інформації, яка описує поведінку реальних технічних об'єктів, має невизначений або якісний характер і не може бути коректно подана традиційними ймовірнісними моделями. За таких умов класичні кількісні методи автоматичного управління виявляються недостатньо ефективними, що ускладнює побудову адекватних алгоритмів керування. Одним із перспективних шляхів подолання цих труднощів є застосування апарату нечітких множин, який дозволяє працювати з нечіткими поняттями, формувати правила логічного міркування за участю експертних знань та отримувати на цій основі нечіткі висновки, що можуть бути використані для побудови керуючих сигналів.

2. Сформовано математичне підґрунтя нечітких систем. У підрозділі розглянуто фундаментальні поняття теорії нечітких множин: способи завдання нечітких множин, інтерпретацію функцій приналежності, поняття лінгвістичної змінної та основні операції над нечіткими множинами. Викладені положення слугують базою для формування систем нечіткого висновку та їх подальшого використання в задачах моделювання й керування.

3. Розкрито структуру та принципи функціонування систем нечіткого висновку. Нечіткі правила, механізми імплікації та нечіткі міркування формують концептуальну основу систем нечіткого висновку. Їх архітектура містить базу правил, базу даних із функціями приналежності, модулі фузифікації й дефузифікації, а також механізм логічного висновку та агрегування. Фузифікатор відповідає за перетворення вимірних (чітких) вхідних величин у нечітку форму, а дефузифікатор – за отримання конкретних вихідних значень на основі результатів нечіткого висновку. Окрему увагу приділено системам Мамдані–Заде та моделям Такагі–Сугено–Канга, які є найбільш поширеними в технічних застосуваннях.

4. Проаналізовано можливості практичного використання нечітких систем в задачах управління. Показано, що одним із найважливіших напрямів впровадження нечітких методів є побудова систем керування складними технічними об'єктами, де точне аналітичне моделювання є ускладненим або недоступним. У таких системах лінгвістичні змінні дозволяють формально описувати вхідні й вихідні параметри об'єкта управління, формуючи гнучку базу правил. Заснована на цьому модель нечіткого управління є узагальненням традиційної схеми регулювання, доповненої механізмом нечіткого висновку, що дозволяє враховувати невизначеність та нелінійність реальних процесів. Така система здатна забезпечувати адаптивне й інтелектуальне керування на основі нечітких логічних залежностей.

5. Проведено огляд вимог до систем автоматизації та електроприводів шахтних підйомних машин. У результаті аналізу встановлено, що класичні регулятори не завжди забезпечують необхідну якість керування механізмом підйому через наявність пружних деформацій у підйомному канаті, які спричиняють коливальні режими під час перехідних процесів. Ці фактори знижують точність, підвищують навантаження на елементи конструкції та можуть спричинити небажані динамічні явища. Технології нечіткого моделювання здатні компенсувати недоліки традиційних методів, що робить їх ефективним інструментом для підвищення якості автоматизації шахтних підйомних установок.

6. Сформульовано науково-практичне завдання дослідження. Основна мета полягає в розробці системи керування механізмом підйому шахтної підйомної установки з урахуванням пружних властивостей підйомного канату. Такий підхід дозволить створити модель, здатну коректно відображати реальні динамічні процеси, та забезпечити побудову ефективного регулятора, який зменшуватиме коливальні режими, покращуватиме точність і підвищуватиме надійність роботи механізму.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДЛЕГЛОГО РЕГУ- ЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Технічні параметри та експлуатаційні характеристики шахтної підйимальної установки. Вимоги до системи керування

Для проведення розрахунків електроприводу механізму підйому шахтної підйимальної 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 підйимальної установки

Параметр	Одиниця ви- мірювання	Значення
Вантажопідйимальна здатність установки, $Q_{\text{п}}$	кг	$14,8 \cdot 10^3$
Продуктивність установки, A	т/год	600
Висота піднімання, H	м	580
Маса порожнього скипа, $m_{\text{ск}}$	кг	$9,8 \cdot 10^3$
Діаметр барабана, D	м	5
Довжина етапу дотягування, $S_{\text{дот}}$	м	2
Швидкість дотягування, $V_{\text{дот}}$	м/с	0,5
Питома лінійна маса каната, $m_{\text{лк}}$	кг/м	11,6
Тривалість паузи між робочими циклами, $t_{\text{п}}$	с	11

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 Вибір структури та типу електроприводу для реалізації підйомного процесу на шахтній установці

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 *кВт* для однодвигунного варіанту та до 2500 *кВт* для двохдвигунного.

При потужності до 2500 *кВт* для скіпових установок або підйому клітей шахт можлива комбінація приводів змінного та постійного струму. Якщо ж потужність перевищує 2500 *кВт*, 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 клітях 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 *м/с*) 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 Г-Д, що забезпечує необхідний рівень керованості, надійності та точності управління.

2.3 Алгоритм розрахунку та побудова швидкісної діаграми та діаграми навантаження шахтного підйомника

Розрахунок параметрів функціонування шахтної підйомної установки виконується за певною послідовністю, що дозволяє послідовно визначити всі основні часові, кінематичні й силові характеристики режиму руху підйомних судин.

Першим етапом визначають тривалість повного циклу переміщення підйомних судин:

$$T_{\text{ц}} = \frac{Q_{\text{п}} \cdot 3600}{A},$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{14,8 \cdot 3600}{600} = 90 \text{ с}.$$

Тривалість активного руху підйомних судин визначається виразом:

$$T = T_{\text{ц}} - t_{\text{п}};$$

$$T = 90 - 11 = 79 \text{ с}.$$

Наступним етапом обчислюють інтервал руху зі сталою малою швидкістю – так звану ділянку дотягування. Цей період відповідає переміщенню судини в зоні розвантажувальних кривих:

$$t_{\text{дот}} = \frac{S_{\text{дот}}}{V_{\text{дот}}};$$

$$t_{\text{дот}} = \frac{2}{0,5} = 4 \text{ с}.$$

Відносні приведені маси тримасової системи визначають за залежностями, що залежать від загальної глибини підйому:

$$\mu_1 = 0,73, \quad \mu_2 = 0,2, \quad \mu_k = 0,07.$$

Час руху з урахуванням ліміту ривка (обмеження зміни прискорення), який характеризує динаміку набору швидкості, становить:

$$t_p = \frac{2\pi H}{4200} \sqrt{\frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_k}};$$

$$t_p = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 580}{4200} \sqrt{\frac{0,73 \cdot 0,2}{0,07}} = 1,29 \text{ с}.$$

Розрахунковий час руху:

$$T_p = T - t_{\text{дот}},$$

$$T_p = 79 - 4 = 75 \text{ с}.$$

Розрахункова висота підйому:

$$H_p = H - V_{\text{дот}} \left(\frac{t_p}{2} + t_{\text{дот}} \right),$$

$$H_p = 580 - 0,5 \left(\frac{1,29}{2} + 4 \right) = 578 \text{ м}.$$

На основі цього визначають середню розрахункову швидкість підйому:

$$V_{\text{ср}} = \frac{H_p}{T_p},$$

$$V_{\text{ср}} = \frac{578}{75} = 7,77 \text{ м/с}.$$

Базова середня швидкість, яка використовується для подальших розрахунків:

$$V_{\bar{}} = V_{\text{cp}} \sqrt{\frac{1000}{H_p}},$$

$$V_{\bar{}} = 7,77 \cdot \sqrt{\frac{1000}{578}} = 10,22 \text{ м/с}.$$

Згідно з умовами, підйомна установка є урівноваженою, тобто її коефіцієнт неурівноваженості дорівнює $\xi = 1$. У такому випадку множник швидкості приймається рівним $\lambda = 1,22$.

Максимальна швидкість руху:

$$V_{\text{max}} = \lambda \cdot \frac{H_p}{T_p},$$

$$V_{\text{max}} = 1,22 \frac{578}{75} = 9,38 \text{ м/с}.$$

Максимальне прискорення

$$a_{\text{max}} = \frac{\lambda \cdot \frac{H_p}{T_p^2}}{1 - \frac{1}{\lambda} - \frac{t_p}{T_p}},$$

$$a_{\text{max}} = \frac{1,22 \cdot \frac{578}{75^2}}{1 - \frac{1}{1,22} - \frac{1,29}{75}} = 0,83 \text{ м/с}^2.$$

Час руху з максимальним прискоренням у фазі розгону визначають як:

$$t_a = T_p \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda} - 2 \cdot \frac{t_p}{T_p} \right),$$

$$t_a = 75 \left(1 - \frac{1}{1,22} - 2 \frac{1,29}{75} \right) = 9,8 \text{ c}.$$

Відповідно, час руху з максимальною швидкістю:

$$t_v = T_p \cdot \left(\frac{2}{\lambda} - 1 \right),$$

$$t_v = 75 \cdot \left(\frac{2}{1,22} - 1 \right) = 49,3 \text{ c}.$$

Час уповільнення за рахунок дії механічного гальма:

$$t_r = \frac{V_{\text{дог}}}{a_r},$$

де a_r – встановлене уповільнення (беруть рівним a_{max})

$$t_r = \frac{0,5}{0,83} = 0,61 \text{ c}.$$

Тривалість руху із максимальним прискоренням у зоні гальмування:

$$t_{a1} = t_a - t_r,$$

$$t_{a1} = 9,9 - 0,61 = 9,39 \text{ c}.$$

Розрахунок рушійних зусиль та побудова навантажувальної діаграми.

Сумарна приведена маса всієї системи, що бере участь у русі, визначається:

$$m = \frac{Q_{\text{п}} + m_{\text{ск}} + m_{\text{лк}} \cdot H}{\mu_{\text{к}} + \mu_2},$$

де μ_1, μ_2, μ_k – раніше визначені відносні приведені маси тримасової системи: $\mu_1 = 0,73, \mu_2 = 0,2, \mu_k = 0,07$.

$$m = \frac{14800 + 9800 + 11,6 \cdot 580}{0,07 + 0,2} = 116770 \text{ кг}.$$

Рушійні зусилля в ті моменти часу, коли відбуваються зміни кінематичних параметрів (розгін, усталений рух, гальмування), визначають за формулами:

$$F_0 = q(k\zeta Q + m_{1k}H),$$

$$F_0 = 9,81 \cdot (1,1 \cdot 1 \cdot 14800 + 11,6 \cdot 580) = 211863 \text{ кг}.$$

де k – коефіцієнт додаткових опорів руху, який враховує реальні механічні втрати, $k = 1,1 \div 1,2$

$$F_1 = F_0 - qm_{1k} \frac{a_{\max} t_p^2}{3} + m \cdot a_{\max},$$

$$F_1 = 211863 - 9,81 \cdot 11,6 \frac{0,83 \cdot 1,29^2}{3} + 116770 \cdot 0,83 = 292664 \text{ Н}.$$

$$F_2 = F_0 - qm_{1k} \left(\frac{a_{\max} t_p^2}{3} + V_{\max} t_a \right) + ma_{\max},$$

$$F_2 = 211863 - 9,81 \cdot 11,6 \left(\frac{0,83 \cdot 1,29^2}{3} + 9,38 \cdot 9,87 \right) + 116770 \cdot 0,83 = 287226 \text{ Н}.$$

$$F_3 = F_0 - qm_{1k} V_{\max} (t_a + 2t_p),$$

$$F_3 = 211863 - 9,81 \cdot 11,6 \cdot 9,38 (9,87 + 2 \cdot 1,29) = 199820 \text{ Н}.$$

$$F_4 = F_0 - qm_{1k} V_{\max} (t_a + 2t_p + 2t_v),$$

$$F_4 = 211863 - 9,81 \cdot 11,6 \cdot 9,38 \cdot (9,87 + 2 \cdot 1,29 + 2 \cdot 49,3) = 91395 \text{ H}.$$

$$F_5 = F_0 - qm_{1\kappa}V_{\max} \left(t_a + 4t_p + 2t_v - \frac{a_{\max}t_p^2}{3V_{\max}} \right) - ma_{\max},$$

$$F_5 = 211863 - 9,81 \cdot 11,6 \cdot 9,38 \cdot \left(9,87 + 4 \cdot 1,29 + 2 \cdot 49,3 - \frac{0,384 \cdot 1,29^2}{3 \cdot 9,38} \right) - 116770 \cdot 0,84 = 3511 \text{ H}$$

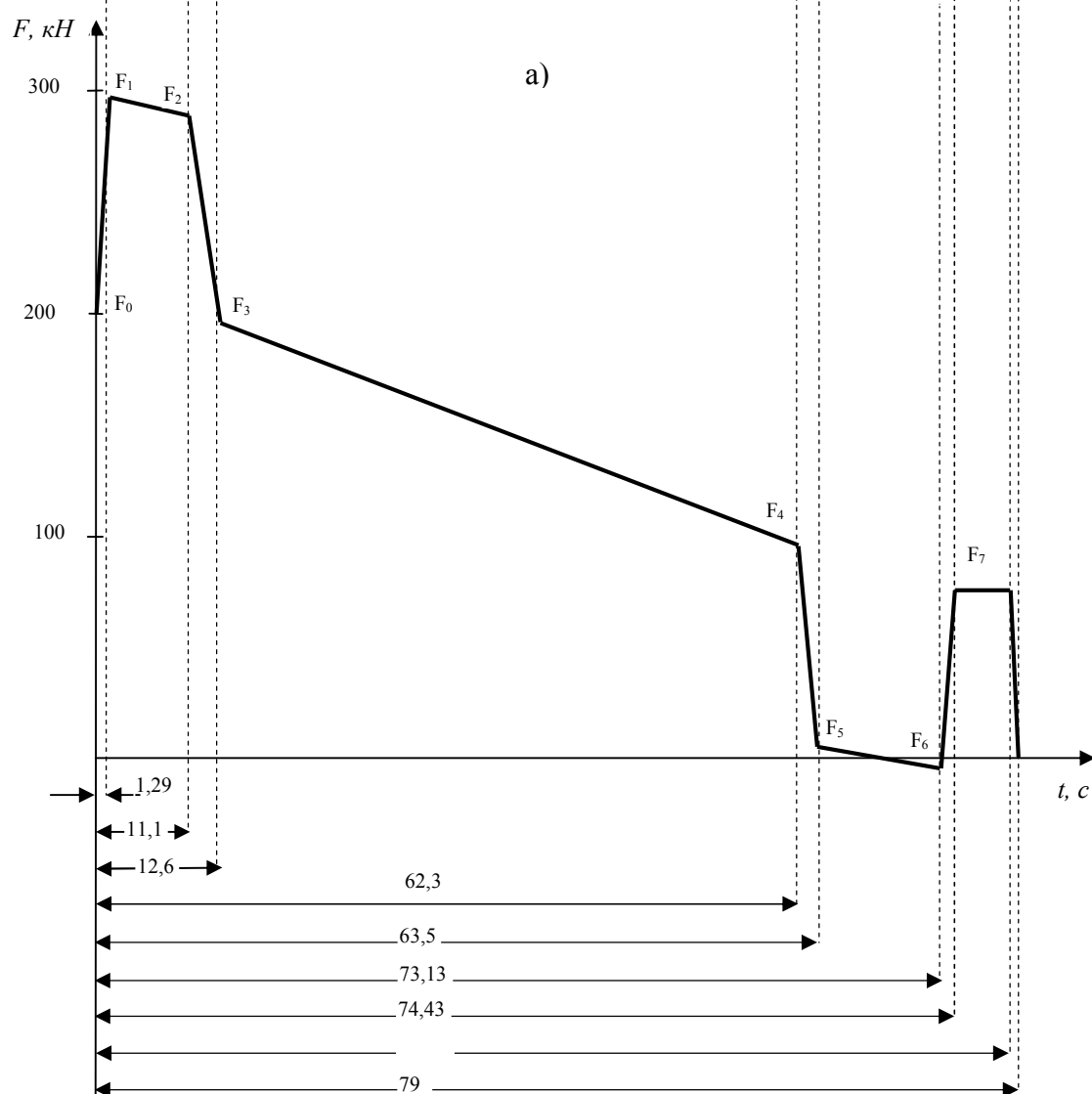
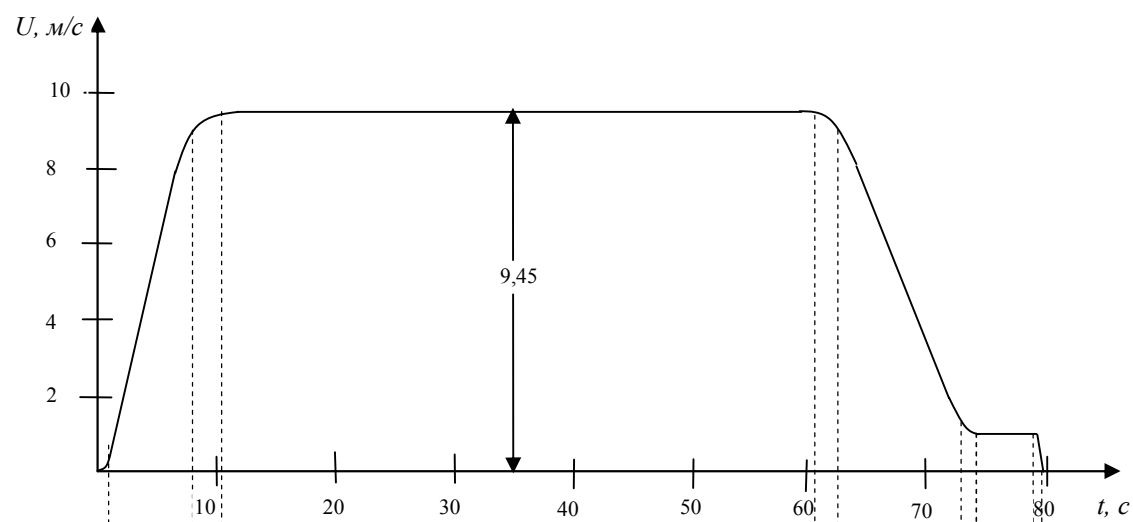
$$F_6 = F_0 - qm_{1\kappa}V_{\max} \left(2t_a + 4t_p + 2t_v - \frac{a_{\max}t_p^2}{3V_{\max}} \right) - ma_{\max},$$

$$F_6 = 211863 - 9,81 \cdot 11,6 \cdot 9,38 \cdot \left(2 \cdot 9,87 + 4 \cdot 1,29 + 2 \cdot 49,3 - \frac{0,83 \cdot 1,29^2}{3 \cdot 9,38} \right) - 116770 \cdot 0,83 = -6579 \text{ H}$$

$$F_7 = F_0 - 2qm_{1\kappa}$$

$$F_7 = 211863 - 2 \cdot 9,81 \cdot 11,6 \cdot 580 = 77012 \text{ H}$$

На основі отриманих параметрів будуються дві діаграми – швидкісна та навантажувальна, які подано на рисунку 2.1.



б)

Рисунок 2.1 – Діаграми зміни швидкості (а) та навантаження (б) електроприводу під час повного циклу підйому

2.4 Вибір електричного двигуна і основного електроустаткування відповідно до необхідної потужності та режимів роботи

Для забезпечення надійної та ефективної роботи електроприводу підйомної установки необхідно здійснити підбір електродвигуна і комплексу силового обладнання, керуючись розрахунковими параметрами, що характеризують навантаження та режими функціонування системи. На основі значень параметрів $\xi = 1$, $\lambda = 1,2$ та $V_0 = 10,22 \text{ м/с}$ визначаємо відносну базову потужність $P_{\text{еф.б}}^* = 1,91$, що є вихідною величиною для подальших визначень.

Відносна ефективна потужність електроприводу уточнюється згідно з виразом

$$P_{\text{еф}}^* = [P_{\text{еф.б}}^* - 1,17\lambda] H \cdot 10^{-3} + 1,17\lambda ,$$

$$P_{\text{еф}}^* = (1,91 - 1,17 \cdot 1,2) \cdot 580 \cdot 10^{-3} + 1,17 \cdot 1,2 = 1,594 .$$

Отримана величина дає змогу провести розрахунок необхідної встановленої потужності електродвигуна за формулою

$$P_{\text{дв}} = k_{\text{пн}} k_{\text{оп}} P_{\text{еф}}^* \cdot \frac{q \cdot Q_{\text{п}} H}{1040 \cdot T_{\text{р}}}$$

де $k_{\text{пн}} = 1,05$ – коефіцієнт, що компенсує вплив пульсацій напруги живлення та враховує її несталу форму;

$k_{\text{оп}} = 1,1$ – коефіцієнт, який враховує можливість роботи в режимі ослабленого магнітного поля.

$$P_{\text{дв}} = 1,05 \cdot 1,1 \cdot 1,594 \cdot \frac{9,81 \cdot 14800 \cdot 580}{1040 \cdot 75} = 1691 \text{ кВт} .$$

Частота обертання вала електродвигуна визначається на підставі залежності:

$$n_{\text{дв}} = \frac{30 \cdot V_{\text{max}}}{\pi R_{\text{с}}},$$

$$n_{\text{дв}} = \frac{30 \cdot 9,38}{3,14 \cdot 2,5} = 35,76 \text{ об / хв}.$$

Використовуючи отримані параметри, із каталогу було обрано електродвигун П2-23/85-2,8УХЛ4, технічні характеристики якого повністю відповідають вимогам до підйомного механізму. До його номінальних параметрів належать: потужність $P_{\text{н}} = 1800 \text{ кВт}$, частота обертання $n_{\text{н}} = 32 \text{ об / хв}$, номінальна напруга $U_{\text{н}} = 600 \text{ В}$, робочий струм $I_{\text{н}} = 3180 \text{ А}$, а також опори обмоток – якоря $R_{\text{я д}} = 0,00804 \text{ Ом}$, додаткових полюсів $R_{\text{дп д}} = 0,00147 \text{ Ом}$ та компенсаційної обмотки $R_{\text{ко д}} = 0,00458 \text{ Ом}$. Двигун має $p = 5$ пар полюсів, що визначає його електромеханічні властивості.

Для оцінки відповідності двигуна можливим робочим навантаженням виконуємо розрахунок коефіцієнта експлуатаційного перевантаження:

$$\gamma_{\text{експ}} = \frac{(k\xi Q_{\text{п}} + m_{\text{лк}} H)q + ma_{\text{max}}}{F_{\text{дв н}}},$$

де $F_{\text{дв н}}$ – розрахункове номінальне рушійне зусилля

$$F_{\text{дв н}} = \frac{30P_{\text{н}}}{\pi n_{\text{н}} R_{\text{с}}},$$

$$F_{\text{дв н}} = \frac{30 \cdot 1800 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 32 \cdot 2,5} = 201243 \text{ Н},$$

$$\gamma_{\text{експ}} = \frac{(1,1 \cdot 1 \cdot 14800 + 11,6 \cdot 580) \cdot 9,81 + 116770 \cdot 0,83}{201243} = 1,841.$$

Крім того, враховуємо можливі короточасні перевантаження, які виникають у разі перестановки барабанів або заміни канатів. Величина екстреного перевантаження визначається як

$$\gamma_{\text{екст}} = \frac{(Q + m_{\text{ск}} + m_{\text{лк}} H) q}{F_{\text{дв.ном}}},$$

$$\gamma_{\text{екст}} = \frac{(14800 + 9800 + 11,6 \cdot 580) \cdot 9,81}{201243} = 1,613.$$

Отже, обраний електродвигун має достатній запас перевантажувальної здатності та повністю відповідає вимогам до підйомної установки.

Для забезпечення узгодженої взаємодії зі зворотно-перетворювальним ланцюгом електроприводу необхідно вибрати генератор, потужність якого визначаємо за формулою

$$P_{\Gamma} \geq k_3 P_{\text{н}},$$

де $k_3 = 1,1 \div 1,3$ коефіцієнт запасу, що враховує можливі пікові навантаження;
 $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність двигуна

$$P_{\Gamma} \geq 1,1 \cdot 1800 = 1980 \text{ кВт}$$

Після розрахунку, із каталогу обрано генератор ГП21/22-3.15, технічні характеристики якого включають номінальну потужність $P_{\text{н}} = 2000 \text{ кВт}$, номінальну напругу $U_{\text{н}} = 600 \text{ В}$ та номінальний струм $I_{\text{н}} = 3340 \text{ А}$.

Як приводну машину для генератора вибрано синхронний двигун СДНЗ-17-49-12У4 із номінальною потужністю $P_{\text{нсд}} = 2500/2900 \text{ кВт/кВА}$ та частотою обертання $n_{\text{нсд}} = 500 \text{ об/хв}$, що забезпечує стабільність роботи схеми Г–Д.

Для формування та стабілізації струму збудження застосовано тиристорні перетворювачі. У приводах генератор–двигун підйомних установок використовуються такі типи тиристорних систем:

- реверсивні КТУЕР1-63/430Р – для регулювання струму збудження генераторів;
- нереверсивні КТУП2-250/460Р та КТУЕ-63/460Р – для збудження двигунів.

Усі пристрої забезпечують перетворення трифазної напруги 380 В у стабілізовану й регульовану напругу постійного струму, що є необхідним для побудови сучасного автоматизованого електроприводу.

2.5 Обчислення параметрів силовій частини електроприводу

Першим кроком є визначення сумарного активного опору якірної частини електроприводу:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{як д}} + R_{\text{як г}},$$

де $R_{\text{як д}}$, $R_{\text{як г}}$ – активні опори якірних кіл двигуна та генератора відповідно

$$R_{\text{як д}} = \alpha_t (R_{\text{я д}} + R_{\text{дп д}} + R_{\text{ко д}});$$

$$R_{\text{як г}} = \alpha_t (R_{\text{я г}} + R_{\text{дп г}} + R_{\text{ко г}});$$

α_t – температурний коефіцієнт, що компенсує зміну активного опору внаслідок нагрівання елементів; для ізоляції класу Н приймається значення $\alpha_t = 1,36$;

$R_{\text{я д(г)}}$, $R_{\text{дп д(г)}}$, $R_{\text{ко д(г)}}$ – опори обмоток якорів, додаткових полюсів та компенсації у генератора й двигуна.

Згідно з технічними даними:

для двигуна – $R_{\text{я д}} = 0,00804 \text{ Ом}$, $R_{\text{дп д}} = 0,00147 \text{ Ом}$, $R_{\text{ко д}} = 0,00458 \text{ Ом}$;

для генератора – $R_{\text{я г}} = 0,00341 \text{ Ом}$, $R_{\text{дп г}} = 0,00043 \text{ Ом}$, $R_{\text{ко г}} = 0,00187 \text{ Ом}$.

Виконуємо підстановку та одержуємо:

$$R_{\text{як д}} = 1,36 \cdot (0,00804 + 0,00147 + 0,00458) = 0,01916 \text{ Ом}.$$

$$R_{\text{як г}} = 1,36 \cdot (0,00341 + 0,00043 + 0,00187) = 0,007766 \text{ Ом}.$$

$$R_{\Sigma} = 0,01916 + 0,007766 = 0,0269 \text{ Ом}.$$

Сумарна індуктивність силового ланцюга визначається з урахуванням індуктивностей якірних кіл:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{д}} + L_{\text{г}},$$

де $L_{\text{д}}$, $L_{\text{г}}$ – відповідні індуктивності якорів

$$L_{\text{д(г)}} = \gamma_{\text{д(г)}} \frac{U_{\text{н д(г)}}}{I_{\text{н д(г)}} \omega_{\text{н д(г)}} p_{\text{д(г)}}},$$

$\gamma_{\text{д(г)}}$ – коефіцієнт, що дорівнює $0,1 \div 0,25$ для компенсованих машин;

$U_{\text{н д(г)}}$, $I_{\text{н д(г)}}$, $\omega_{\text{н д(г)}}$, $p_{\text{д(г)}}$ – номінальні параметри напруги, струму, частоти обертання та числа пар полюсів обох машин.

Підставивши значення, одержуємо:

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

$$\omega_{\text{н д}} = \frac{3,14 \cdot 32}{30} = 3,35 \text{ с}^{-1};$$

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

$$\omega_{\text{н г}} = \frac{3,14 \cdot 500}{30} = 52,3 \text{ с}^{-1}.$$

$$L_d = 0,1 \cdot \frac{600}{3180 \cdot 3,35 \cdot 4} = 0,0014 \Gamma_n .$$

$$L_r = 0,1 \cdot \frac{630}{3340 \cdot 52,3 \cdot 4} = 0,9 \cdot 10^{-4} \Gamma_n ,$$

$$L_{\Sigma} = 0,0014 + 0,9 \cdot 10^{-4} = 0,00149 \Gamma_n .$$

Електромагнітна постійна часу якорного кола:

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

$$T_e = \frac{0,00149}{0,0269} = 0,056 \text{ с} .$$

Постійна проти-ЕРС двигуна визначається співвідношенням

$$c = k\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_{як.д}}{\omega_n} ,$$

де k – конструктивна стала двигуна;

Φ_n – величина номінального магнітного потоку машини,

$$c = k\Phi_n = \frac{600 - 3180 \cdot 0,01916}{3,35} = 161 .$$

Електромеханічна постійна часу електроприводу обчислюється як

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

де J_{Σ} – повний момент інерції, приведений до вала двигуна

$$J_{\Sigma} = J_b + J_k + J_{\Sigma д} ,$$

$J_{\text{в}}$ – момент інерції скипа з вантажем, приведена до вала двигуна;

$J_{\text{к}}$ – момент інерції каната, приведений до вала;

$J_{\Sigma\text{д}}$ – сумарний момент інерції самого електродвигуна та всіх інших обертючих елементів механічної частини електроприводу, що обертаються зі швидкістю валу двигуна, а також приведений момент інерції порожнього скипа, врахований як додатковий внесок до загальної інерції системи.

Визначаємо значення $J_{\text{в}}$ за формулою:

$$J_{\text{в}} = (Q_{\text{п}} + m_{\text{ск}}) \rho^2,$$

ρ – радіус приведення для елементів, що здійснюють поступальний рух.

Отримуємо:

$$\rho = \frac{V_{\text{max}}}{\omega_{\text{к}}} = \frac{D}{2};$$

$$J_{\text{в}} = (14800 + 9800) \cdot 5 / 2 = 66750 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Оскільки точні значення деяких моментів інерції $J_{\text{к}}$ та $J_{\Sigma\text{д}}$ недоступні, використовуємо приведені маси $\mu_1 = 0,73$, $\mu_2 = 0,2$, $\mu_{\text{к}} = 0,07$., що дає можливість визначити інерційні параметри непрямым способом:

$$J_{\text{к}} = \frac{J_{\text{в}} \mu_{\text{к}}}{\mu_2},$$

$$J_{\text{к}} = \frac{49250 \cdot 0,095}{0,175} = 21028 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$J_{\Sigma\text{д}} = \frac{J_{\text{в}} \mu_1}{\mu_2},$$

$$J_{\Sigma\text{д}} = \frac{66750 \cdot 0,73}{0,2} = 243638 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$J_{\Sigma} = 66750 + 23362,5 + 243637,5 = 333750 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$T_{\text{м}} = 333750 \cdot \frac{0,0269}{161^2} = 0,346 \text{ с}.$$

Постійна часу генератора T_{Γ} визначається наближено – приймаємо, що вона дорівнює часовій сталій незалежної обмотки збудження:

$$T_{\Gamma} = T_{\text{зб}} = \frac{2pw_{\text{зб}}k_{\phi}}{R_{\text{зб}}},$$

де $w_{\text{зб}}$ – число витків на полюс;

$R_{\text{зб}}$ – активний опір обмотки;

k_{ϕ} – коефіцієнт нахилу магнітної характеристики.

За каталогом: $w_{\text{зб}} = 224$, $R_{\text{зб}} = 3,4 \text{ Ом}$, $k_{\phi} = 0,745 \cdot 10^{-2}$,

Тоді:

$$T_{\Gamma} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 224 \cdot 0,745 \cdot 10^{-2}}{3,4} = 2,9 \text{ с}.$$

Коефіцієнт підсилення генератора визначається як

$$k_{\Gamma} = \frac{E_{\text{нГ}}}{U_{\text{нзбГ}}} = \frac{U_{\text{нГ}} + I_{\text{нГ}}R_{\Sigma\Gamma}}{U_{\text{нзбГ}}},$$

де $U_{\text{нГ}}$, $U_{\text{нзбГ}}$ – номінальні напруги якоря та збудження, для генератора ГП21/22-315 маємо $U_{\text{нзбГ}} = 220 \text{ В}$;

$I_{\text{нГ}}$ – номінальний струм;

$E_{\text{нГ}}$ – номінальна ЕРС.

Отже,

$$k_{\Gamma} = \frac{600 + 3340 \cdot 0,007766}{220} = 2,85.$$

Коефіцієнт підсилення тиристорного збудника розраховується для амплітудного значення синусоїдальної напруги порівняння $U_{\pi} = 10 \text{ В}$:

$$k_{\pi} = \frac{U_{\text{н зб Г}}}{U_{\pi}},$$

$$k_{\pi} = \frac{220}{10} = 22.$$

Коефіцієнт підсилення двигуна:

$$k_{\text{д}} = \frac{1}{c},$$

$$k_{\text{д}} = \frac{1}{161} = 0,0062.$$

2.6 Функціональна схема автоматизованої системи керування електроприводом шахтного підйомника

Функціональна структура електроприводу типу Г–Д із тиристорними збуджувачами (ТЗБ) наведена на рис. 2.2. У цій системі збудження генератора Г формується за допомогою реверсивного тиристорного збудника ТЗБГ, що забезпечує можливість отримання як додатного, так і від’ємного струму збудження. Збудження двигуна Д здійснюється через окремий нереверсивний тиристорний збудник ТЗБД, який забезпечує стабільовану подачу струму збудження відповідно до команд системи управління.

Управління збудженням двигуна організовано у складі замкнутого регуляторного контуру. Формування заданого значення номінального струму збудження $I_{\text{зб д}}$ відбувається шляхом подачі стабілізованої напруги $U_{\text{з зб}}$ від незалежного джерела живлення на вхід регулятора збудження РТЗБ. Зворотний зв’язок по струму збудження забезпечується через шунт, з якого сигнал пода-

ється на датчик струму ДТЗБ, а потім – на порівнюючий вхід регулятора РТЗБ ($I_{зб\ д} k_{зб} = U_{зз\ зб}$).

Задання швидкості електроприводу формується від командоапарата ручного керування КАР та блока завдання швидкості ЗШ. Зміна швидкості здійснюється відповідно до обмеженої інтенсивності, що задається блоком ЗІ, який реалізує плавне формування сигналу-завдання і запобігає появі надмірних динамічних навантажень у механічній частині системи.

Структурно система регулювання швидкості є трьохконтурною. На верхньому рівні знаходиться регулятор швидкості РШ, що порівнює завдану швидкість ω_z зі значенням ω_d , отриманим від тахогенератора ТГ, і формує сигнал розузгодження. Вихід РШ задає команду для регулятора струму РТ. Регулятор струму забезпечує стабілізацію фактичного струму якоря, використовуючи сигнал зворотного зв'язку від датчика струму ДС. Нарешті, регулятор напруги генератора ДН, який є підпорядкованим попередньому контуру, формує керуючу дію на тиристорний збудник генератора таким чином, щоб отримати необхідну напругу на якорі двигуна.

Отже, кожний внутрішній контур має підпорядковану роль щодо попереднього: регулятор напруги забезпечує виконання команд регулятора струму, а регулятор струму – команд регулятора швидкості. Така багаторівнева структура забезпечує високу точність регулювання, добру динамічну стійкість і можливість ефективного придушення збурень.

На схемі також позначено допоміжні елементи:

R_a – дільник напруги, призначений для формування сигналів зворотного зв'язку по напрузі;

Ш – шунт для вимірювання струму;

ТГ – тахогенератор для отримання сигналу швидкості;

ДС, ДТ, ДН – відповідно датчики струму, швидкості та напруги, що забезпечують функції зворотних зв'язків у системі.

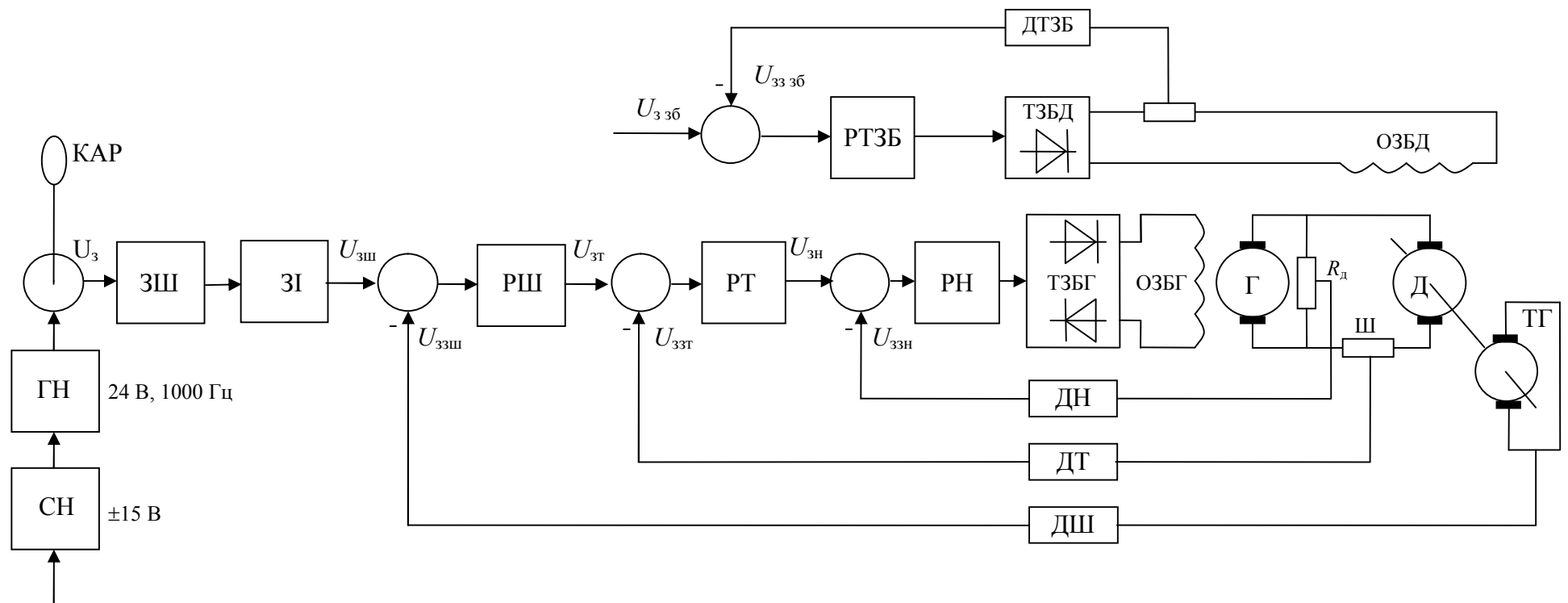


Рисунок 2.2 – Функціональна схема т трьохконтурної системи підлеглого регулювання електроприводу Г–Д з тиристорними збуджниками

2.7 Синтез послідовного корегуючого пристрою контуру напруги

Контур напруги виконує роль внутрішнього регулюючого контура системи підлеглого управління. Оскільки швидкодія та динамічні властивості всієї системи в значній мірі залежать від внутрішнього контуру, саме точний і обґрунтований розрахунок його параметрів є одним з найвідповідальніших етапів у процесі проектування. Порушення у виборі або налаштуванні контура напруги може призвести до недостатньої стабільності системи, значного перерегулювання або зниження якості перехідних процесів.

Алгоритмічна схема контуру регулювання напруги представлена на рисунку 2.3. Вона відображає структуру взаємодії основних складових контуру та зворотного зв'язку, необхідних для забезпечення точного підтримання напруги на якорі двигуна.

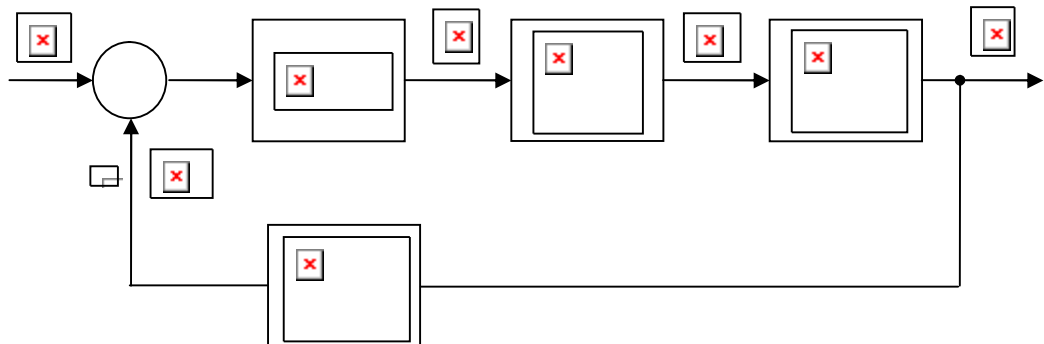


Рисунок 2.3 – Алгоритмічна схема контуру напруги, що відображає взаємодію генератора, тиристорного збудника, регулятора напруги та ланцюга зворотного зв'язку

Контур напруги включає кілька ключових передавальних функцій, що описують динаміку кожного елементу системи:

1. Передавальна функція генератора – описує реакцію генератора на зміну керуючої напруги:

$$W_{\Gamma}(p)=\frac{k_{\Gamma}}{T_{\Gamma}p+1}$$

2. Передавальна функція тиристорного збудника – враховує електричні та динамічні властивості тиристорного перетворювача:

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

3. Передавальна функція регулятора напруги – задає спосіб формування керуючого сигналу: $W_{\text{рн}}(p)$.

4. Передавальна функція ланцюга зворотного зв'язку по напрузі:

$$W_{\text{зн}}(p) = \frac{k_{\text{н}}}{T_{\text{дн}}p + 1}$$

де $T_{\text{дн}}$ – постійна часу датчика напруги; $k_{\text{н}}$ – коефіцієнт підсилення ланцюга зворотного зв'язку по напрузі.

Щоб можна було застосувати загальноприйняту методику синтезу послідовних корегуючих пристроїв, алгоритмічну схему рис. 2.3 перетворюють у схему з одиничним зворотним зв'язком, як показано на рисунку 2.4. Це дозволяє більш систематично розрахувати параметри регулятора і спростити подальший аналіз динаміки контуру.

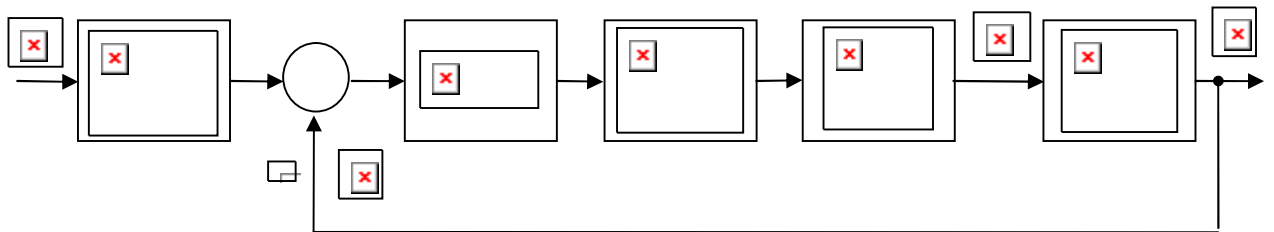


Рисунок 2.4 – Перетворена алгоритмічна схема контуру напруги з одиничним зворотним зв'язком

Оскільки часові константи $T_{\text{дн}}$ і $T_{\text{тп}}$ є суттєво меншими за $T_{\text{г}}$, їх об'єднують у єдину малоінерційну ланку з постійною часу. $T_{\text{μн}} = T_{\text{дн}} + T_{\text{тп}}$. Приймаємо $T_{\text{μн}} = 0,005 \text{ с}$.

Форсуюча ланка $(1 + T_{\text{дн}} p)$, розташована у блоці на вході замкнутого контуру напруги з одиничним зворотним зв'язком (див. рис. 2.4), при проведенні розрахунку параметрів контуру напруги за загальноприйнятою методикою не береться до уваги, оскільки її вплив на основні динамічні характеристики контуру є незначним і не суттєво впливає на процеси регулювання.

Отже, отримуємо спрощену розрахункову структуру, зображену на рис. 2.5.

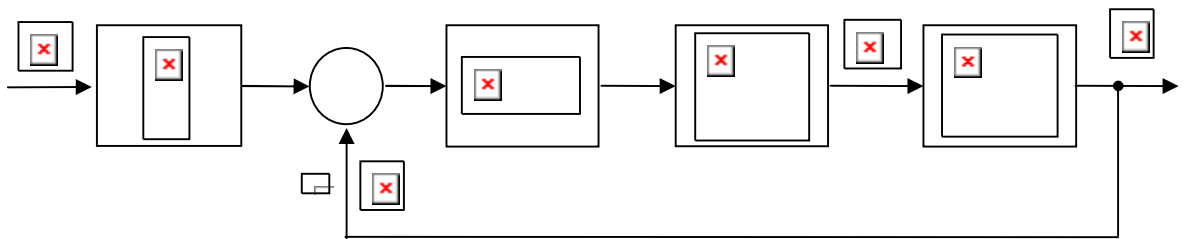


Рисунок 2.5 – Розрахункова алгоритмічна схема контуру напруги, що використовується для визначення параметрів регулятора.

Для оптимізації застосовуємо модульний критерій, згідно з яким бажана передавальна функція розімкненого контуру має вигляд:

$$W_{\text{бн}}(p) = \frac{1}{2T_{\text{мн}} p (T_{\text{мн}} p + 1)}.$$

Передавальна функція об'єкта регулювання:

$$W_{\text{он}}(p) = \frac{k_{\text{г}} k_{\text{тп}} k_{\text{н}}}{(T_{\text{мн}} p + 1)(T_{\text{г}} p + 1)},$$

З умови

$$W_{\text{бн}}(p) = W_{\text{рн}}(p) \cdot W_{\text{он}}(p),$$

визначимо передавальну функцію регулятора

$$W_{\text{рн}}(p) = \frac{W_{\text{бн}}(p)}{W_{\text{он}}(p)} = \frac{1}{2T_{\text{мн}}p(T_{\text{мн}}p+1)} \cdot \frac{(T_{\text{мн}}p+1)(T_{\text{г}}p+1)}{k_z k_{\text{тп}} k_{\text{н}}} = k_{\text{рн}} \frac{T_{\text{г}}p+1}{p},$$

де $k_{\text{рн}} = \frac{1}{2T_{\text{мн}}k_{\text{г}}k_{\text{тп}}k_{\text{н}}}$ – коефіцієнт підсилення регулятора.

Таким чином, оптимальний регулятор напруги є ПІ-регулятором.

Коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі $k_{\text{н}}$ визначається з вимоги формування 24 В на вході датчика при максимальній напрузі генератора $U_{\text{г max}} = 600\text{В}$:

$$k_{\text{н}} = \frac{24}{U_{\text{г max}}} = \frac{24}{600} = 0,04.$$

Передавальна функція замкнутого оптимізованого контуру напруги:

$$W_{\text{зн}}(p) = \frac{1/k_{\text{н}}}{2T_{\text{мн}}^2 p^2 + 2T_{\text{мн}}p + 1}. \quad (2.1)$$

2.8 Синтез послідовного коригуючого пристрою струмового контуру

Об'єкт регулювання контура струму включає якірне коло двигуна, яке за своїми динамічними властивостями можна представити аперіодичною ланкою з коефіцієнтом посилення $1/R_{\Sigma}$ та великою постійною часу $T_{\text{е}}$. До складу об'єкта також входить оптимізований контур напруги, динамічні властивості якого повністю визначаються передавальною функцією (2.1), а також датчик струму, що забезпечує зворотний зв'язок.

Контур струму містить низку основних передавальних функцій:

1. Передавальна функція якірного кола електроприводу, що описує динаміку протікання струму через обмотку якоря під дією напруги;

$$W_{\text{як}}(p) = \frac{1/R_{\Sigma}}{T_{\text{е}}p + 1}$$

2. Передавальна функція оптимізованого контура напруги, яка враховує внутрішні динамічні процеси регуляції напруги, описані формулою (2.2);
3. Передавальна функція ланцюга зворотного зв'язку по струму:

$$W_{\text{зт}}(p) = \frac{k_{\text{т}}}{T_{\text{дт}}p + 1}$$

де $T_{\text{дт}}$ – постійна часу датчика струму, а $k_{\text{т}}$ – коефіцієнт підсилення ланцюга зворотного зв'язку по струму.

Регулятор струму $W_{\text{рт}}(p)$ забезпечує формування керуючого впливу, що подається на якір двигуна, для досягнення бажаної динаміки струму та стабільності системи. Алгоритмічна схема функціонування контура струму наведена на рис. 2.6 і відображає взаємодію всіх складових елементів: двигуна, оптимізованого контура напруги, датчика струму та регулятора струму.

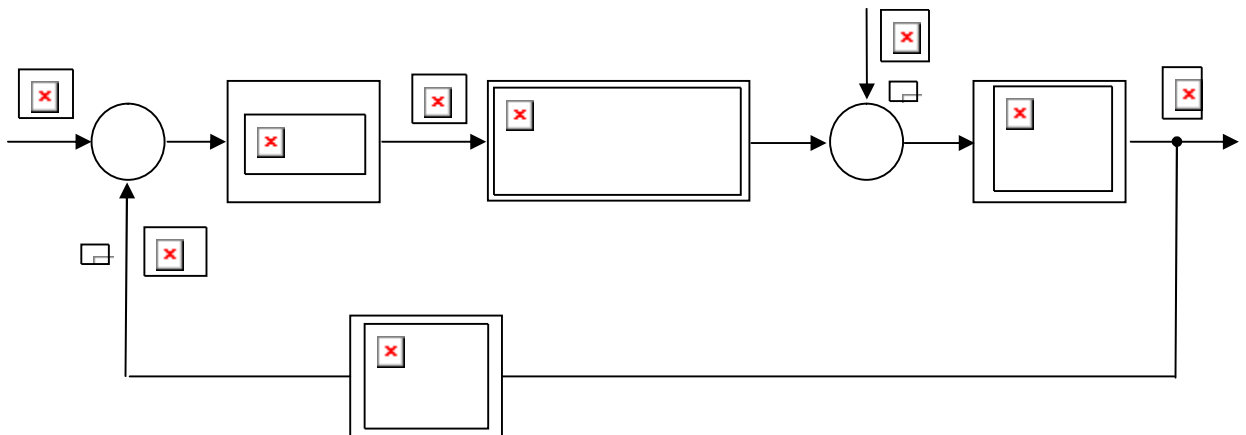


Рисунок 2.6 – Алгоритмічна схема контуру струму

Ця схема, подібно до контуру напруги, може бути перетворена до структури з одиничним зворотним зв'язком, що значно спрощує подальший синтез послідовного корегуючого пристрою (рис. 2.7). На схемі показана модифікація контуру струму після нормалізації зворотного зв'язку до одиничного коефіцієнта. Такий підхід дозволяє застосувати стандартні методики синтезу ПІ-регулятора для забезпечення бажаної динаміки контуру, враховуючи взаємодію

з оптимізованим контуром напруги та характеристиками якірного ланцюга двигуна.

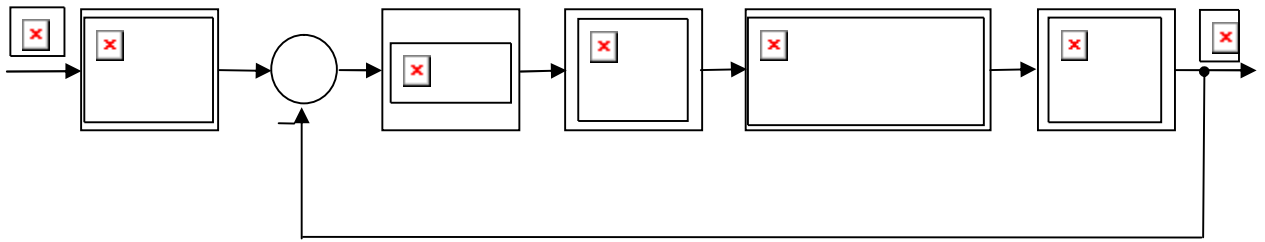


Рисунок 2.7 – Алгоритмічна схема контуру струму
з одиничним зворотним зв'язком

Мала, некомпенсована постійна часу контуру струму $T_{\mu 0}$ визначається з практичною точністю за формулою:

$$T_{\mu t} = 2T_{\mu n} + T_{dt}$$

При припущенні $T_{dt} = 0$ отримуємо $T_{\mu t} = 2T_{\mu n} = 0,01 \text{ с}$.

На схемі рис.2.8. зображено розрахункову структуру замкненого контуру струму після урахування малих постійних часу та переходу до спрощеної апериодичної моделі. Ця схема використовується для обчислення передавальної функції регулятора та визначення параметрів ПІ-коректора, що забезпечують оптимальну швидкодію та стабільність внутрішнього контуру.

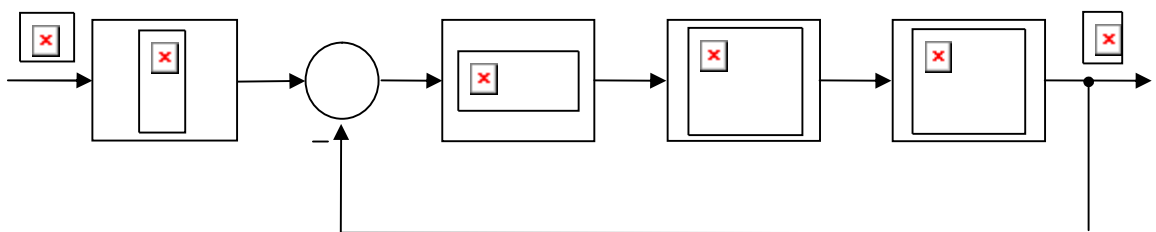


Рисунок 2.8 – Розрахункова алгоритмічна схема контуру струму,
що використовується для визначення параметрів регулятора.

Контур струму оптимізується за модульним критерієм, і бажана передавальна функція розімкненого контуру має вигляд:

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

Передавальна функція об'єкта регулювання контуру струму визначається як:

$$W_{\text{от}}(p) = \frac{1/k_{\text{н}} \cdot 1/R_{\Sigma} \cdot k_{\text{т}}}{(T_{\text{мт}}p + 1)(T_{\text{е}}p + 1)};$$

Передавальна функція регулятора контура струму

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{k_{\text{н}}R_{\Sigma}}{2T_{\text{мт}}k_{\text{т}}} \cdot \frac{T_{\text{е}}p + 1}{p}.$$

Як слідує з передавальної функції, оптимальний регулятор напруги є ПІ-регулятором.

Коефіцієнт посилення ланцюга зворотного зв'язку по струму розраховується з умови, що максимальна напруга на виході датчика струму $U_{\text{дт max}} = 24\text{В}$ відповідає максимальному струму робочого перевантаження двигуна $I_{\text{д max}} = 2,5I_{\text{н}} = 2,5 \cdot 3180 = 7950\text{А}$

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

$$k_{\text{т}} = \frac{24}{7950} = 3,02 \cdot 10^{-3} \text{В} / \text{А}.$$

Передавальна функція замкнутого контура струму після оптимізації за модульним критерієм набуває вигляду:

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

2.9 Синтез послідовного коригуючого пристрою контуру регулювання швидкості

Контур швидкості виконує роль зовнішнього регулюючого контуру, тому його динамічні характеристики безпосередньо визначають поведінку всієї системи підлеглого управління. Правильне проектування цього контуру є критично важливим, оскільки від нього залежить точність і швидкодія механізму електроприводу.

Контур швидкості включає такі ключові елементи:

1. Механічну частину електроприводу, яка представлена передавальною функцією:

$$W_{\text{м}}(p) = \frac{k_{\text{д}} R_{\Sigma}}{T_{\text{м}}}$$

2. Оптимізований внутрішній контур струму з передатною функцією (2.2), що забезпечує швидке та стабільне реагування на команду регулятора.

3. Ланцюг зворотного зв'язку по швидкості з передатною функцією:

$$W_{\text{зш}}(p) = \frac{k_{\text{ш}}}{T_{\text{дш}} p + 1},$$

де $T_{\text{дш}}$ – постійна часу датчика швидкості, що реалізується за допомогою тахогенератора постійного струму;

$k_{\text{ш}}$ – коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку, що визначає співвідношення вихідного сигналу тахогенератора до реальної швидкості двигуна.

Регулятор швидкості $W_{\text{рш}}(p)$ забезпечує формування керуючого сигналу на вхід електроприводу.

Алгоритмічна схема зовнішнього контуру швидкості зображена на рис. 2.9. Схема демонструє основні компоненти контуру: механічну частину, оптимізований контур струму, регулятор швидкості та систему зворотного

зв'язку. Вона слугує базою для подальшого структурного перетворення та оптимізації.

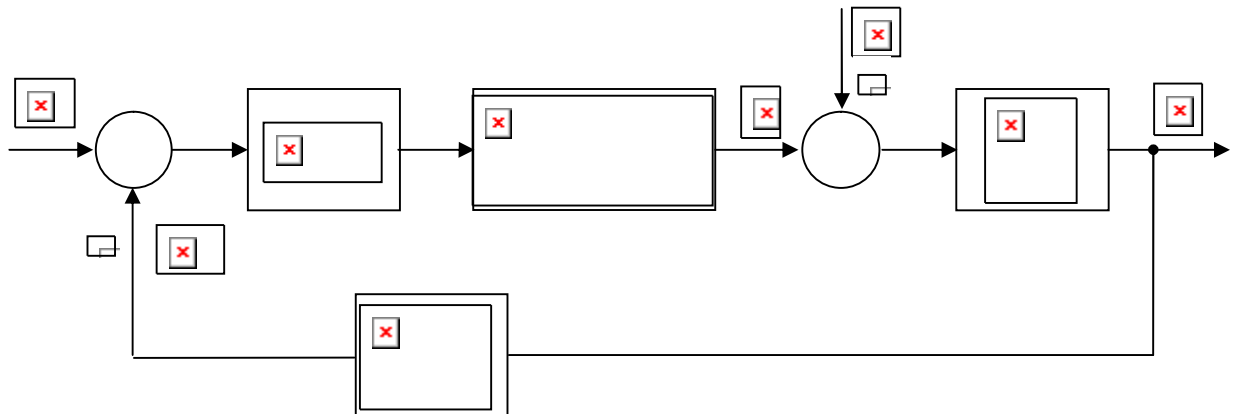


Рисунок 2.9 – Алгоритмічна схема зовнішнього контуру швидкості

Для зручності синтезу регулятора контур швидкості може бути перетворений у структуру з одиничним зворотним зв'язком, як показано на рис. 2.10. Це дозволяє застосувати стандартну методику оптимізації та визначити параметри регулятора для зовнішнього контуру.

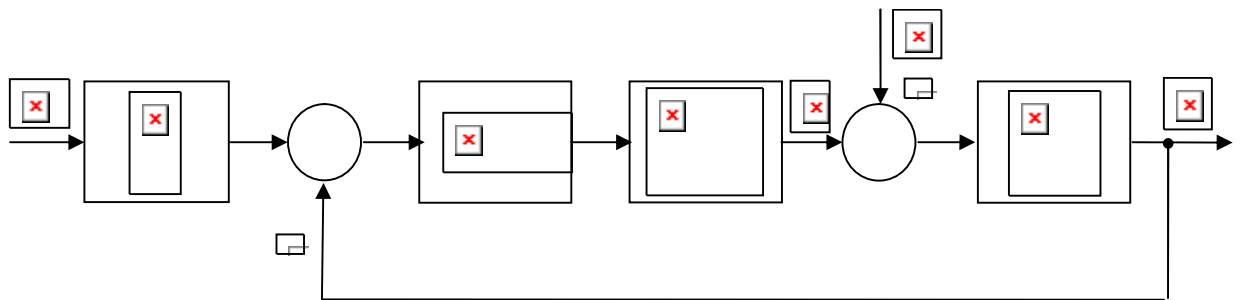


Рисунок 2.10 – Розрахункова алгоритмічна схема контуру швидкості

Мала, некомпенсована постійна часу контуру швидкості визначається як:

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

Приймаючи $T_{\text{дс}} = 0$, отримуємо $T_{\mu\text{ш}} = 2T_{\mu\text{т}} = 0,02 \text{ с.}$

Контур швидкості оптимізуємо по симетричному критерію.

Оптимізація здійснюється по симетричному критерію.

Бажана передавальна функція контуру швидкості після оптимізації за симетричним критерієм має вигляд:

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

Передавальна функція об'єкта регулювання:

$$W_{\text{ош}}(p) = \frac{k_{\text{ш}} k_{\text{д}} R_{\Sigma}}{T_{\text{м}} k_{\text{т}}} \cdot \frac{1}{p(1 + T_{\mu\text{ш}}p)}.$$

Передавальна функція регулятора зовнішнього контуру:

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

тобто також ПІ-регулятор.

Коефіцієнт посилення зворотного зв'язку по швидкості $k_{\text{ш}}$ визначається на основі максимального значення швидкості двигуна ω_{max} та вихідної напруги задаючого елемента $U_{\text{зш max}}$:

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

Приймаємо $U_{\text{зш max}} = 24 \text{ В}$, а ω_{max} рівною швидкості ідеального холостого ходу двигуна ω_0 ;

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

$$\omega_0 = 600 \cdot 0,0062 = 3,73 \text{ c}^{-1}$$

$$k_{\text{ш}} = \frac{24}{3,73} = 6,43 \text{ B / c}^{-1}$$

На рис. 2.11.показана повна структура підлеглого регулювання, що включає внутрішній контур напруги, проміжний контур струму та зовнішній контур швидкості. Схема дозволяє визначати передавальні функції по задаючій та збудуючій діях, формувати управляючий вплив на електропривод та забезпечує узгоджену роботу всіх трьох контурів.

Передавальні функції по задаючій $U_{\text{зш}}(t)$ та по збудуючій $I_{\text{ст}}(t)$ діях визначаються як:

$$W_{\omega_d U_{\text{зш}}}(p) = \frac{\omega_d(p)}{U_{\text{зш}}(p)} = \frac{1}{k_{\text{ш}}} \cdot \frac{1 + 4T_{\text{мш}}p}{8T_{\text{мш}}^3 p^3 + 8T_{\text{мш}}^2 p^2 + 4T_{\text{мш}}p + 1},$$

$$W_{\omega_d I_{\text{ст}}}(p) = \frac{\omega_d(p)}{I_{\text{ст}}(p)} = -\frac{k_d \cdot R_{\Sigma} \cdot 8T_{\text{мш}}^2}{T_{\text{м}}} \cdot \frac{p \cdot (1 + T_{\text{мш}}p)}{8T_{\text{мш}}^3 p^3 + 8T_{\text{мш}}^2 p^2 + 4T_{\text{мш}}p + 1},$$

$$W_{I_d U_{\text{зш}}}(p) = \frac{I_d(p)}{U_{\text{зш}}(p)} = \frac{T_{\text{м}}}{k_d R_{\Sigma} k_{\text{ш}}} \cdot \frac{p(1 + 4T_{\text{мш}}p)}{8T_{\text{мш}}^3 p^3 + 8T_{\text{мш}}^2 p^2 + 4T_{\text{мш}}p + 1},$$

$$W_{I_d I_{\text{ст}}}(p) = \frac{I_d(p)}{I_{\text{ст}}(p)} = \frac{1 + 4T_{\text{мш}}p}{8T_{\text{мш}}^3 p^3 + 8T_{\text{мш}}^2 p^2 + 4T_{\text{мш}}p + 1}.$$

2.10 Аналіз перехідних процесів та оцінка динамічних показників роботи системи

Важливим етапом розробки системи підлеглого регулювання є аналіз її динамічних характеристик з метою оцінки поведінки електроприводу при різних впливах та налаштуванні параметрів регуляторів. Для цього було використано пакет прикладних програм MATLAB, який дозволяє проводити детальне

моделювання перехідних процесів як за допомогою передавальних функцій системи, так і за допомогою рівнянь стану, що описують динаміку всіх контурів. Крім того, моделювання проводилось у середовищі SIMULINK, що забезпечує наочне представлення алгоритмічної схеми системи та дозволяє проводити експерименти зі зміною параметрів регуляторів.

На рис. 2.12 представлена схема системи, яка була використана для проведення моделювання, включаючи всі три контури підлеглого регулювання: внутрішній контур напруги, проміжний контур струму та зовнішній контур швидкості.

Результати моделювання у вигляді графіків перехідних процесів наведені на рис. 2.13 – 2.16, де показано зміну швидкості ω_d , струму I_d та напруги U_d двигуна як по задаючій, так і по збурюючій дії. Аналіз кривих показав, що при первинному налаштуванні швидкості по симетричному критерію спостерігається значне перерегулювання швидкості, що досягає 43%, що є неприйнятним для стабільного керування механізмом.

Для зменшення цього перерегулювання було введено фільтр аперіодичного типу на вхід зовнішнього контуру швидкості з певною постійною часу $4T_{\text{цв}}$. Після встановлення фільтра перерегулювання знизилося до 8,1%, що відповідає вимогам до динамічної точності системи. На графіках рис. 2.13 та 2.14 криві, що відповідають системі з фільтром і без фільтру, позначені цифрами 1 та 2 відповідно, що дозволяє наочно порівняти ефект застосування фільтру на динаміку системи.

Аналогічні результати моделювання були отримані як по передавальних функціях системи, так і за допомогою рівнянь стану, що підтверджує коректність математичної моделі. Всі вихідні дані для розрахунків наведені у додатку А, що забезпечує повторюваність та перевірку результатів моделювання.

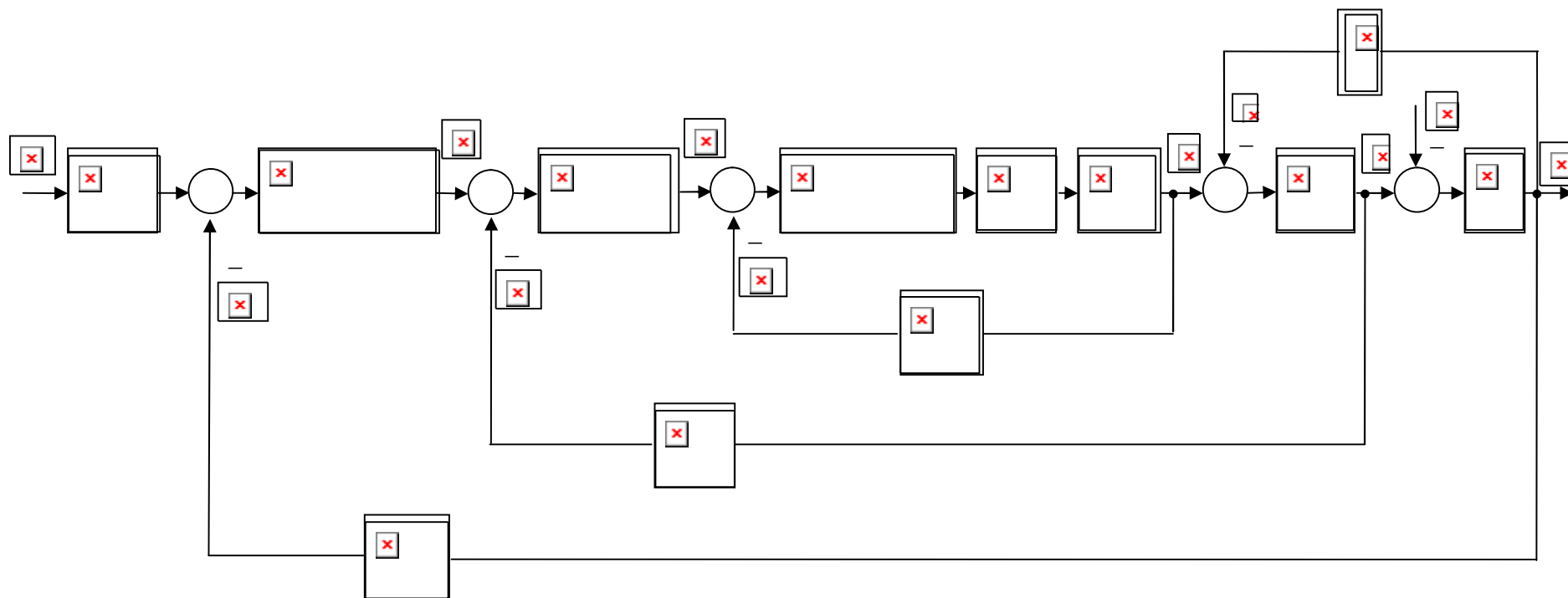


Рисунок 2.11 – Структурна схема трьохконтурної системи підлеглого регулювання швидкості електроприводу Г-Д

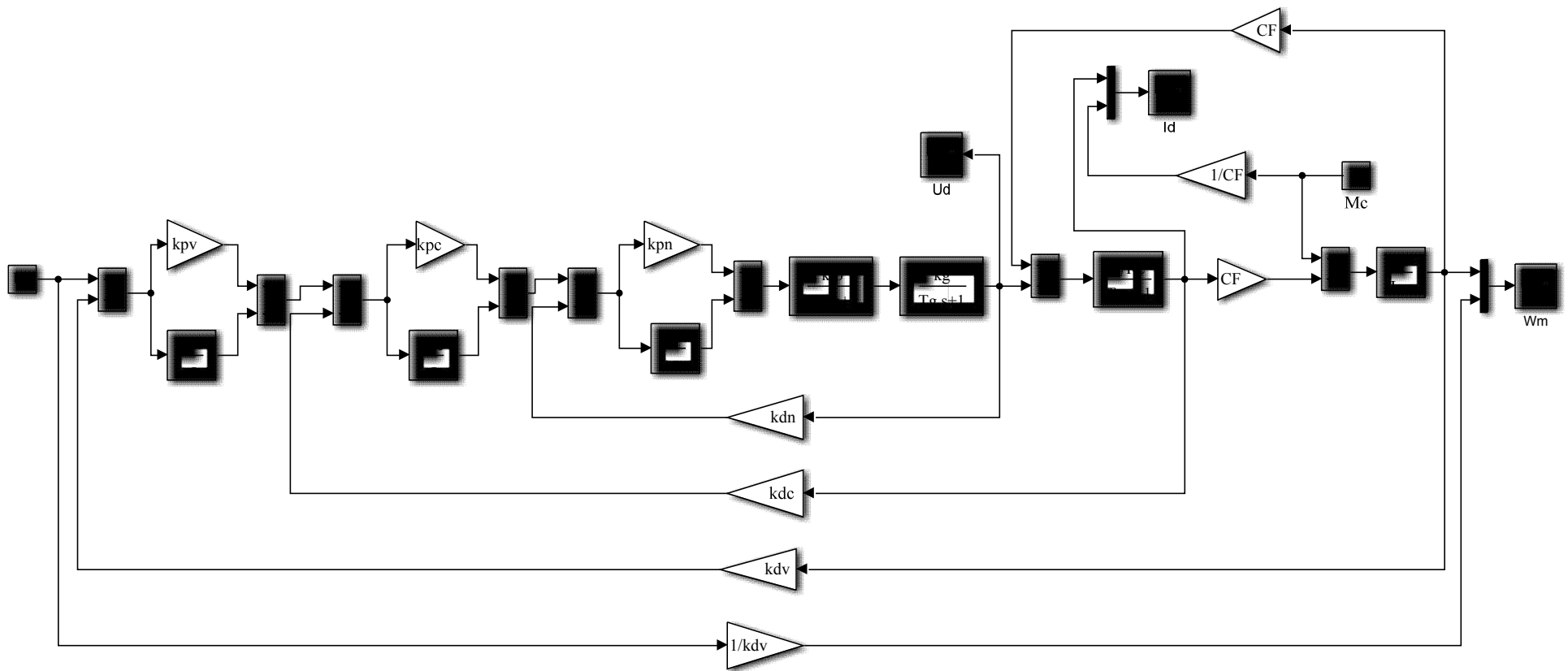
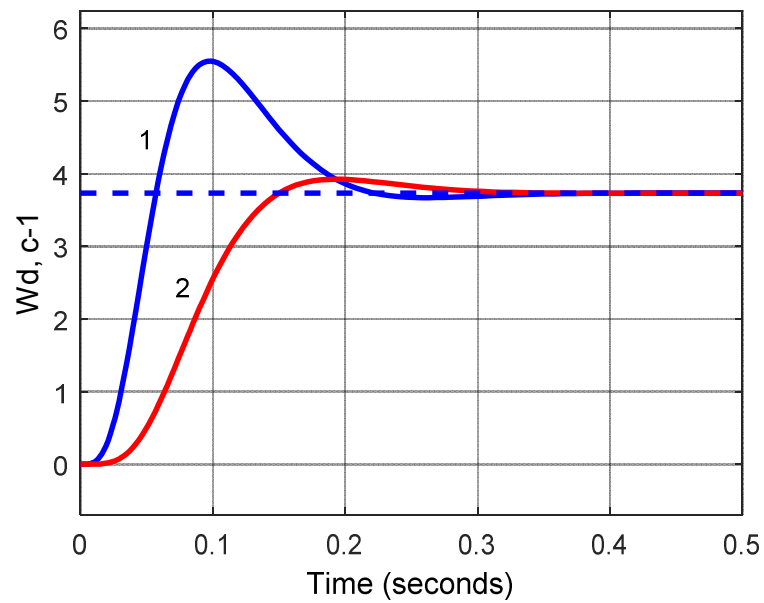
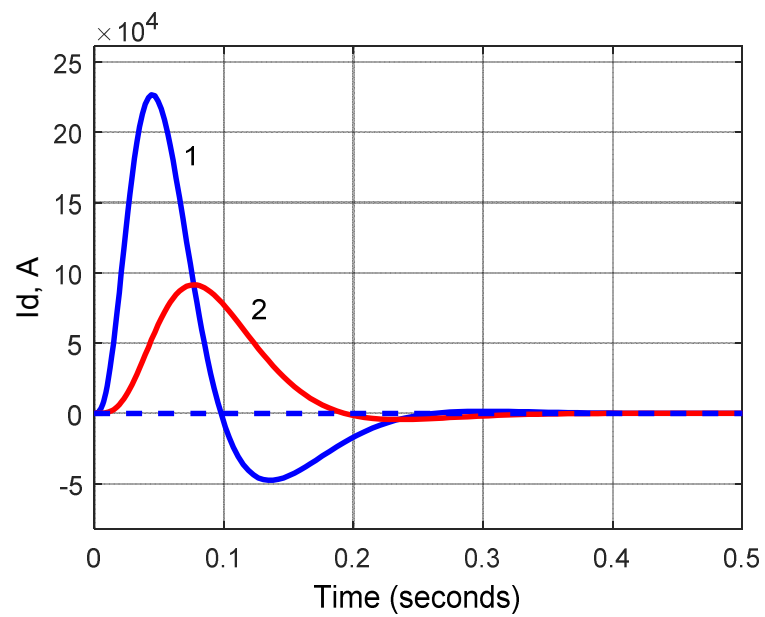


Рисунок 2.12 – Модель системи підлеглого регулювання, реалізована у середовищі MATLAB/SIMULINK.



a)



б)

Рисунок 2.13 – Перехідні процеси по задаючій дії:

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

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

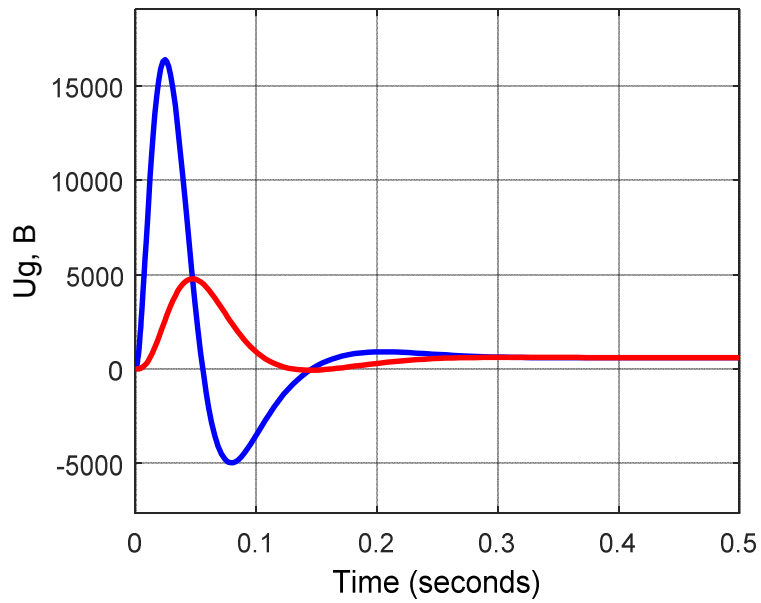


Рисунок 2.14 – Перехідні процеси напруги $U_d = f(t)$
по залаючій дії

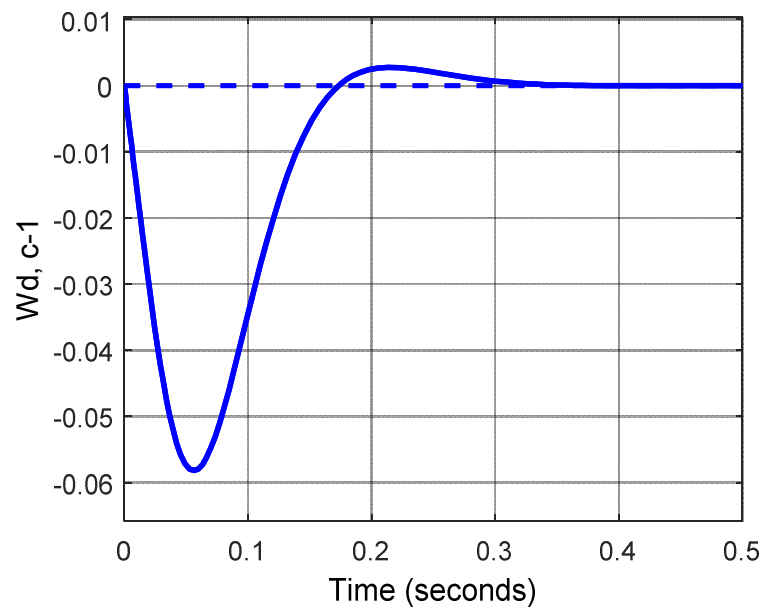
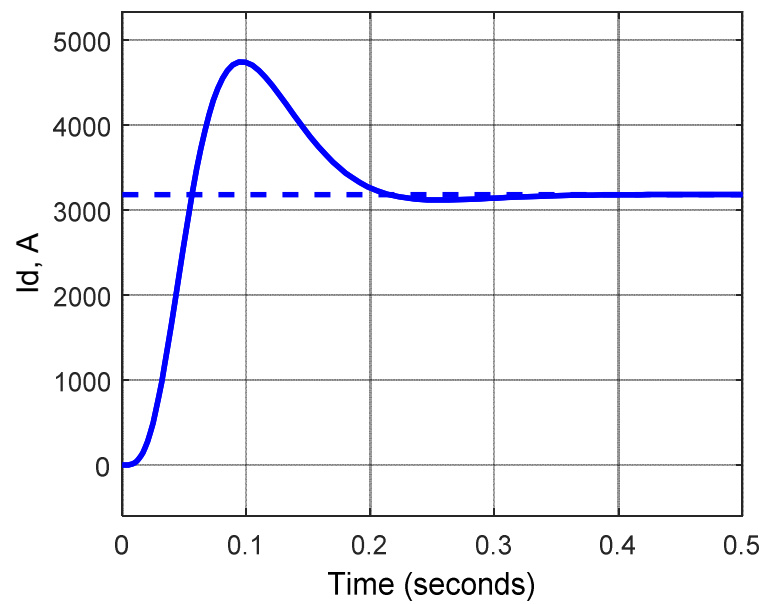
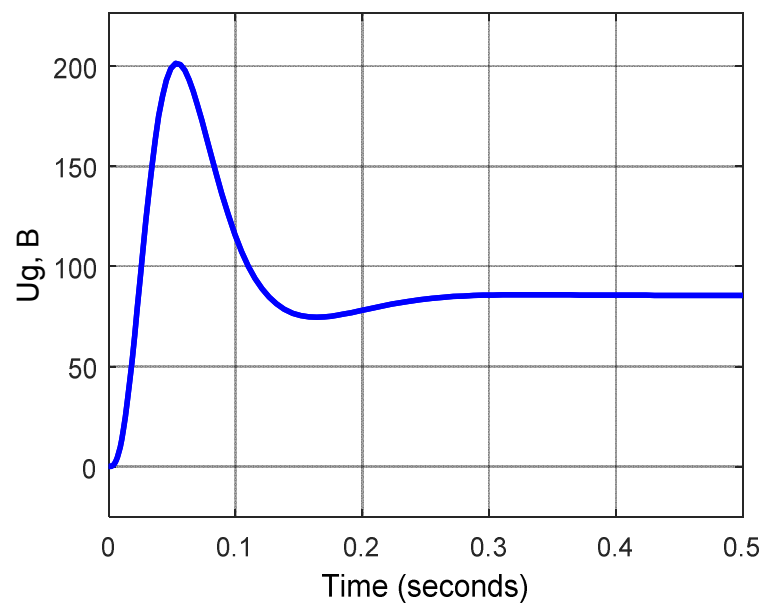


Рисунок 2.15 – Перехідний процес швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$
по збурюючій дії



a)



б)

Рисунок 2.16 – Перехідні процеси по збурюючій дії:

а) – струм двигуна $I_d = f(t)$;

б) – напруга $U_d = f(t)$ на виході регулятора.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. На основі аналізу умов експлуатації та технічних параметрів підйомних машин встановлено, що найбільш доцільним рішенням для приводу головного підйому є застосування безредукторного електропривода постійного струму, реалізованого за схемою «генератор – двигун» (Г–Д). Така конфігурація забезпечує необхідний діапазон регулювання, високу плавність пуску та гальмування і достатню надійність у важких режимах роботи шахтних підйомних установок.

2. Виконано вибір електродвигуна та елементів силового кола привода. Проведена перевірка двигуна за перевантажувальною здатністю підтвердила його відповідність експлуатаційним вимогам: допустиме короткочасне перевантаження двигунів постійного струму становить значення, яке повністю задовольняє умови роботи підйомної машини. Додатково здійснено оцінку нагрівання та теплової стійкості машини, що підтвердило правильність вибору моделі двигуна.

3. Виконано повний розрахунок параметрів силового кола електропривода, які використовуються як вихідні дані для подальшого синтезу системи автоматичного регулювання. Отримані параметри лінійно-електричних та електромагнітних ланок забезпечують коректне моделювання динаміки привода.

4. Обґрунтовано та вибрано структуру системи автоматичного керування. Для забезпечення необхідних статичних та динамічних характеристик електропривода, стабільності його роботи в різних режимах та формування якісних перехідних процесів прийнято трирівневу систему підлеглого регулювання – з внутрішніми контурами напруги та струму і зовнішнім контуром швидкості. Така структура є найбільш ефективною для електроприводів підйомних установок, де пред'являються вимоги до точності позиціонування, плавності ходу та енергоефективності.

5. Проведено синтез послідовних коригувальних пристроїв для кожного з контурів системи. Оскільки форма перехідних процесів значною мірою зале-

жить від співвідношень часових констант елементів, корекція системи виконана шляхом введення відповідних регуляторів.

У результаті синтезовано ПІ-регулятори для контурів напруги, струму та швидкості. Контур напруги та струму оптимізовано згідно з модульним критерієм, тоді як контур швидкості – за симетричним критерієм. Це забезпечило виконання вимог технічного завдання: система стала астатичною другого порядку за задавальним впливом і першого порядку за збуренням.

6. Для перевірки працездатності синтезованої системи проведено моделювання на ЕОМ із використанням програмного пакета MATLAB. У середовищі SIMULINK побудовано модель трьохконтурної структури, на основі якої отримано перехідні процеси за задавальним і збурюючим впливами. Додатково динаміка системи проаналізована за допомогою передавальних функцій та векторно-матричного опису стану.

Моделювання показало, що при налаштуванні контуру швидкості за симетричним критерієм виникає значне перерегулювання (близько 43%). Для його зменшення на вхід системи введено фільтр зі сталою часу $4T_{\mu\phi}$, що дозволило знизити перерегулювання до прийнятного рівня – приблизно 8%. Це підтвердило ефективність застосованої корекції та адекватність обраної структури автоматичного привода.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДЙОМНОГО КАНАТА

3.1 Побудова математичної моделі двомасової системи

Попередні розрахунки системи підлеглого регулювання були проведені за припущенням, що всі елементи механічної частини системи, включаючи підйомний канат, мають нескінченну жорсткість. Такий підхід відповідає одномасовій моделі, де механічна частина системи представлена єдиною масою.

Проте у реальних умовах усі з'єднання між елементами механізму мають кінцеву жорсткість, а підйомний канат слід розглядати як пружний елемент з розподіленими масовими параметрами. При цьому можна знехтувати рядом другорядних чинників. Зокрема, канат можна вважати консервативним елементом, оскільки демпфуючі сили, що виникають за рахунок роботи двигуна та тертя підйомної судини об направляючі, значно перевищують сили внутрішнього тертя в канаті. Також можна знехтувати незначною нерівномірністю розподілу маси по довжині каната, що зумовлена його власною вагою.

В даному дослідженні основну увагу приділено подовжнім коливанням каната, оскільки поперечні та крутильні коливання впливають на процеси системи незначно. Найбільший вплив на динаміку системи має навантажена гілка каната, коли підйомний скип перебуває в крайньому нижньому положенні. Тривалість перехідного процесу при розгоні є невеликою, а зміна довжини каната через його намотування на барабан практично не впливає на загальну довжину, тому жорсткість каната в інтервалі розгону приймається незмінною.

Відповідно до цих допущень, розрахункову схему механічної підйомної установки можна звести до двох зосереджених мас m_1 і m_2 , сполучених між собою ідеально пружним стрижнем (рис. 3.1).

У технічній літературі описані методики розрахунку такої системи, проте вони доволі складні для практичного використання. Для спрощення аналізу ме-

ханічну частину підйомної установки можна розглядати як трьохмасову систему, де підйомний канат представлений зосередженою масою, пов'язаною з двома іншими масами еквівалентними невагомими пружними зв'язками. При необхідності можна перейти до двомасової моделі з приведеними масами, сполученими невагомим канатом із заданою жорсткістю.

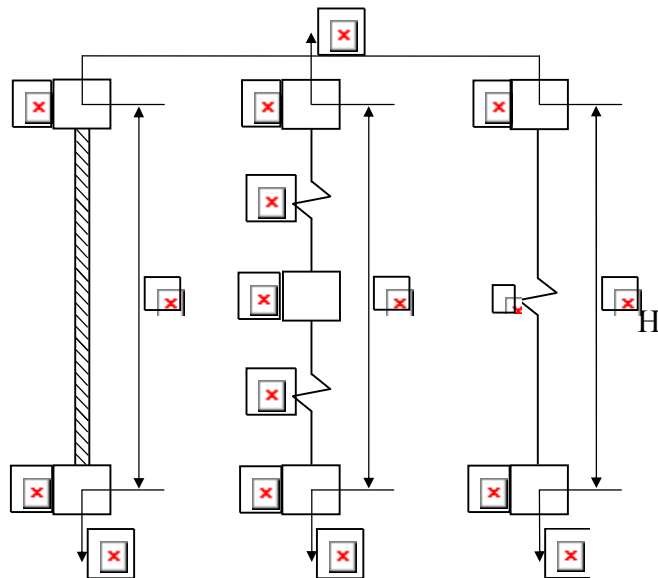


Рисунок 3.1 – Розрахункові моделі механічної частини приводу підйомної установки

Для подальших розрахунків були визначені приведені маси μ_1 , μ_2 і μ_k які залежать від глибини підйому. Відомі зосереджені маси: ведуча маса двигуна $J1J_1J1$, маса каната JcJ_cJc і маса скипа $J2J_2J2$. Загальна сумарна приведена маса:

У попередньому розділі були визначені відносні приведені маси μ_1 , μ_2 і μ_k , які залежать від глибини підйому. Маса приводу m_1 , маса підйомної посудини m_2 та приведена маса каната m_k визначаються наступним чином:

$$m_1 = \mu_1 m \quad m_2 = \mu_2 m \quad m_k = \mu_k m,$$

де $m = m_1 + m_2 + m_{1k} \cdot H$ - сумарна приведена маса системи;

$m_{1к}$ - маса одиниці довжини каната.

У технічних розрахунках підйомний канат розглядають як елемент із зосередженою масою, який з'єднаний із масами m_1 і m_2 невагомими пружними ланками з жорсткістю c_1 і c_2 , Тобто формується трьохмасова система, яку для спрощення можна замінити двомасовою, де приведені маси $m_1' = m_1 + m_k/2$ і $m_2' = m_2 + m_k/2$ з'єднані канатом із жорсткістю c_{12} .

Динамічні процеси в трьохмасовій механічній системі описуються рівняннями руху:

$$\begin{cases} J_{л\Sigma} \frac{d\omega_{\Sigma}}{dt} = k\Phi I_{\Sigma} - M_{\Sigma 1}; \\ J_{\kappa} \frac{d\omega_{\kappa}}{dt} = M_{\Sigma 1} - M_{\Sigma 2}; \\ J_{\mu} \frac{d\omega_{\mu}}{dt} = M_{\Sigma 2} - M_{\sigma\tau}; \\ \frac{dM_{\text{пр1}}}{dt} = c_1(\omega_{\Sigma} - \omega_{\kappa}); \\ \frac{dM_{\text{пр2}}}{dt} = c_2(\omega_{\kappa} - \omega_{\mu}), \end{cases} \quad (3.1)$$

де $M_{\Sigma 1}$, $M_{\Sigma 2}$ – моменти, що передаються пружними елементами

$$M_{\Sigma 1} = M_{\text{пр1}} + M_{\text{вт1}}, \quad M_{\Sigma 2} = M_{\text{пр2}} + M_{\text{вт2}} \quad (3.2)$$

$M_{\text{пр1}}$, $M_{\text{пр2}}$ – моменти пружної взаємодії між масами трьохмасової системи;

$M_{\text{вт1}}$, $M_{\text{вт2}}$ – моменти внутрішнього в'язкого тертя;

$$M_{\text{вт1}} = \beta_1(\omega_{\Sigma} - \omega_{\kappa}); \quad M_{\text{вт2}} = \beta_2(\omega_{\kappa} - \omega_{\mu}), \quad (3.3)$$

β_1 , β_2 – параметри внутрішнього демпфування ділянок каната, що розташовані між приведеними масами.

Для двомасової системи рівняння руху мають більш спрощений вигляд:

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

де сумарний момент M_Σ визначається як сума пружного моменту $M_{\text{пр}}$ та моменту в'язкого тертя. $M_{\text{вт}} = \beta(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{м}})$:

$$M_\Sigma = M_{\text{пр}} + \beta(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{м}}), \quad (3.5)$$

β – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя каната між зосередженими масами.

Далі розглянемо трьохмасову систему.

Система (3.1), доповнена співвідношеннями (3.2) і (3.3), може бути записана у формі Коші:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} = \frac{1}{J_{\text{м}}} M_{\text{пр2}} + \frac{\beta_2}{J_{\text{м}}} \omega_{\text{к}} - \frac{\beta_2}{J_{\text{м}}} \omega_{\text{м}} - \frac{1}{J_{\text{м}}} M_{\text{ст}}; \\ \frac{dM_{\text{пр1}}}{dt} = c_1 \omega_{\text{д}} - c_1 \omega_{\text{к}}; \\ \frac{d\omega_{\text{к}}}{dt} = \frac{1}{J_{\text{к}}} M_{\text{пр1}} - \frac{\beta_1}{J_{\text{к}}} \omega_{\text{д}} + \frac{\beta_1}{J_{\text{к}}} \omega_{\text{к}} - \frac{1}{J_{\text{к}}} M_{\text{пр2}} - \frac{\beta_2}{J_{\text{к}}} \omega_{\text{к}} + \frac{\beta_2}{J_{\text{к}}} \omega_{\text{м}}; \\ \frac{dM_{\text{пр2}}}{dt} = c_2 \omega_{\text{к}} - c_2 \omega_{\text{м}}; \\ \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{k\Phi_{\text{н}}}{J_{\text{д}\Sigma}} I_{\text{д}} - \frac{1}{J_{\text{д}\Sigma}} M_{\text{пр1}} - \frac{\beta_1}{J_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{д}} + \frac{\beta_1}{J_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{к}}. \end{cases} \quad (3.6)$$

Розглянемо спочатку алгоритмічну схему одномасової системи, яку було приведено в попередньому розділі, і випишемо для неї рівняння стану, ігноруючи поки що пружні зв'язки між елементами механічної частини. Отримана таким чином модель відображає динаміку електричної частини приводу та механічного блока за умови жорстких (нерозтяжних) зв'язків. Далі до цієї базової одномасової моделі додамо рівняння, що описують пружну взаємодію між мамами тримасової системи – у результаті отримаємо повну систему диференціальних рівнянь стану, яка враховує пружні коливання механічної частини.

Запис рівнянь стану для одномасової моделі має вигляд :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{k\Phi_{\text{н}}}{J_{\text{д}\Sigma}} I_{\text{д}} - \frac{1}{J_{\text{д}\Sigma}} M_{\text{ст}}; \\ \frac{dI_{\text{д}}}{dt} = -\frac{k\Phi_{\text{н}}}{R_{\Sigma}T_{\text{е}}} \omega_{\text{д}} - \frac{1}{T_{\text{е}}} I_{\text{д}} + \frac{1}{R_{\Sigma}T_{\text{е}}} U_{\text{г}}; \\ \frac{dU_{\text{г}}}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{г}}} U_{\text{г}} + \frac{k_{\text{г}}}{T_{\text{г}}} U_{\text{тп}}; \\ \frac{dU_{\text{тп}}}{dt} = -\frac{k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\mu\text{н}}} \omega_{\text{д}} - \frac{k_{\text{т}}k_{\text{пт}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\mu\text{н}}} I_{\text{д}} - \frac{k_{\text{н}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\mu\text{н}}} U_{\text{г}} - \frac{1}{T_{\mu\text{н}}} U_{\text{тп}} - \frac{k_{\text{тп}}}{T_{\mu\text{н}}} U_{\text{рн}} - \\ - \frac{k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\mu\text{н}}} U_{\text{рт}} + \frac{k_{\text{пн}}k_{\text{пт}}k_{\text{тп}}}{T_{\mu\text{н}}} U_{\text{рш}} + \frac{k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\mu\text{н}}} U_{\text{з}}; \\ \frac{dU_{\text{рн}}}{dt} = -k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{ін}} \omega_{\text{д}} - k_{\text{т}}k_{\text{пт}}k_{\text{ін}} I_{\text{д}} - k_{\text{н}}k_{\text{ін}} U_{\text{г}} + k_{\text{ін}} U_{\text{рт}} + k_{\text{пт}}k_{\text{ін}} U_{\text{рш}} + k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{ін}} U_{\text{з}}; \\ \frac{dU_{\text{рт}}}{dt} = -k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{іт}} \omega_{\text{д}} - k_{\text{іт}}k_{\text{т}} I_{\text{д}} + k_{\text{іт}} U_{\text{рш}} + k_{\text{пш}}k_{\text{іт}} U_{\text{з}}; \\ \frac{dU_{\text{рш}}}{dt} = -k_{\text{ш}}k_{\text{іш}} \omega_{\text{д}} + k_{\text{іш}} U_{\text{з}}. \end{array} \right. \quad (3.7)$$

ри формуванні цих рівнянь введено та використовуються такі позначення:

$U_{\Gamma}(t)$ $U_{\text{тп}}(t)$ – напруга, що подається від генератора на якір двигуна;

$U_{\text{тп}}(t)$ – напруга, що подається на обмотку збудження генератора від тиристорного перетворювача:

$U_{\text{рн}}(t)$, $U_{\text{рт}}(t)$, $U_{\text{рш}}(t)$ – виходи інтегральних частин відповідно регуляторів напруги, струму та швидкості (тобто інтегральні складові ПІ-регуляторів);

$k_{\text{пш}}$, $k_{\text{шш}}$, $k_{\text{пт}}$, $k_{\text{ит}}$, $k_{\text{пн}}$, $k_{\text{ін}}$ – коефіцієнти підсилення пропорційних та інтегральних складових регуляторів для контурів швидкості, струму і напруги. Значення цих коефіцієнтів визначаються із відповідних передавальних функцій регуляторів:

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

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

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

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

$$W_{\text{рн}}(p) = \frac{1}{2T_{\text{мн}}k_{\text{г}}k_{\text{тп}}k_{\text{н}}} \frac{T_{\text{г}}p + 1}{p} = \frac{T_{\text{г}}}{2T_{\text{мн}}k_{\text{г}}k_{\text{тп}}k_{\text{н}}} + \frac{1}{2T_{\text{мн}}k_{\text{г}}k_{\text{тп}}k_{\text{н}}} \frac{1}{p} = k_{\text{пн}} + \frac{k_{\text{ін}}}{p},$$

$$k_{\text{пн}} = \frac{T_{\text{г}}}{2T_{\text{мн}}k_{\text{г}}k_{\text{тп}}k_{\text{н}}}, \quad k_{\text{ін}} = \frac{1}{2T_{\text{мн}}k_{\text{г}}k_{\text{тп}}k_{\text{н}}},$$

Під час формування системи рівнянь (3.7) величини T_m та k_d не використовуються безпосередньо – замість них підставлено відповідні аналітичні вирази, що пов'язують ці змінні з параметрами електроприводу:

$$T_m = J_{д\Sigma} \cdot \frac{R_{я\Sigma}}{(k\Phi_n)^2}; \quad k_d = \frac{1}{k\Phi_n}.$$

Крім того, при побудові моделі приймається, що постійними часу датчиків напруги $T_{дн}$, струму $T_{дт}$ і швидкості $T_{дш}$ 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 тримасової механічної підсистеми (рівняння (3.6) та (3.5)). Комбінування дає систему диференціальних рівнянь стану тримасової системи в узагальненому вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned}
\frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} &= \frac{1}{J_{\text{м}}} M_{\text{пп2}} + \frac{\beta_2}{J_{\text{м}}} \omega_{\text{к}} - \frac{\beta_2}{J_{\text{м}}} \omega_{\text{м}} - \frac{1}{J_{\text{м}}} M_{\text{ст}}; \\
\frac{dM_{\text{пп1}}}{dt} &= c_1 \omega_{\text{д}} - c_1 \omega_{\text{к}}; \\
\frac{d\omega_{\text{к}}}{dt} &= \frac{1}{J_{\text{к}}} M_{\text{пп1}} - \frac{\beta_1}{J_{\text{к}}} \omega_{\text{д}} + \frac{\beta_1}{J_{\text{к}}} \omega_{\text{к}} - \frac{1}{J_{\text{к}}} M_{\text{пп2}} - \frac{\beta_2}{J_{\text{к}}} \omega_{\text{к}} + \frac{\beta_2}{J_{\text{к}}} \omega_{\text{м}}; \\
\frac{dM_{\text{пп2}}}{dt} &= c_2 \omega_{\text{к}} - c_2 \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{пп1}} - \frac{\beta_1}{J_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{д}} + \frac{\beta_1}{J_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{к}}; \\
\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{г}}; \\
\frac{dU_{\text{г}}}{dt} &= -\frac{1}{T_{\text{г}}} U_{\text{г}} + \frac{k_{\text{г}}}{T_{\text{г}}} U_{\text{тп}}; \\
\frac{dU_{\text{тп}}}{dt} &= -\frac{k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{мн}}} \omega_{\text{д}} - \frac{k_{\text{т}}k_{\text{пт}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{мн}}} I_{\text{д}} - \frac{k_{\text{н}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{мн}}} U_{\text{г}} - \frac{1}{T_{\text{мн}}} U_{\text{тп}} - \frac{k_{\text{тп}}}{T_{\text{мн}}} U_{\text{рн}} - \\
&\quad - \frac{k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{мн}}} U_{\text{рт}} + \frac{k_{\text{пн}}k_{\text{пт}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{мн}}} U_{\text{рш}} + \frac{k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{мн}}} U_{\text{з}}; \\
\frac{dU_{\text{рн}}}{dt} &= -k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{ін}} \omega_{\text{д}} - k_{\text{т}}k_{\text{пт}}k_{\text{ін}} I_{\text{д}} - k_{\text{н}}k_{\text{ін}} U_{\text{г}} + k_{\text{ін}} U_{\text{рт}} + k_{\text{пт}}k_{\text{ін}} U_{\text{рш}} + k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{ін}} U_{\text{з}}; \\
\frac{dU_{\text{рт}}}{dt} &= -k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{іт}} \omega_{\text{д}} - k_{\text{іт}}k_{\text{т}} I_{\text{д}} + k_{\text{іт}} U_{\text{рш}} + k_{\text{пш}}k_{\text{іт}} U_{\text{з}}; \\
\frac{dU_{\text{рш}}}{dt} &= -k_{\text{ш}}k_{\text{іш}} \omega_{\text{д}} + k_{\text{іш}} U_{\text{з}}.
\end{aligned} \right. \tag{3.8}$$

Структурно-алгоритмічне подання тримасової моделі, яка ілюструє вхідні та вихідні зв'язки, взаємодію регуляторів і пружних елементів, наведена на рис. 3.2. Ця схема служить наочним відображенням структурних зв'язків, що закладені в матричній моделі (3.8).

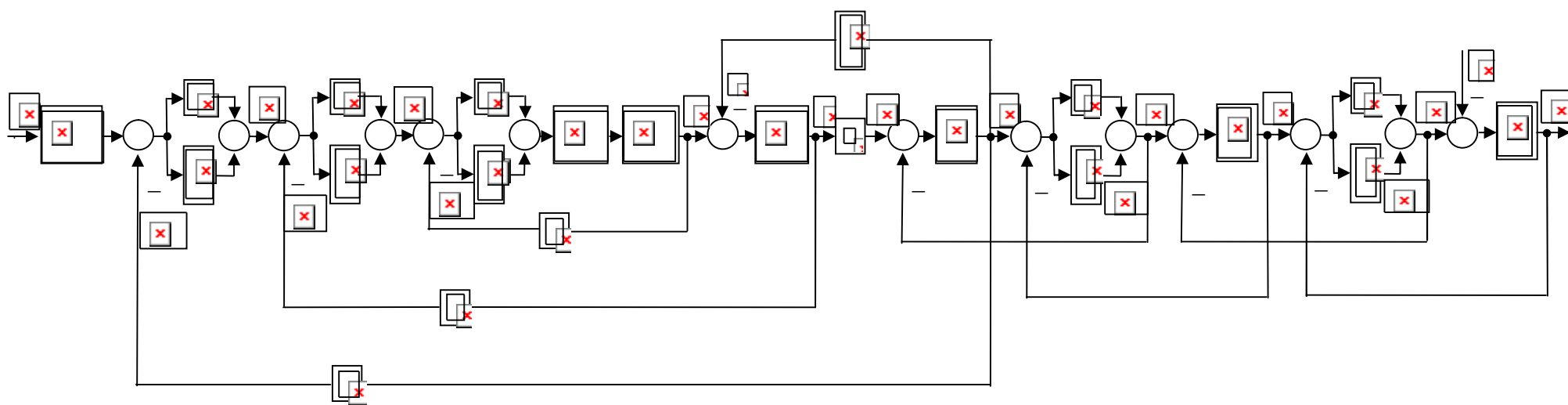


Рисунок 3.2 – Структурно-алгоритмічне подання тримасової моделі

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

$$\vec{X}(t) = [\omega_m(t), M_{\text{пр2}}(t), \omega_k(t), M_{\text{пр1}}(t), \omega_d(t), I_d(t), U_r(t), U_{\text{тп}}(t), U_{\text{рн}}(t), U_{\text{рт}}(t), U_{\text{рш}}(t)]^T$$

а також вектор зовнішніх впливів:

$$\vec{U}(t) = [U_3(t), M_{\text{ст}}(t)]^T$$

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 трьохмасової 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 трьохмасової 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** и **B** трьохмасової системи

	$\omega_{\text{м}}$	M_{np2}	$\omega_{\text{к}}$	M_{np1}	$\omega_{\text{д}}$	$I_{\text{д}}$	$U_{\text{г}}$	$U_{\text{тп}}$	$U_{\text{рн}}$	$U_{\text{рт}}$	$U_{\text{рш}}$		$U_{\text{з}}$	$M_{\text{ст}}$
A =	$-\frac{\beta_1}{J_{\text{м}}}$	$\frac{1}{J_{\text{м}}}$	$\frac{\beta_1}{J_{\text{м}}}$	0	0	0	0	0	0	0	0		0	$-\frac{1}{J_{\text{м}}}$
	$-c_2$		c_2			0	0	0	0	0	0			
	$\frac{\beta_2}{J_{\text{к}}}$	$-\frac{1}{J_{\text{к}}}$	$-\frac{\beta_1}{J_{\text{к}}} - \frac{\beta_2}{J_{\text{к}}}$	$\frac{1}{J_{\text{к}}}$	$\frac{\beta_1}{J_{\text{к}}}$	0	0	0	0	0	0		0	0
			$-c_1$		c_1	0	0	0	0	0	0		0	0
	$\frac{\beta}{J_{\text{д}\Sigma}}$	$-\frac{1}{J_{\text{д}\Sigma}}$	0	0	$-\frac{\beta}{J_{\text{д}\Sigma}}$	$\frac{k\Phi_{\text{н}}}{J_{\text{д}\Sigma}}$	0	0	0	0	0	B =	0	0
	0	0	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	0	0		0	0
	0	0	0	0	0	0	$-\frac{1}{T_{\text{г}}}$	$\frac{k_{\text{г}}}{T_{\text{г}}}$	0	0	0		0	0
	0	0	0	0	$-\frac{k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{μн}}}$	$-\frac{k_{\text{т}}k_{\text{пт}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{μн}}}$	$-\frac{k_{\text{н}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{μн}}}$	$-\frac{1}{T_{\text{μн}}}$	$\frac{k_{\text{тп}}}{T_{\text{μн}}}$	$\frac{k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{μн}}}$	$\frac{k_{\text{пн}}k_{\text{пт}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{μн}}}$		$\frac{k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{пн}}k_{\text{тп}}}{T_{\text{μн}}}$	0
	0	0	0	0	$-k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{ін}}$	$-k_{\text{т}}k_{\text{пт}}k_{\text{ін}}$	$-k_{\text{н}}k_{\text{ін}}$	0	0	$k_{\text{ін}}$	$k_{\text{пт}}k_{\text{ін}}$		$k_{\text{пш}}k_{\text{пт}}k_{\text{ін}}$	0
	0	0	0	0	$-k_{\text{ш}}k_{\text{пш}}k_{\text{іт}}$	$-k_{\text{іт}}k_{\text{т}}$	0	0	0	0	$k_{\text{іт}}$		$k_{\text{пш}}k_{\text{іт}}$	0
	0	0	0	0	$-k_{\text{ш}}k_{\text{іш}}$	0	0	0	0	0	0		$k_{\text{іш}}$	0

3.2 Розрахунок та дослідження перехідних процесів двомасової системи

Для оцінки динамічних властивостей трьохмасової моделі необхідно визначити числові значення приведених моментів інерції, які формують інерційні параметри механічної частини підйомної установки.

У попередньому розділі були розраховані такі величини:

- приведений до вала двигуна момент інерції завантаженої підйомної посудини $J_{\text{м}} = J_{\text{в}} = 66750 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$,
- приведений момент інерції підйомного каната $J_{\text{к}} = 21028 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$,
- моменти інерції ротора двигуна та елементів механізму, що обертаються разом із ним $J_{\Sigma\text{д}} = 243638 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

На основі цих величин сумарні приведені моменти інерції двомасової моделі визначаються виразами:

$$J'_{\text{м}} = J_{\text{м}} + \frac{J_{\text{к}}}{2},$$

$$J'_{\text{м}} = 66750 + \frac{21028}{2} = 77264 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$J'_{\Sigma\text{д}} = J_{\Sigma\text{д}} - \frac{J_{\text{к}}}{2},$$

$$J'_{\Sigma\text{д}} = 243638 - \frac{21028}{2} = 254152 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Жорсткість каната як пружного елемента розраховуємо за формулою:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c_{\text{к}}}{m'_2}},$$

отже

$$c_{\text{к}} = \omega_0^2 m'_2,$$

Згідно з технічною літературою, власна частота поздовжніх коливань підйомної посудини ω_0 для шахтних і рудникових підйомів зазвичай знаходиться в межах $(1 \div 6) \text{ c}^{-1}$. У подальших розрахунках приймаємо $\omega_0 = 3 \text{ c}^{-1}$;

Відносна приведена маса посудини разом із половиною маси каната, що утворює другу масу двомасової моделі m'_2 , обчислюється за виразом:

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

$$m'_2 = \left(0,2 + \frac{0,07}{2} \right) \cdot 116770 = 27441 \text{ кг},$$

$$c_k = 3^2 \cdot 27441 = 246968 \text{ Нм}.$$

Приведена жорсткість каната

$$c_{12} = c_k \rho^2,$$

$$c_{12} = 246968 \cdot 2,5^2 = 1543553 \text{ Нм}.$$

Жорсткості ділянок каната між зосередженими масами у трьохмасовій моделі визначаються наступним чином:

$$c_1 = c_2 = 2c_{12} = 2 \cdot c_{12} = 2 \cdot 1543553 = 3087107 \text{ Нм}.$$

Для дослідження поведінки системи було застосовано програмний пакет MATLAB, що дозволяє реалізувати обчислення як у вигляді блочної моделі (рис. 3.3), так і на основі векторно-матричної моделі стану (рівняння (3.9)).

Щоб не перевантажувати візуальну інформацію, на графіки виводяться лише перші шість змінних стану системи для двох випадків: реакція на задавальний вплив, реакція на зовнішнє обурення.

Отримані осцилограми наведені на рис. 3.4 – 3.9. Аналіз графіків показує, що реакції системи характеризуються слабозатухаючими коливаннями, що є типовим для механічних систем із вираженим пружним зв'язком між масами. Коливальний характер обумовлений наявністю двох власних частот, що відповідають руху підйомної посудини та деформаціям каната.

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

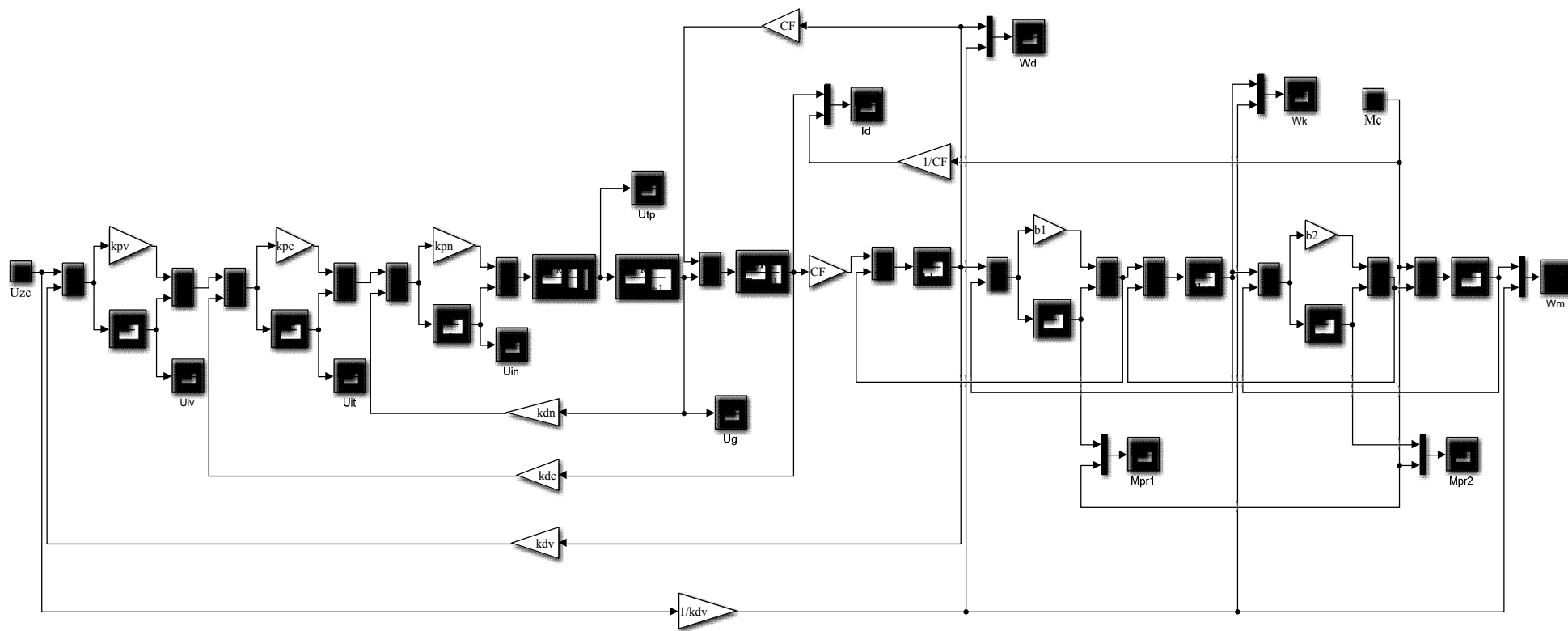
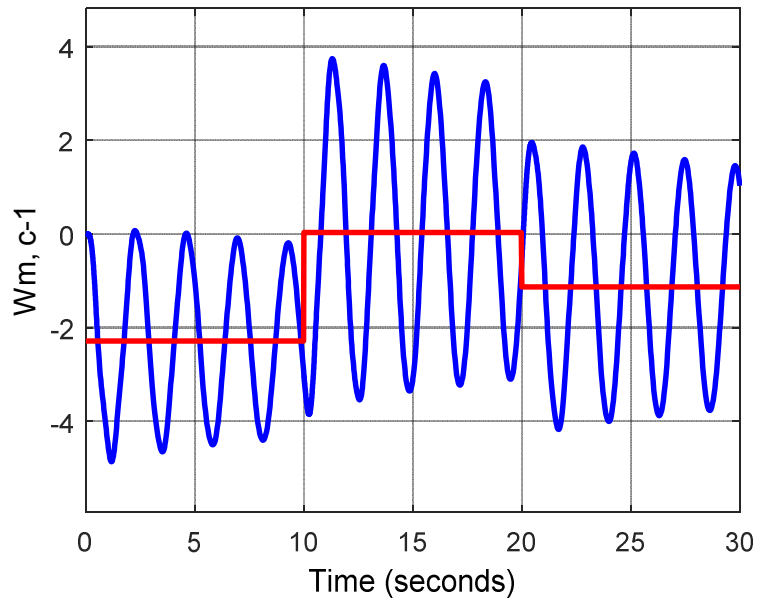
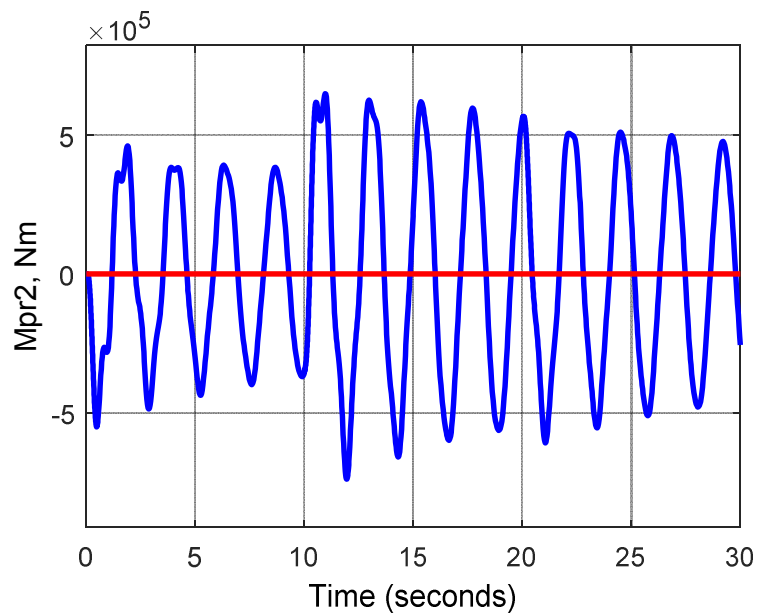


Рисунок 3.3 – Модельна схема тримасової динамічної системи, розроблена в SIMULINK/MATLAB

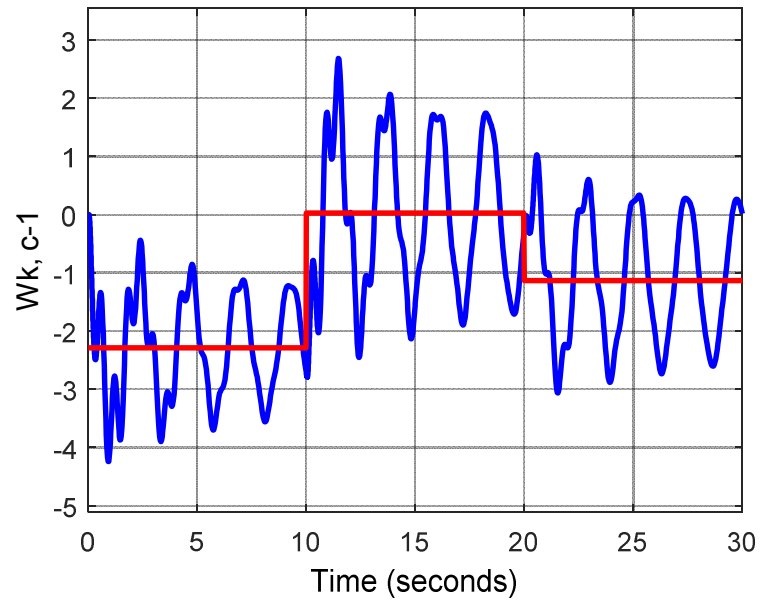


a)

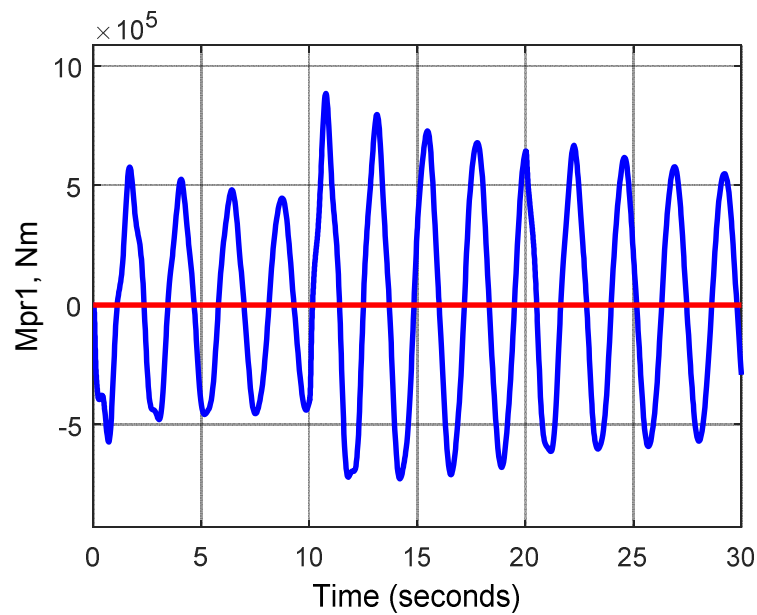


б)

Рисунок 3.4 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи за задавальним впливом: а) динаміка швидкості механізму $\omega_m = f(t)$;
б) розвиток другого пружного моменту $M_{пр2} = f(t)$



a)

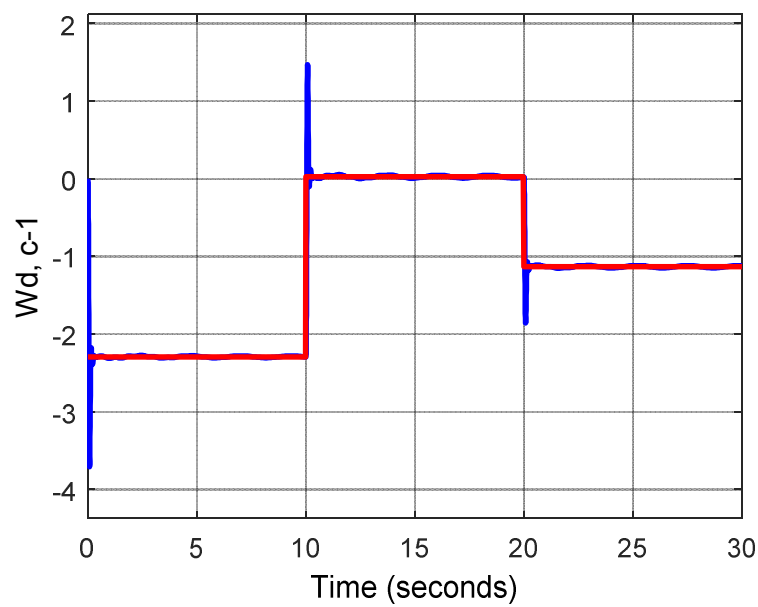


б)

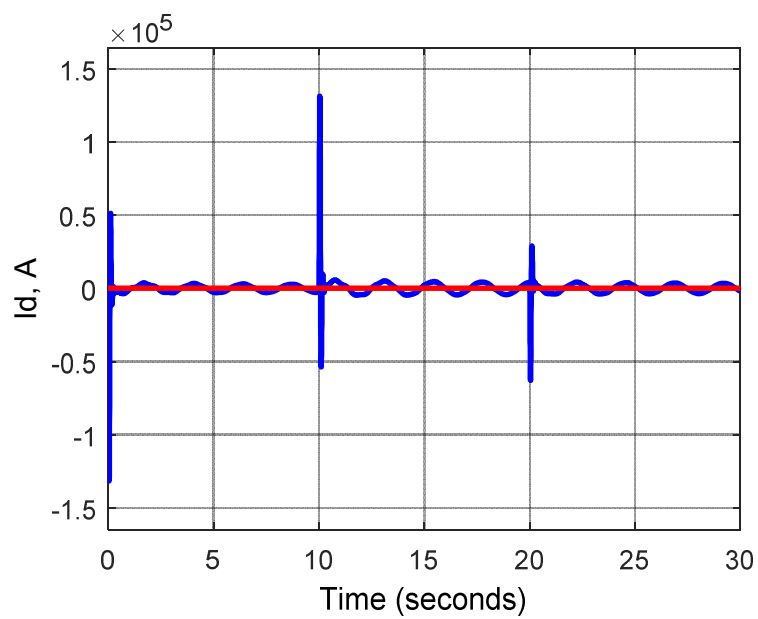
Рисунок 3.5 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи

за задавальним впливом: а) динаміка швидкості канату $\omega_k = f(t)$;

б) розвиток першого пружного моменту $M_{pr1} = f(t)$



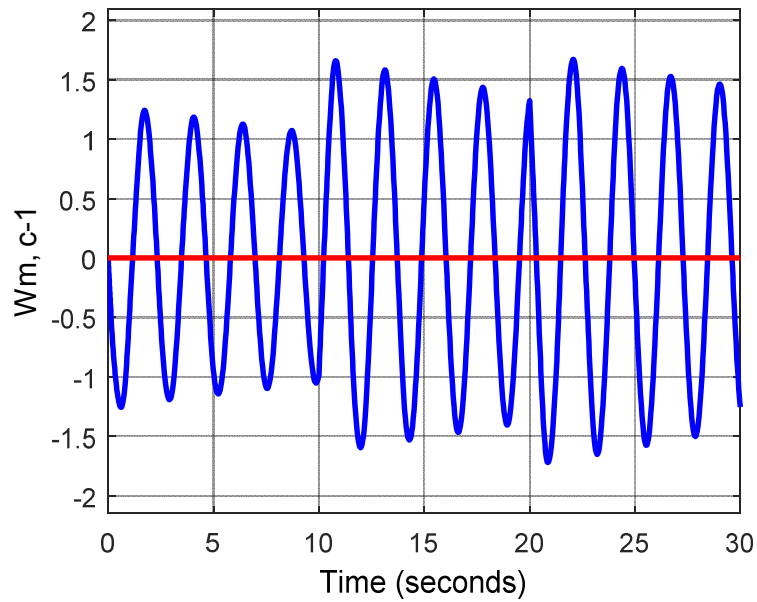
а)



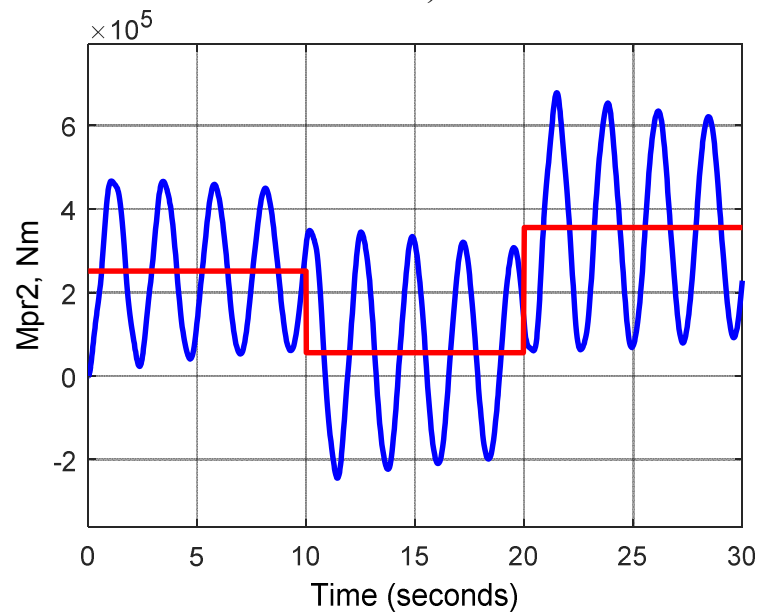
б)

Рисунок 3.6 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи за задавальним впливом: а) динаміка швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$;

б) зміна струму двигуна $I_d = f(t)$

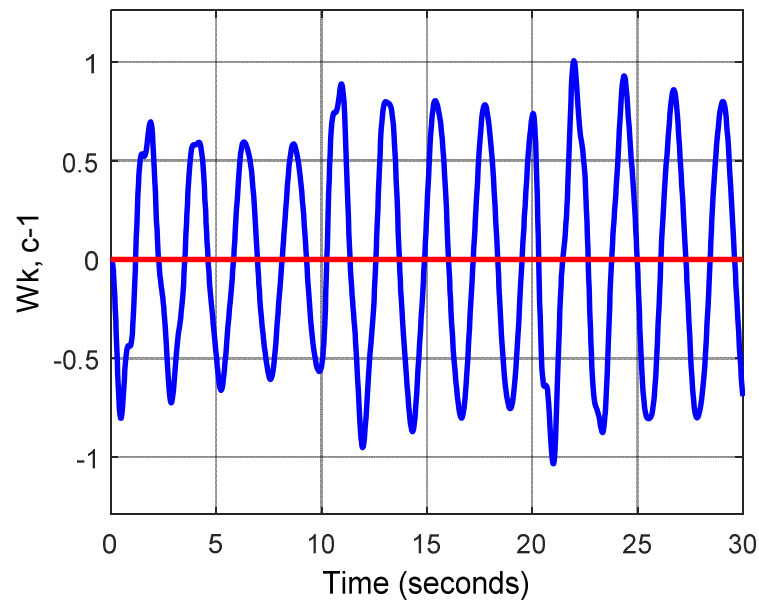


a)

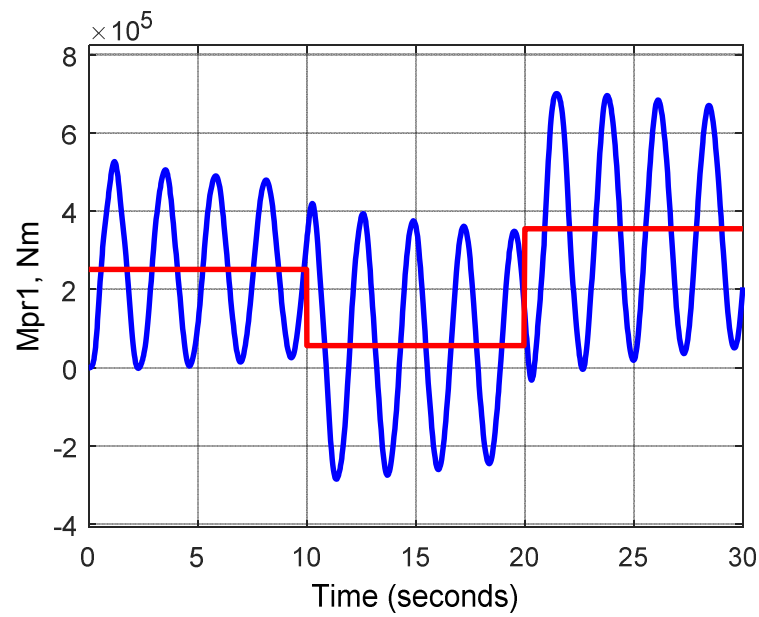


б)

Рисунок 3.7 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи при дії збурення: а) динаміка швидкості механізму $\omega_m = f(t)$;
б) розвиток другого пружного моменту $M_{\text{пр2}} = f(t)$



a)



б)

Рисунок 3.8 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи при дії збурення: а) динаміка швидкості канату $\omega_m = f(t)$;
 б) розвиток першого пружного моменту $M_{пр1} = f(t)$

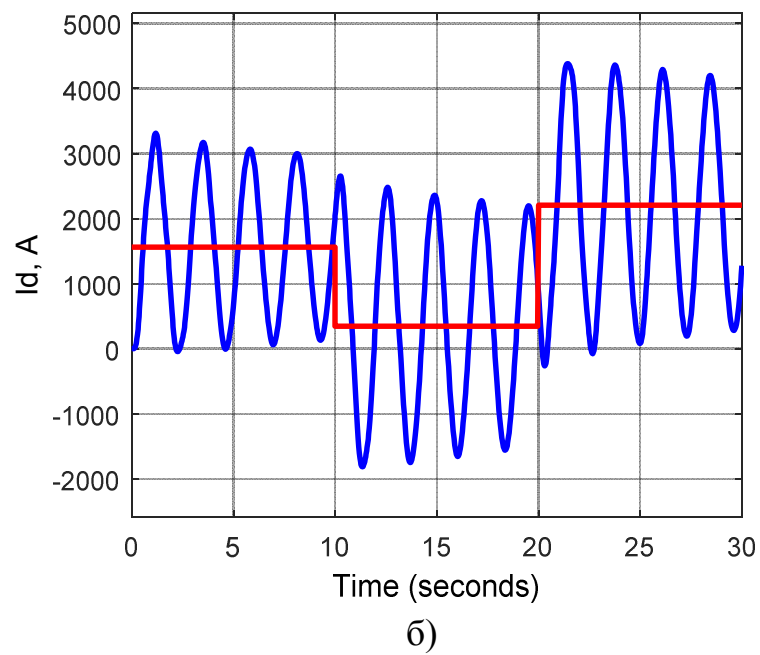
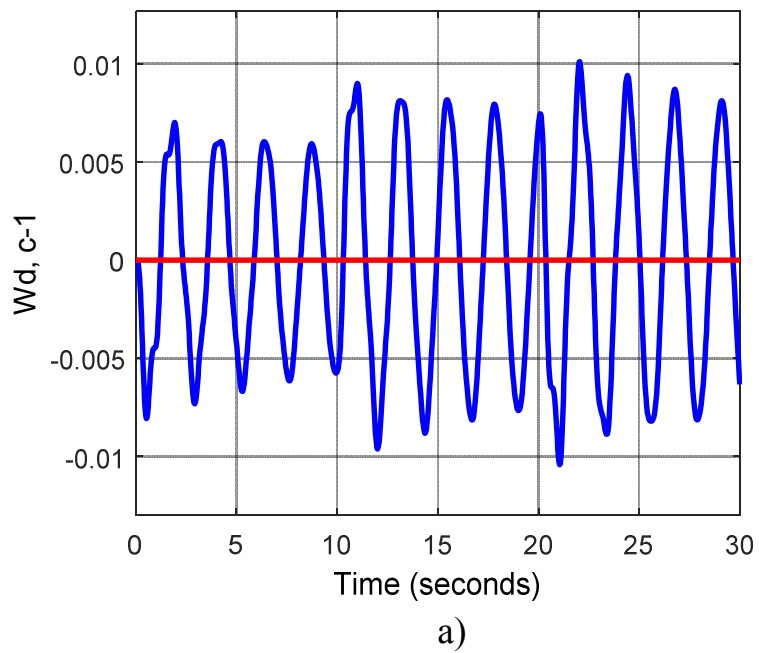


Рисунок 3.9 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи при дії збурення: а) динаміка швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$;

б) зміна струму двигуна $I_d = f(t)$

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Виконано детальний аналіз динаміки механізму підйому шахтної підйомної установки з урахуванням пружних властивостей каната. У результаті показано, що традиційний підхід, у межах якого механічна частина розглядається як система з двома приведеними масами, з'єднаними ідеально пружним елементом, хоч і забезпечує прийнятну точність, але є доволі складним у практичній реалізації. Обчислення параметрів такої моделі потребують додаткових спрощень та врахування низки припущень. У зв'язку з цим запропоновано вдосконалений варіант – тримасову модель механізму, що дозволяє відокремити масу каната як самостійний динамічний елемент. Таким чином досягається можливість точніше враховувати розподілену масу каната та її вплив на коливальні процеси, що особливо важливо при великих глибинах шахтних стволів.

2. Розроблено математичний опис тримасової системи, що включає в себе формування рівнянь руху на основі другого закону Ньютона та рівнянь торсійних коливань. Отримано систему диференціальних рівнянь у формі рівнянь стану, визначено склад вектора стану, який містить як кутові швидкості кожної з мас, так і моменти пружності, що виникають у пружних зв'язках між ними. Побудовано вектор керувальних впливів та збурень, визначено матриці A та B , що дозволяють уніфіковано представляти систему в векторно-матричній формі, придатній для аналізу стійкості, оптимізації та впровадження сучасних методів керування. Крім того, розроблена алгоритмічна схема забезпечує наочне відображення взаємодії елементів тримасової моделі та полегшує подальшу реалізацію моделі в пакетах автоматизованого моделювання.

3. На базі середовища MATLAB/SIMULINK здійснено моделювання перехідних процесів тримасової системи. Створена імітаційна модель дозволила врахувати як дію елементів електроприводу, так і коливальну поведінку каната та підйомної посудини. Як тестовий вплив використовувався ступінчастий сигнал із випадковою амплітудою в межах ± 24 В, що відповідає реальним режимам зміни швидкості механізму. Результати імітаційних досліджень свідчать,

що система демонструє виражені слабкозатухаючі коливання, що проявляються як у швидкості обертання двигуна та барабана, так і в пружних моментах у канаті. Це вказує на недостатню демпфованість механічної частини та високу чутливість до зовнішніх збурень. Виявлені особливості перехідних процесів підкреслюють необхідність удосконалення системи керування, зокрема шляхом впровадження методів оптимізації регуляторів або застосування адаптивних і нечітких алгоритмів управління для компенсації коливань та покращення якості перехідних процесів.

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.

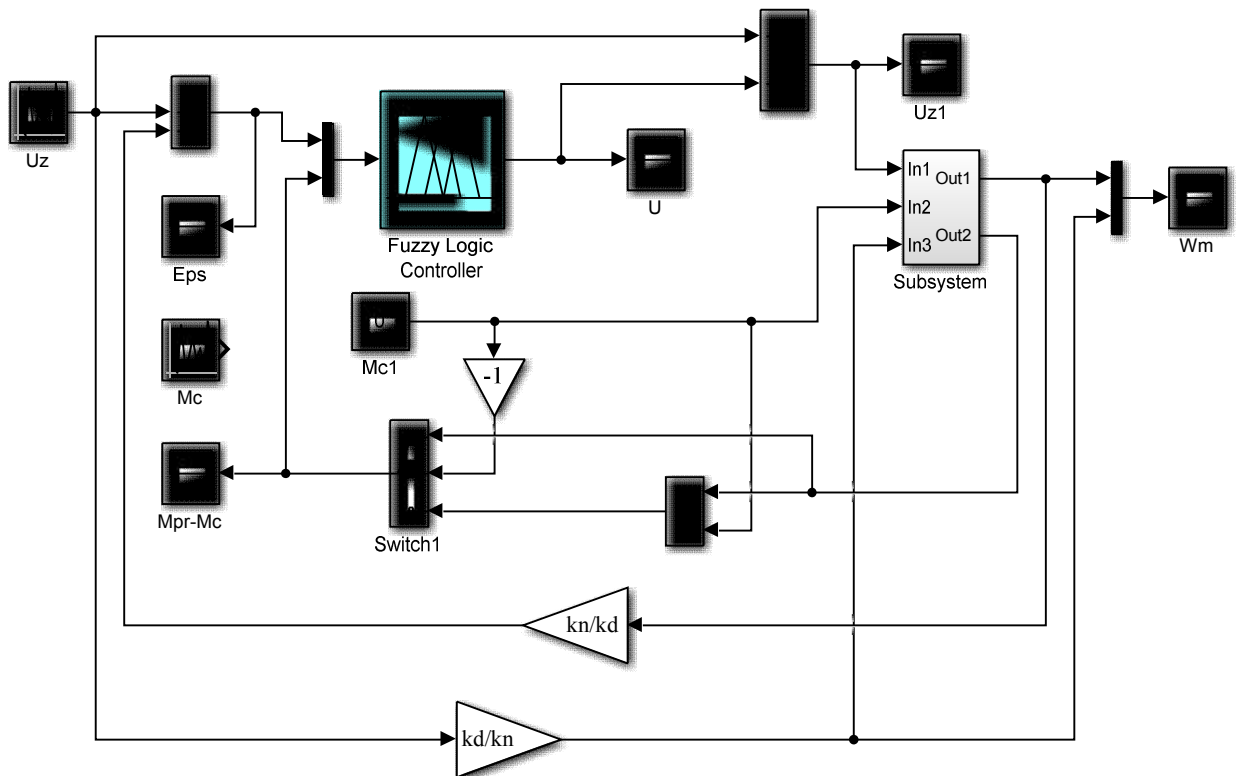


Рисунок 4.1 – Загальна Simulink-модель електромеханічної системи, керованої нечітким регулятором

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.

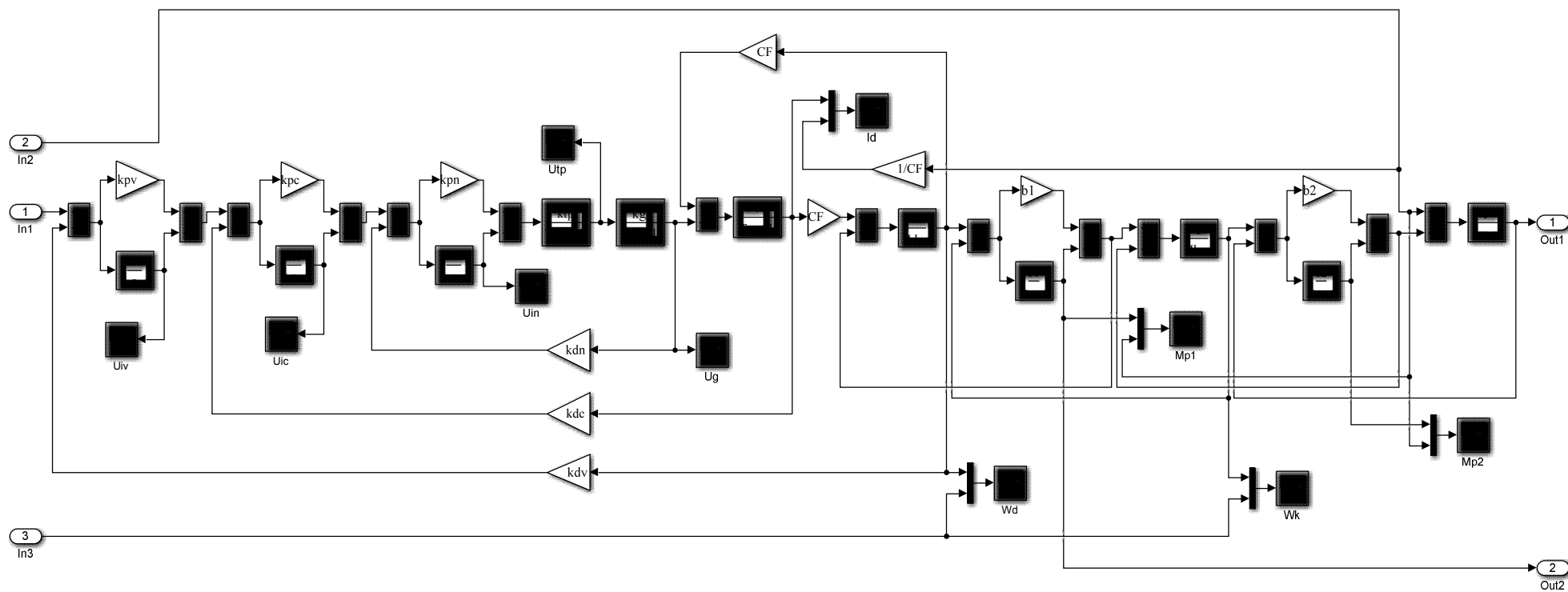


Рисунок 4.2 – Внутрішня структура підсистеми, що реалізує модель об'єкта управління

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				
		NG	NS	ZR	PS	PG
Момент пружності	NG	PG	PS	PS	PS	PS
	NS	PS	PS	ZR	ZR	ZR
	ZR	PS	PS	ZR	NS	NS
	PS	ZR	ZR	ZR	NS	NS
	PG	NS	NS	NS	NS	NG

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.

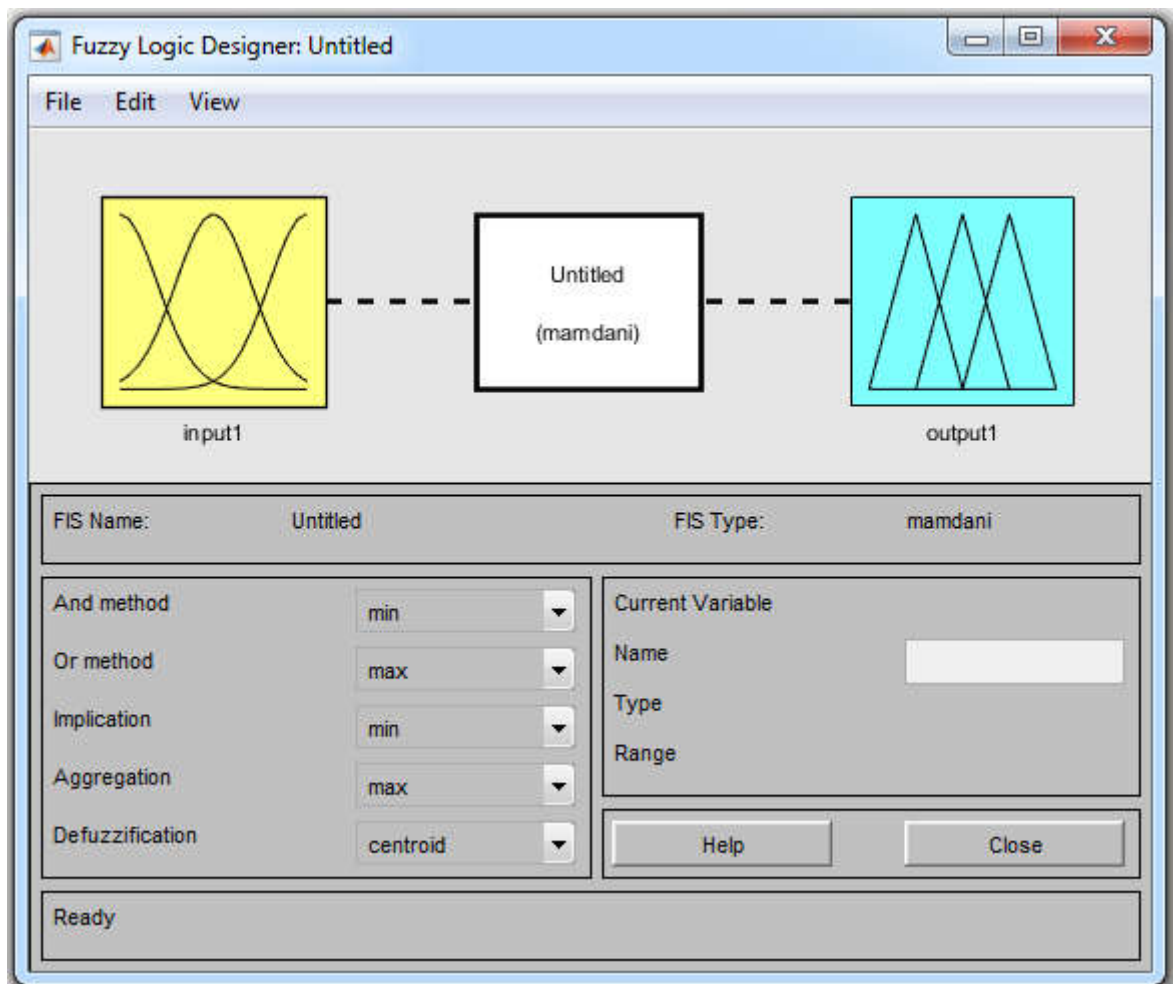


Рисунок 4.3 – Інтерфейс редактора FIS після запуску з командного рядка

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.

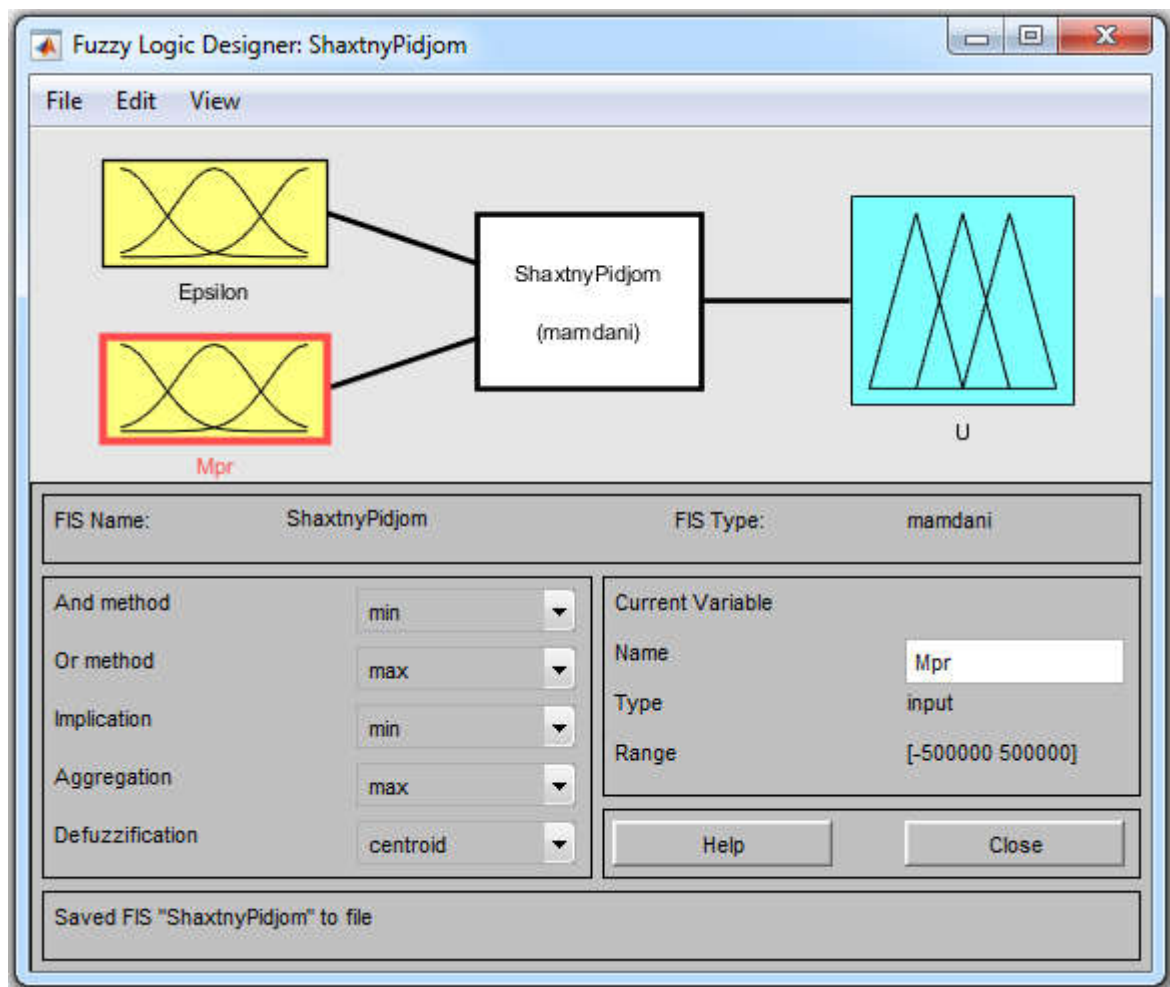


Рисунок 4.4 – Сформована структурна схема нечіткої системи керування у FIS Editor

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 -32 до $+32$, 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.

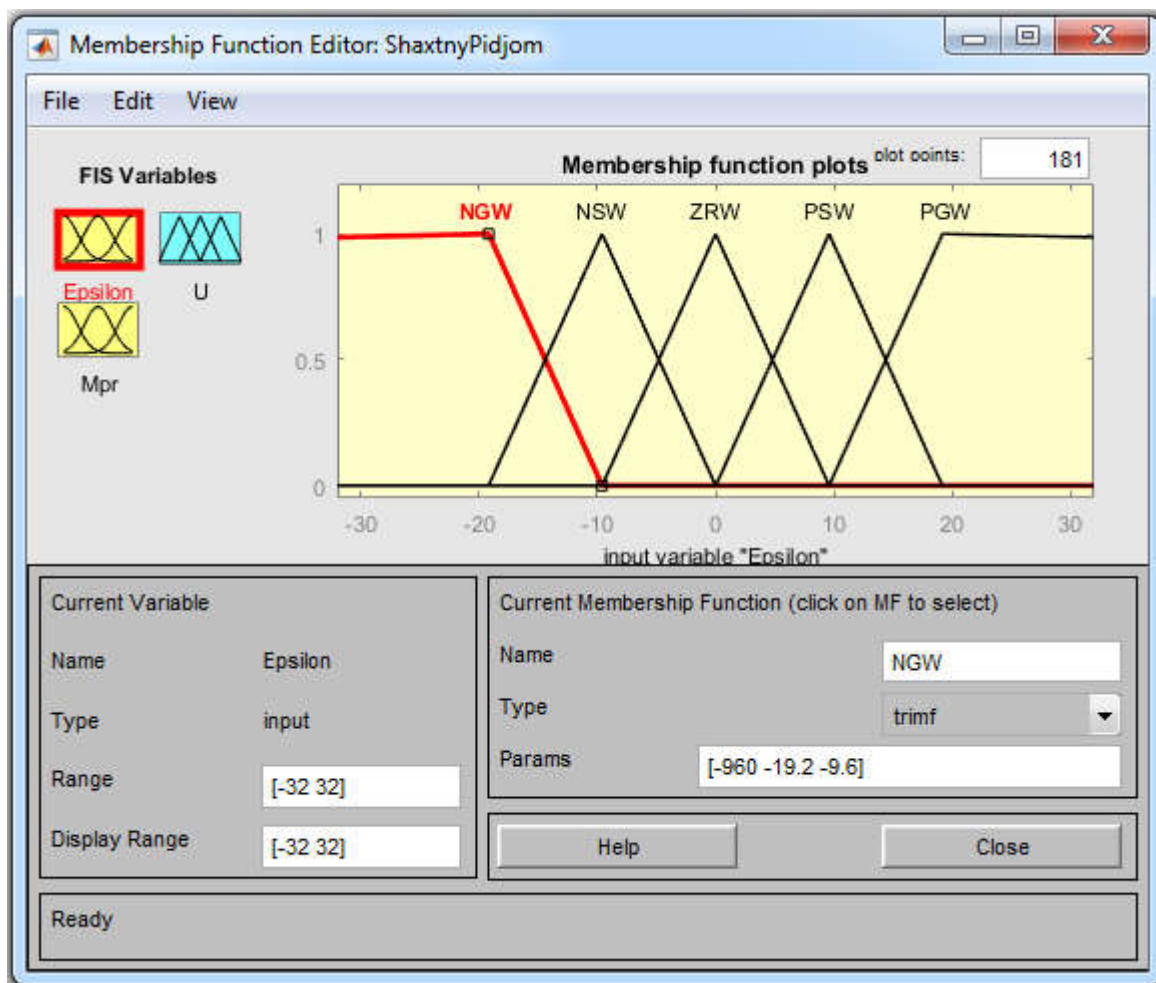


Рисунок 4.5 – Набір функцій приналежності для змінної «Epsilon»

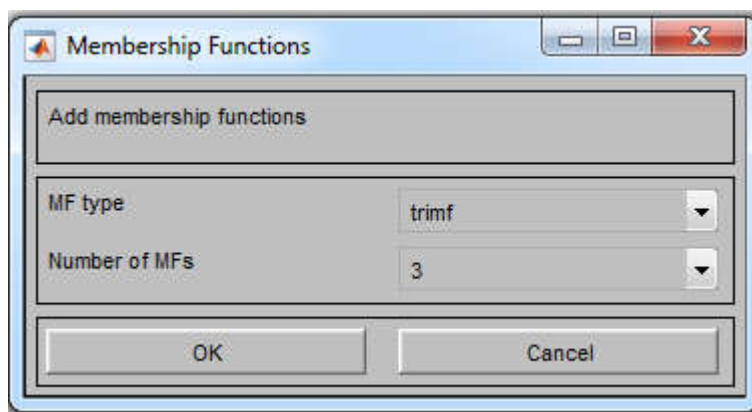


Рисунок 4.6 – Вибір типів та кількості функцій приналежності для змінної

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.

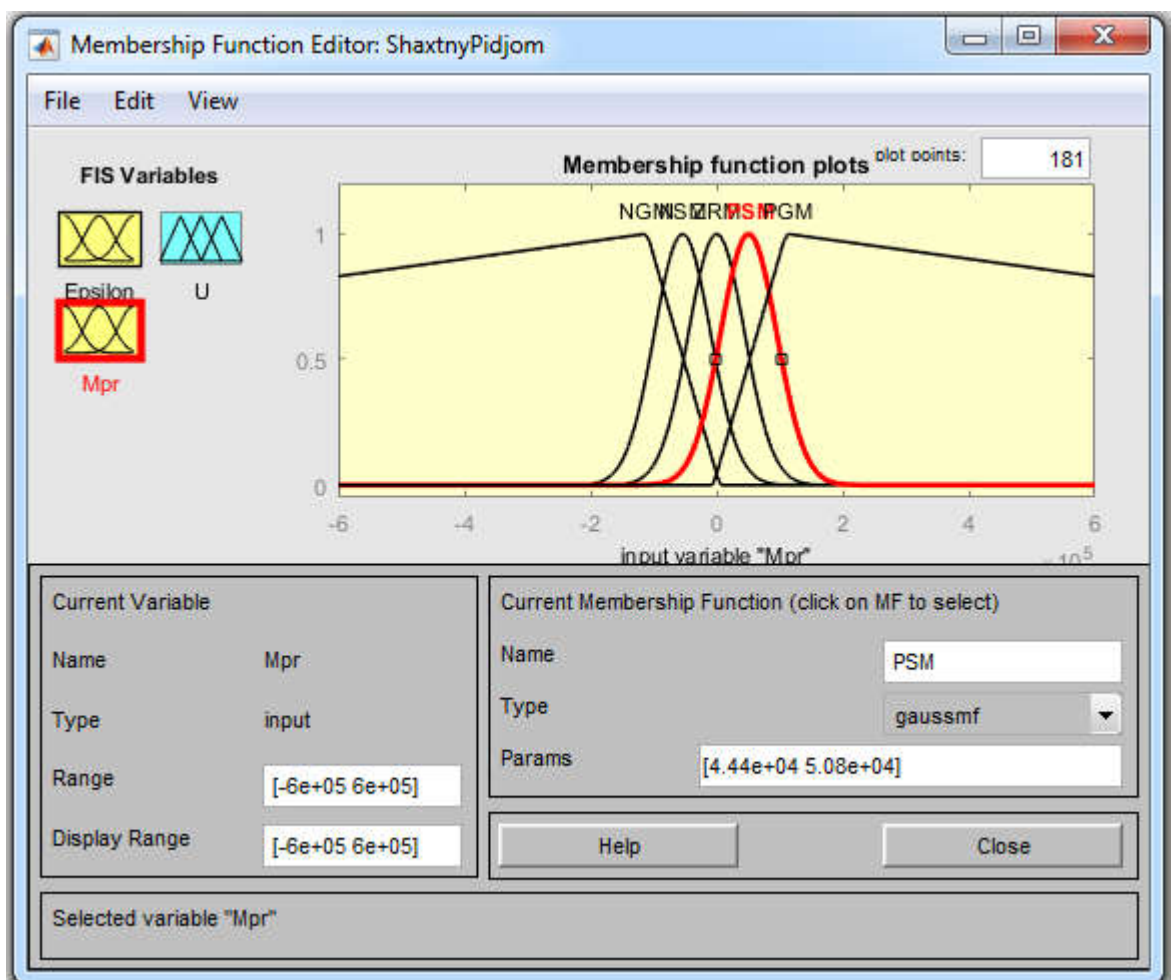


Рисунок 4.7 – Повний набір функцій приналежності для змінної «Mpr»

Аналогічні дії виконуються і для другої змінної **Mpr** (рис. 4.7). Для неї встановлюємо діапазон від $-6 \cdot 10^{-5}$ до $+6 \cdot 10^{-5}$, 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.

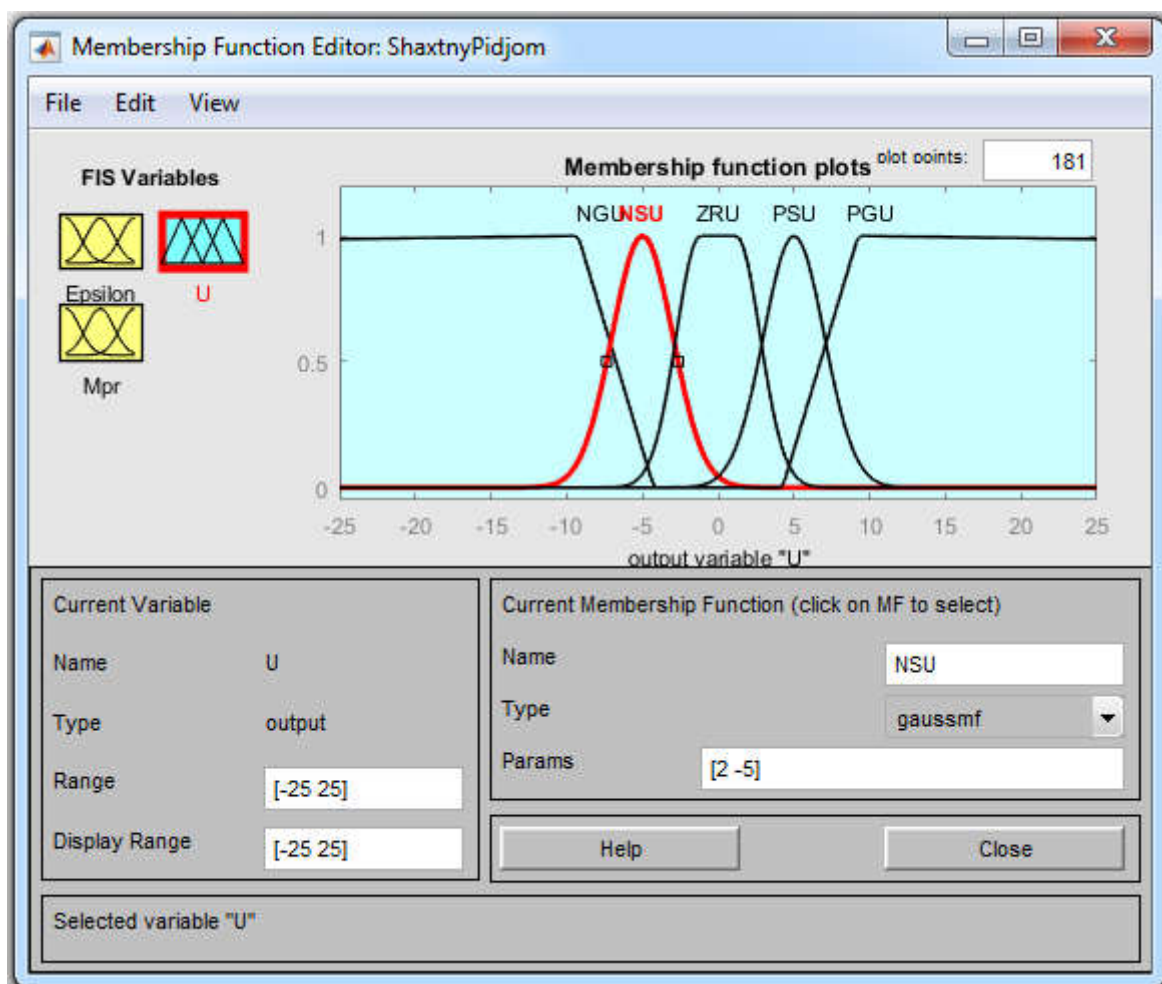


Рисунок 4.8 – Формування функцій приналежності вихідної змінної «U»

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.

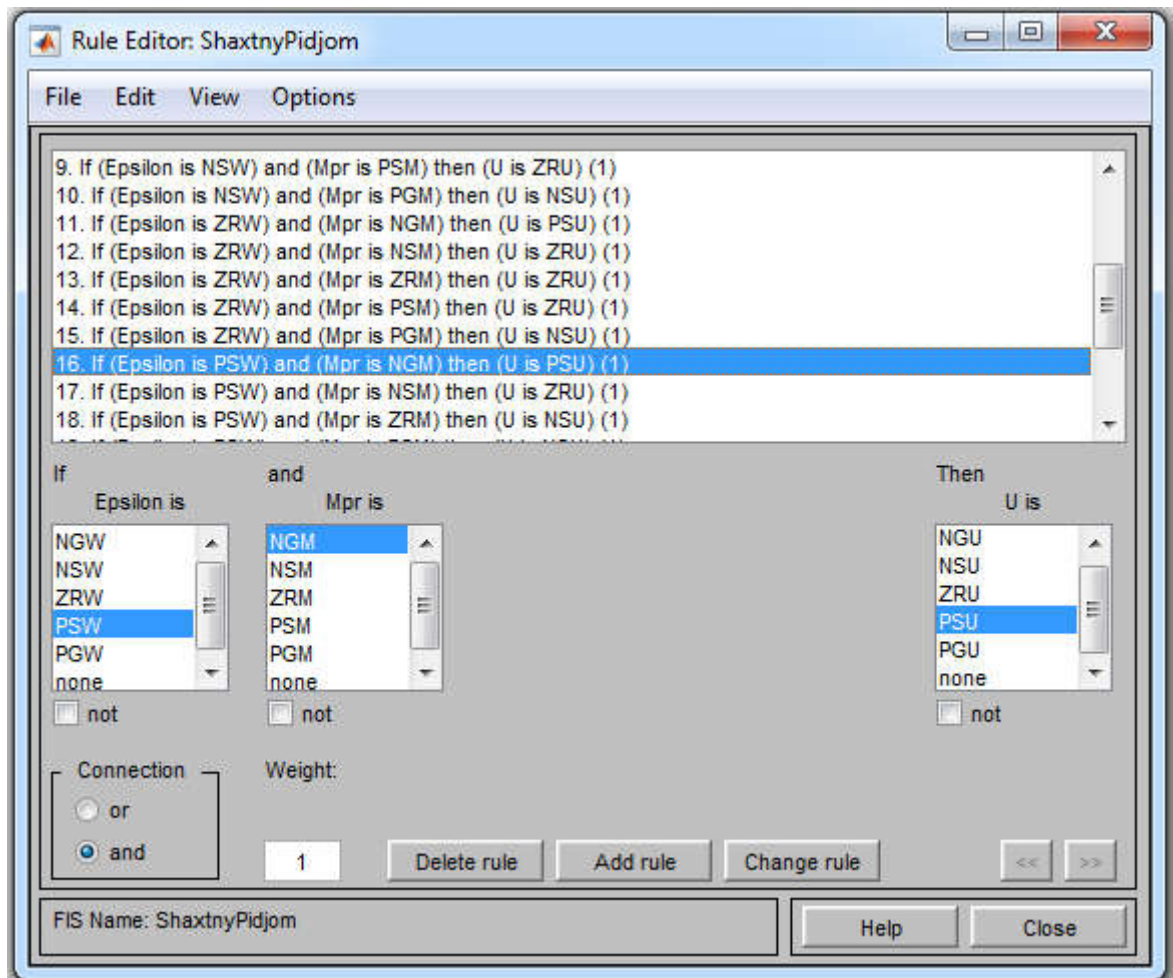


Рисунок 4.9 – Панель введення правил нечіткого висновку

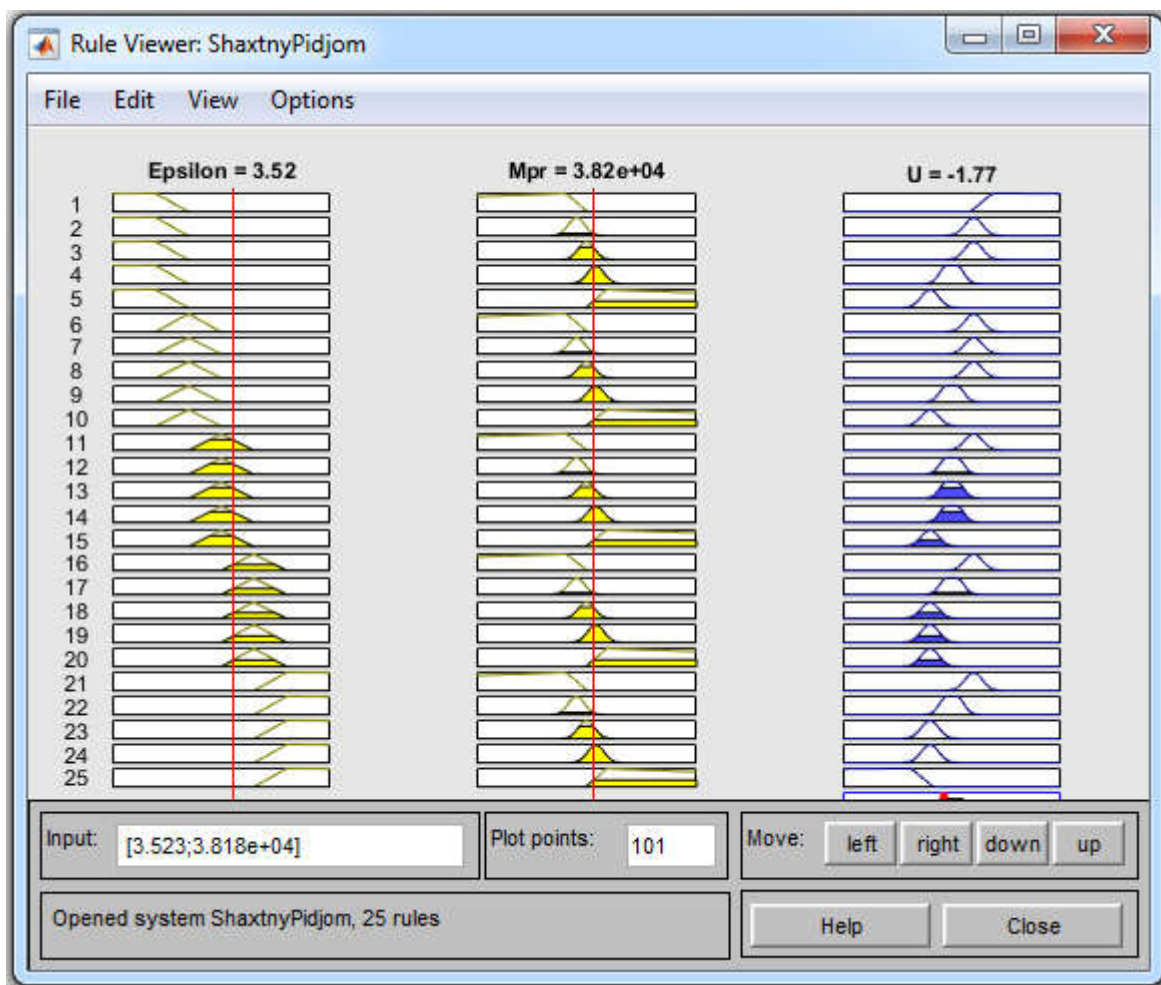


Рисунок 4.10 – Наочна демонстрація роботи системи у вікні Rule Viewer

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 вхідними 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).

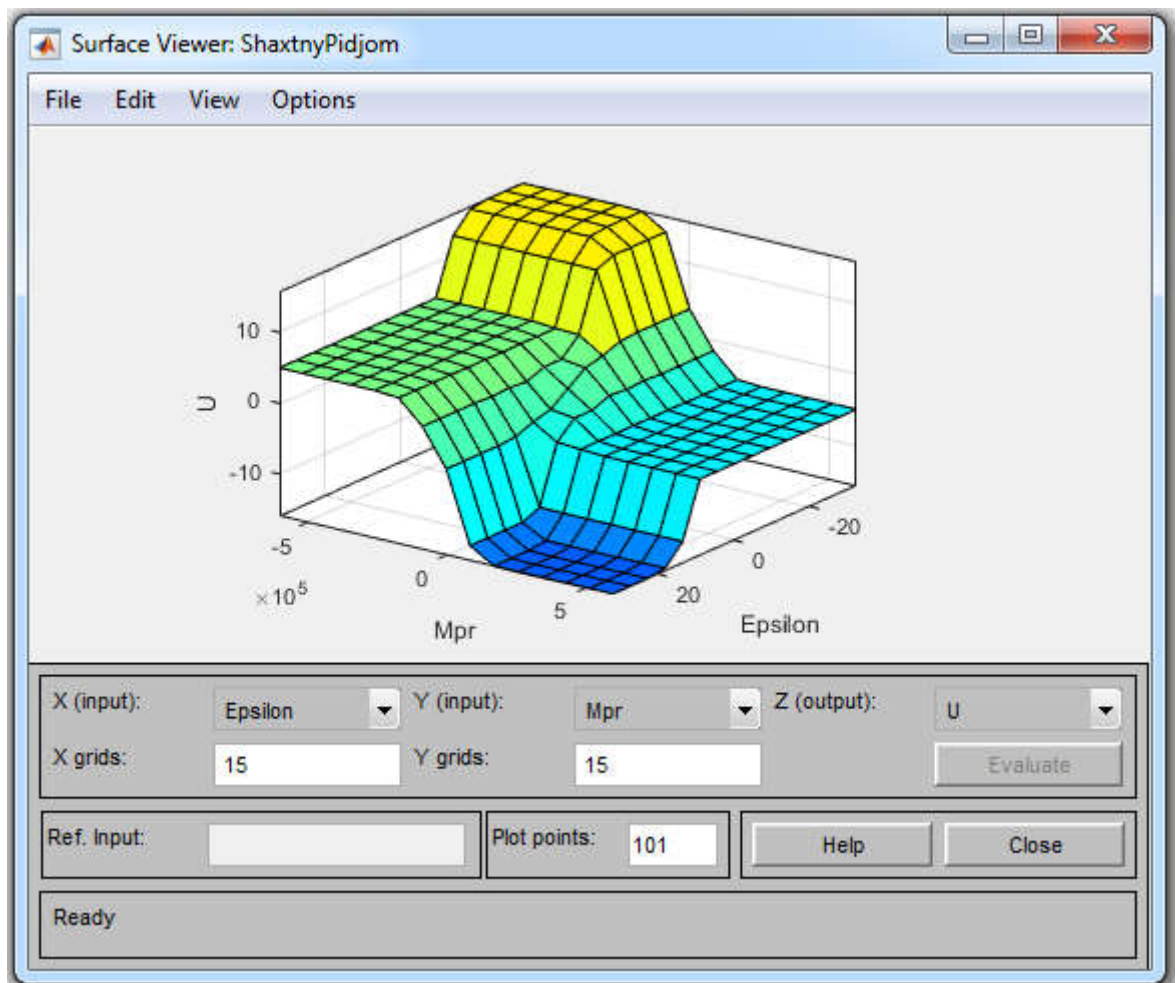


Рисунок 4.11 – Просторова поверхня залежності вихідної величини від вхідних параметрів

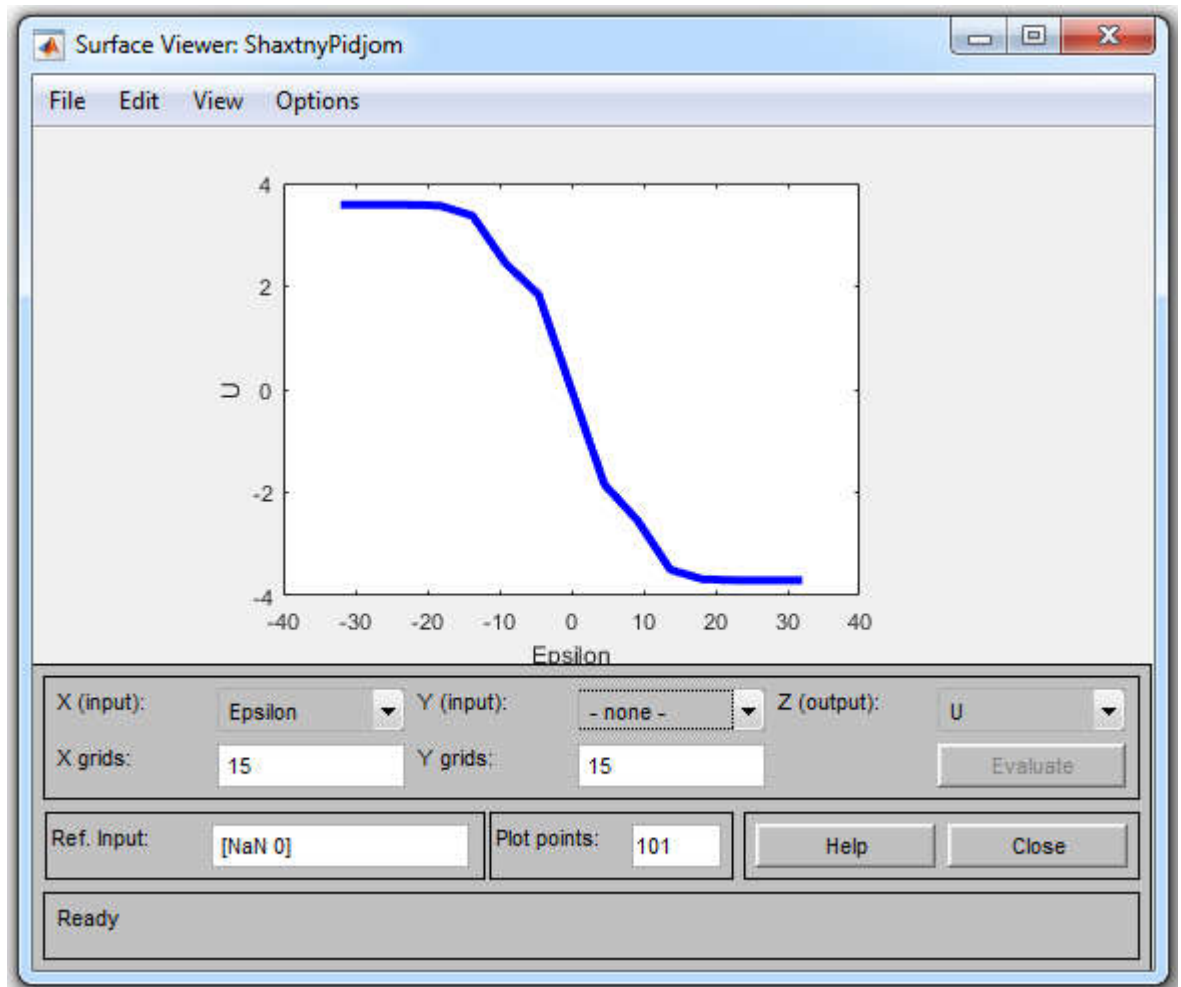


Рисунок 4.12 – Приклад одновимірної залежності керувального сигналу від помилки регулювання)

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.

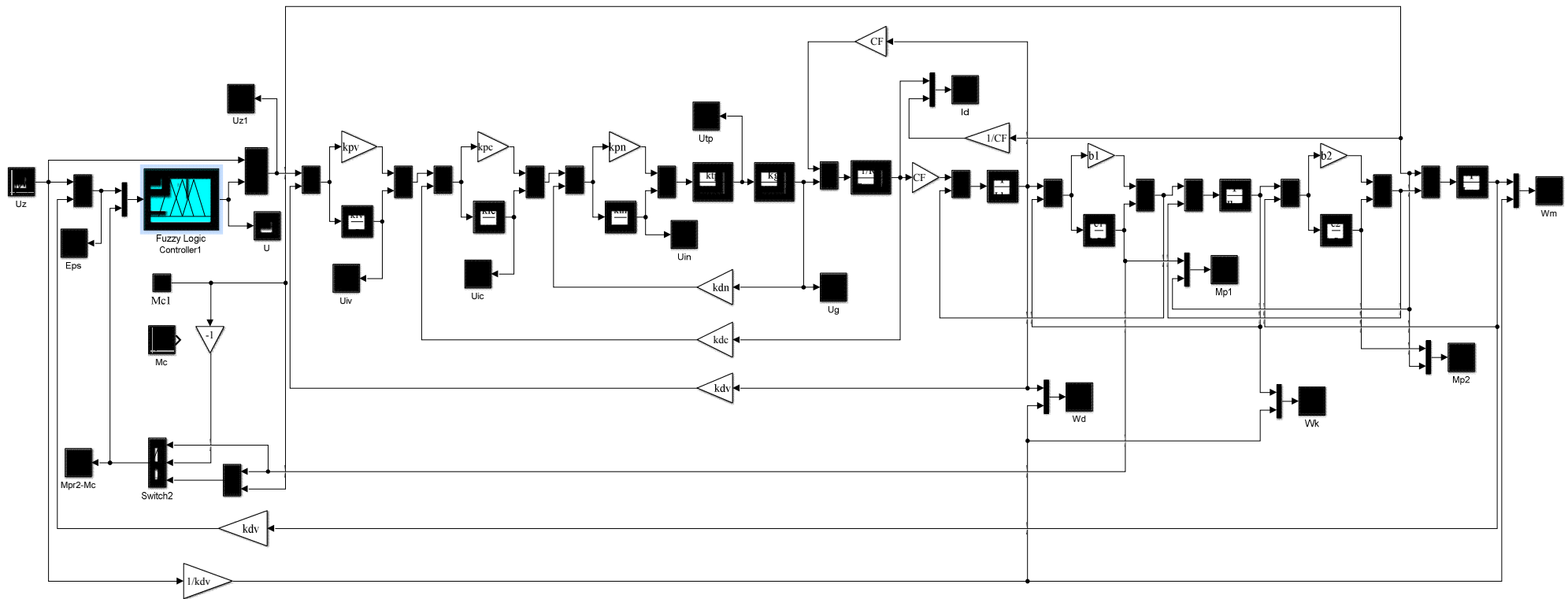


Рисунок 4.13 – Структурна схема трьохмасової системи з нечітким регулятором у середовищі Simulink

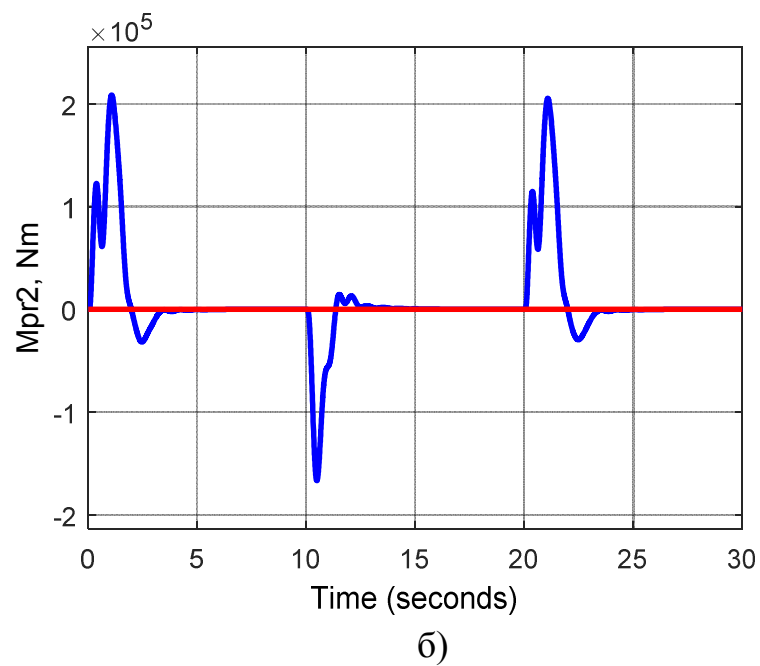
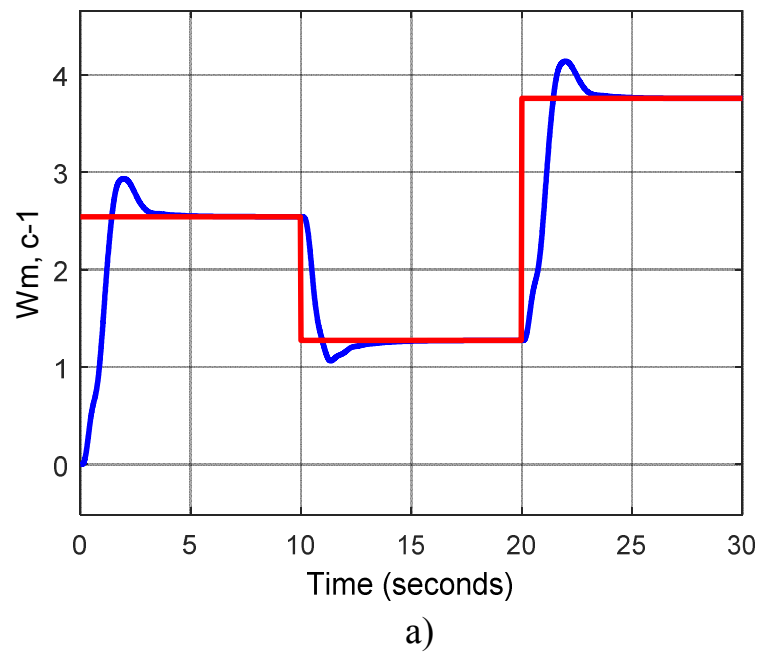


Рисунок 4.14 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи з Fuzzy-регулятором за задавальним впливом: а) динаміка швидкості механізму $\omega_m = f(t)$; б) розвиток другого пружного моменту $M_{np2} = f(t)$

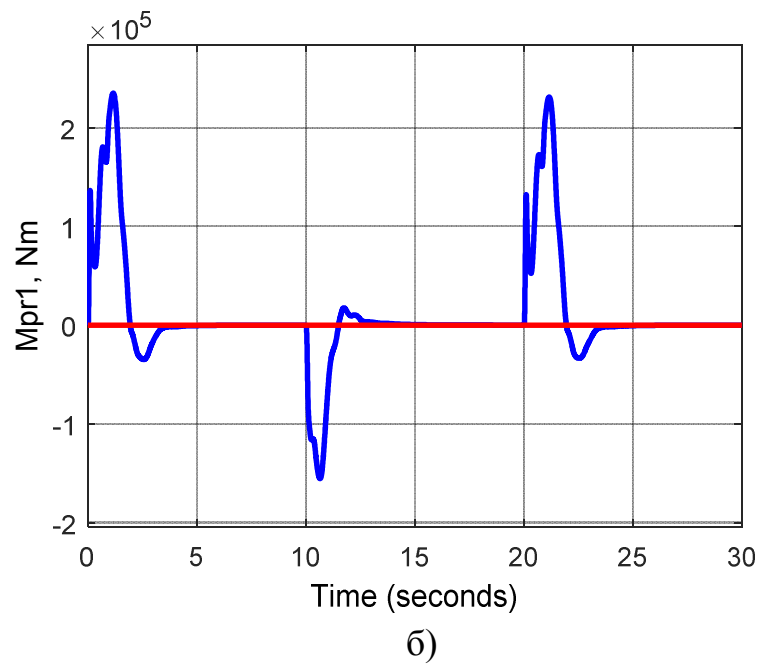
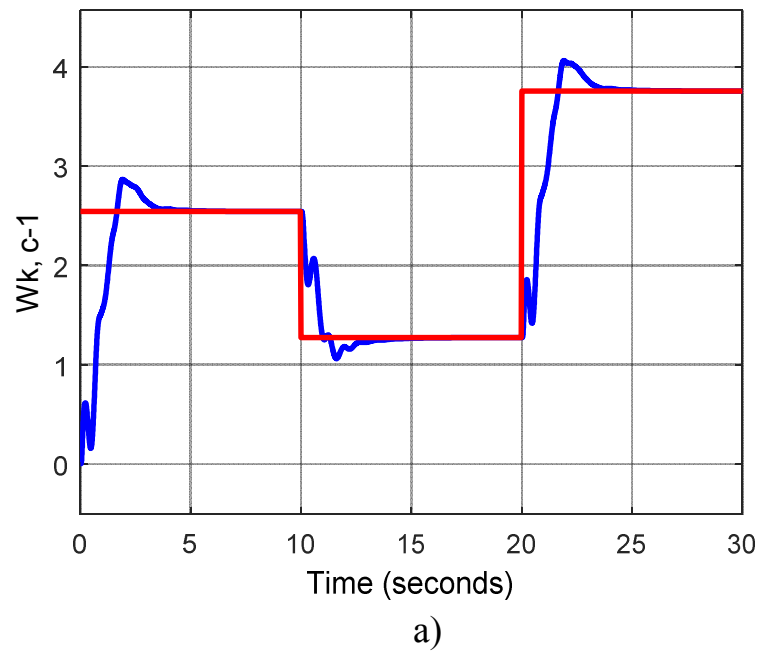


Рисунок 4.15 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи з Fuzzy-регулятором за задавальним впливом: а) динаміка швидкості канату $\omega_k = f(t)$; б) розвиток першого пружного моменту $M_{np1} = f(t)$

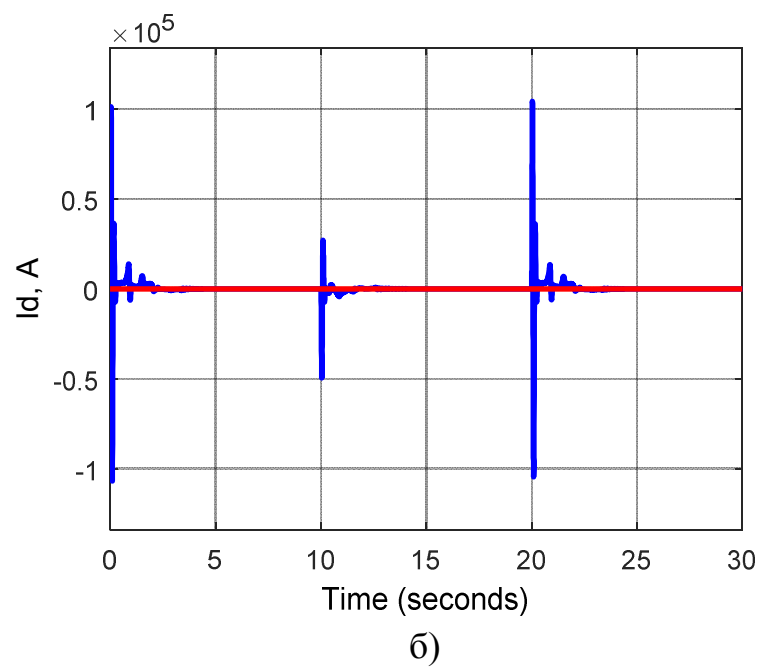
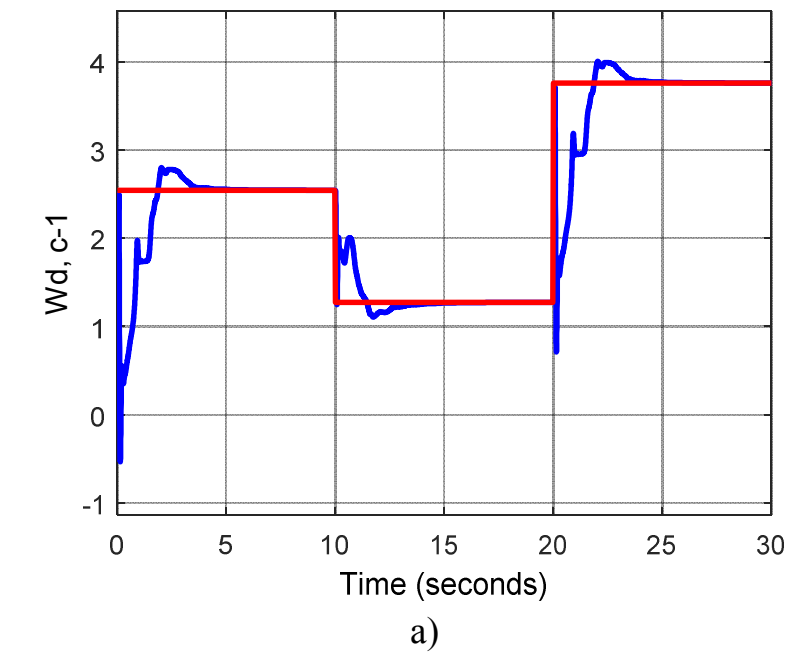


Рисунок 4.16 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи з Fuzzy-регулятором за задавальним впливом: а) динаміка швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$; б) зміна струму двигуна $I_d = f(t)$

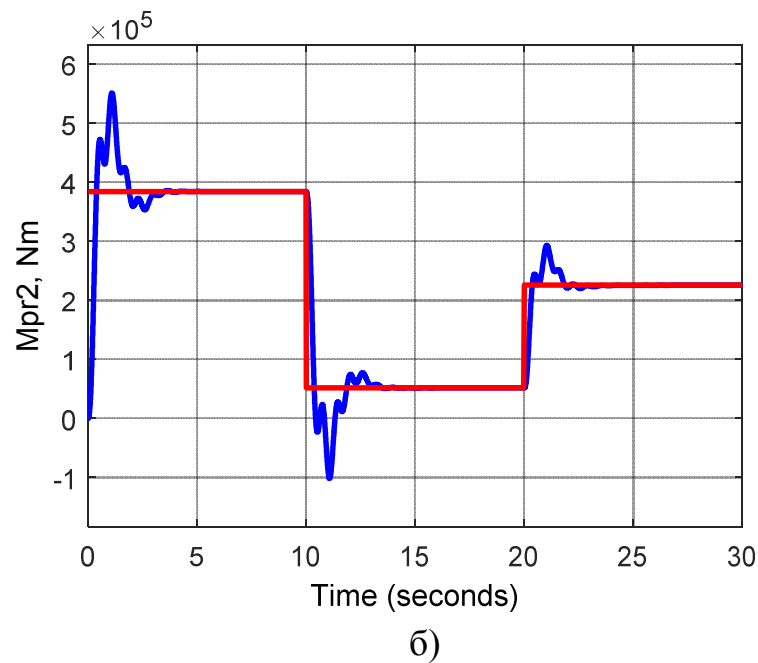
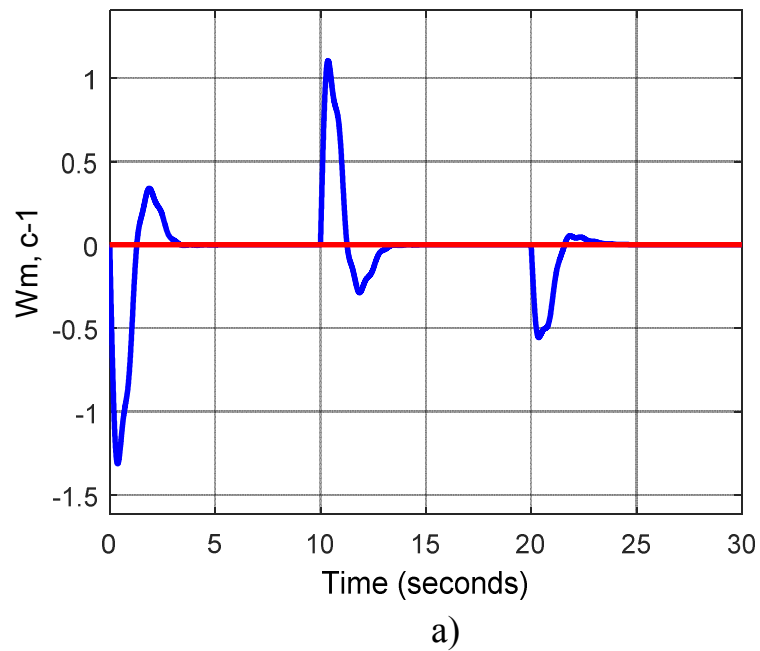


Рисунок 4.17 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи з Fuzzy-регулятором при дії збурення: а) динаміка швидкості механізму $\omega_m = f(t)$; б) розвиток другого пружного моменту $M_{np2} = f(t)$

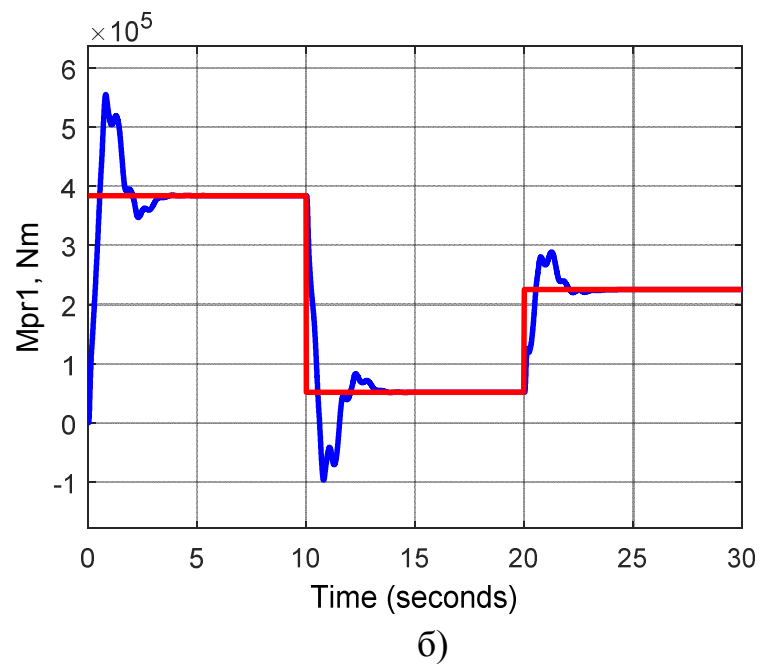
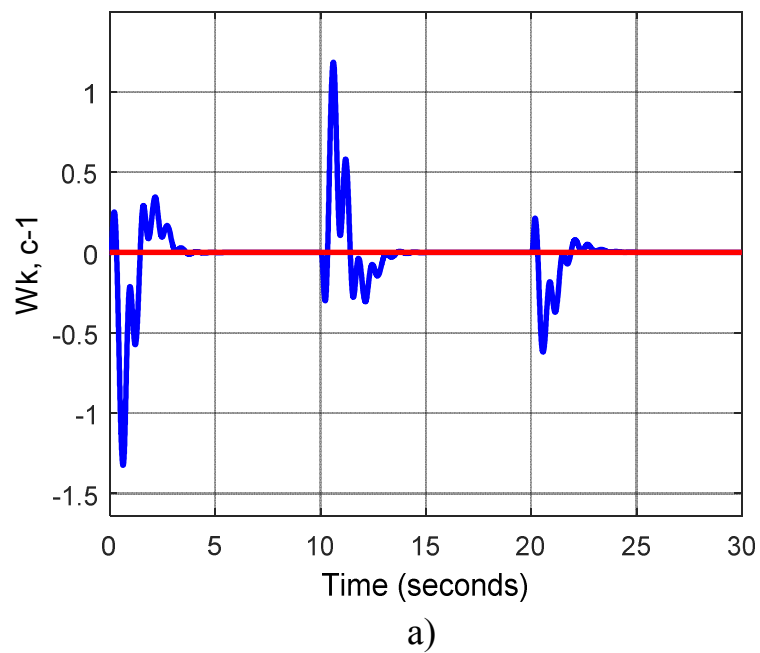
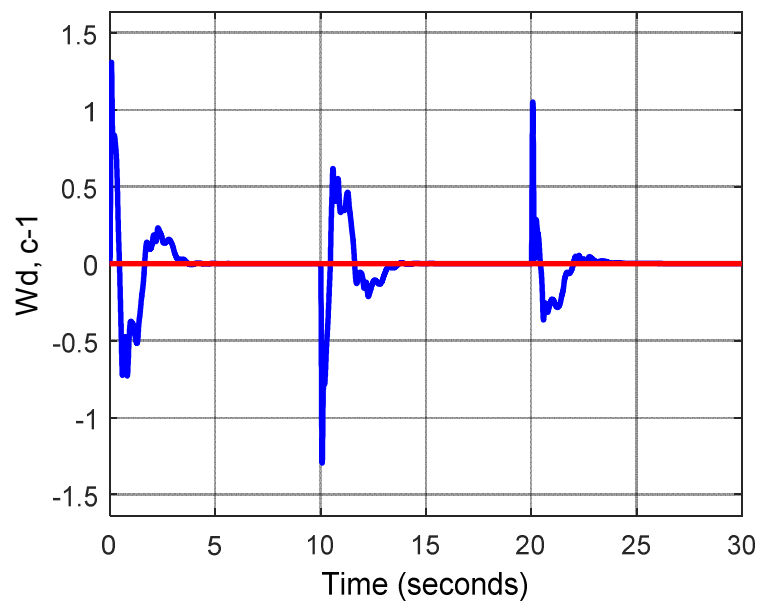
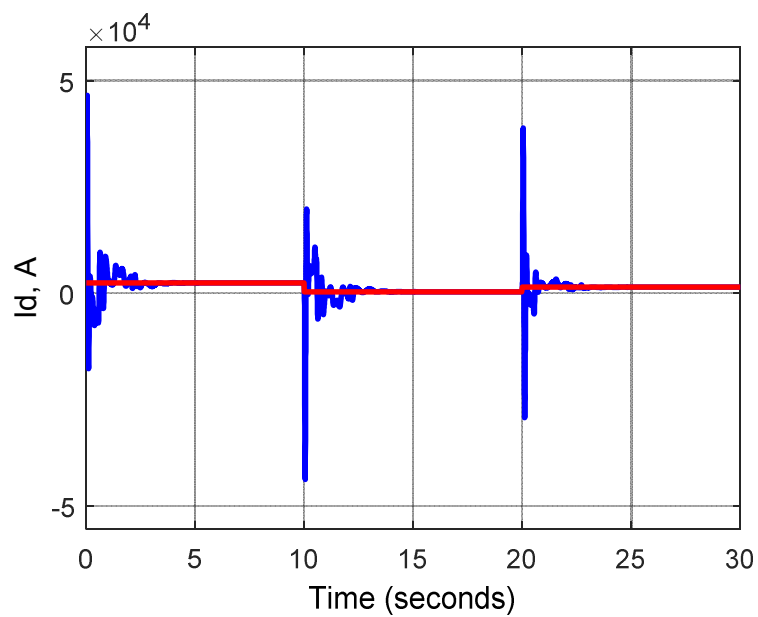


Рисунок 4.18 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи з Fuzzy-регулятором при дії збурення: а) динаміка швидкості канату $\omega_m = f(t)$;
 б) розвиток першого пружного моменту $M_{пр1} = f(t)$



а)



б)

Рисунок 4.19 – Графічне відображення перехідних процесів тримасової системи з Fuzzy-регулятором при дії збурення: а) динаміка швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$; 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 $\omega_3(t)$ 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 входні та вихідні лінгвістичні змінні, які використовуються в Fuzzy-регуляторі. Першою входною 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 підйімальної установки. Запропоноване рішення спрямоване на підвищення якості регулювання, покращення динамічних характеристик системи та забезпечення її стійкої роботи в умовах змінних навантажень і складних експлуатаційних режимів.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. У ході виконання роботи було проведено детальний аналіз існуючих систем управління механізмом підйому шахтної підйімальної установки. Аналіз показав, що для забезпечення високої якості регулювання, надійності та відповідності сучасним вимогам до електромеханічних систем управління доцільним є використання інтелектуальних методів керування. На основі цього науково обґрунтовано перспективність застосування нечітких (Fuzzy) технологій для управління багатомасовою електромеханічною системою механізму підйому шахтної підйімальної установки, оскільки вони дозволяють ефективно враховувати нелінійності, змінні параметри та складні динамічні властивості об'єкта.

2. На підставі аналізу технічних характеристик, режимів роботи та умов експлуатації шахтних підйімальних установок для електроприводу головного підйому було обрано безредукторний електропривод постійного струму, виконаний за системою генератор–двигун (Г–Д). Здійснено обґрунтований вибір електродвигуна та основного електроустаткування силового ланцюга електроприводу. Проведена перевірка двигуна за перевантажувальною здатністю підтвердила можливість його надійної роботи в заданих експлуатаційних режимах.

3. Виконано вибір та розрахунок системи автоматичного управління координатами електроприводу. Для забезпечення необхідної точності та динамічних характеристик обрано трьохконтурну систему підлеглого регулювання, яка включає внутрішні контури напруги та струму і зовнішній контур швидкості.

Розраховано параметри силового ланцюга електроприводу, необхідні для подальшого синтезу системи автоматичного управління. Здійснено синтез послідовних коригувальних пристроїв контурів: оптимізація контурів напруги та струму виконана за модульним критерієм, а контуру швидкості - за симетричним критерієм. Для перевірки працездатності та якості регулювання проведено комп'ютерне моделювання системи з використанням пакету прикладних програм MATLAB.

4. Розроблено математичну модель трьохмасової електромеханічної системи, яка враховує пружні властивості підйимального каната та взаємодію між масами. Проведене моделювання показало, що у трьохмасовій системі перехідні процеси основних координат характеризуються наявністю значних коливань, що негативно впливає на динамічні показники та надійність роботи підйимальної установки.

5. З метою покращення динамічних характеристик системи та зменшення коливальних процесів у роботі виконано синтез системи управління з використанням Fuzzy-регулятора. Розглянуто принципи побудови та функціонування нечіткого регулятора, наведено алгоритм його синтезу та формування бази правил. Проведено моделювання трьохмасової системи з Fuzzy-регулятором. Аналіз результатів моделювання підтвердив, що перехідні процеси в замкнутій системі під час пуску та при накиді навантаження мають задовільні динамічні показники. Система є астатичною, перерегулювання не перевищує 2%, а час регулювання становить близько 3 секунд, що повністю відповідає вимогам технічного завдання.

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. Синельников. – 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 D., Prade H. – *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. Sugeno M. *Theory of fuzzy integrals and its applications*. PhD thesis, Tokyo Institute of Technology, 1974.
28. Sugeno M. 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. Sugeno M. 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. Yager R. R., Zadeh L. A. *An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems*. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992. – 385 p.
34. Yager R. R., Filev D. P. *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. – New York: Wiley, 1994. – 388 p
35. Singhal S., Ranganth M. S., Batra R., Nanda S. *Application of Fuzzy Logic and Fuzzy Systems in Machining: A Literature Review* / S. Singhal, M. S. Ranganth, R.

Batra, S. Nanda. – *6th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Kuala Lumpur (Malaysia), 8–10 March 2016, Kuala Lumpur : IEOM Society International, 2016.

36. Ivanov V. *A review of fuzzy methods in automotive engineering applications* / V. Ivanov // *European Transport Research Review*. – 2015. – T. 7, Apt. 29.

37. Nithya V., Sivakumar R. Review on PID, fuzzy and hybrid fuzzy PID controllers for controlling non-linear dynamic behaviour of chemical plants // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2021. – Vol. 175. – P. 151–170.

38. Ahmed M., Khan M. J. A Review of Mamdani, Takagi–Sugeno, and Type-2 Fuzzy Controllers for MPPT and Power Management in Photovoltaic Systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2024. – Vol. 196. – 105212

39. Chitra S., Jackson S. A Review: Some Application on Fuzzy Logic // *Mathematical Statistician and Engineering Applications*. – 2022. – Vol. 71, No. 4. – P. 200–215.

40. Belman-Flores J. M., Rodríguez-Valderrama D. A., Ledesma S., García-Pabón J. J., Hernández D., Pardo-Cely D. *A Review on Applications of Fuzzy Logic Control for Refrigeration Systems* / J. M. Belman-Flores et al. // *Applied Sciences*. – 2022. – T. 12, № 3, Apt. 1302.

41. Castillo O., Valdez F., Melin P., Ding W. A Survey on Type-3 Fuzzy Logic Systems and Their Control Applications // *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. – 2024. – Vol. 11, No. 8. – P. 1744–1756

42. Krzystoń E., Mikołajewski D., Prokopowicz P. Review of Fuzzy Methods Application in IIoT Security – Challenges and Perspectives // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14, No. 17. – 3475.

43. 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.

44. 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.

45. Kosko, Bart. "Fuzzy systems as universal approximators." *IEEE Transactions on Computers*, vol. 43, no. 11, 1993, pp. 1329–1333.
46. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / П. В. Леонтьєв та ін. ; за заг. ред. П. В. Леонтьєва. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 296 с.
47. 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.
48. 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.
49. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / П. В. Леонтьєв та ін. ; за заг. ред. П. В. Леонтьєва. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 296 с.
50. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / О. К. Аблесімов – К. : «Освіта України», 2019. – 270 с.
51. 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.
52. Теорія автоматичного управління : курс лекцій / Т. М. Боровська. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 256 с.
53. 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
54. 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.

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

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

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

58. 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.

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

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

61. Шефер О.В. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. – Полтава: ПолтНТУ, 2020. – 154 с.

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

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

64. Моделювання систем управління в SIMULINK : навч. посібник / В. О. Богомолів, О. Г. Гурко, В. І. Клименко, Д. М. Леонтьєв, О. М. Красюк. Харків ХНАДУ, 2018. – 220 с.

ДОДАТОК А

ТЕОРЕТИКО-МАТЕМАТИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ

А.1 Формальне означення нечіткої множини та її базові характеристики

Поняття нечітких множин (англ.: *fuzzy sets*) як узагальнення звичайних (чітких) множин було введено Л. Заде в 1965 р. Традиційний спосіб представлення елементу множини A полягає в застосуванні характеристичної функції $\mu_A(x)$ яка рівна 1, якщо цей елемент належить до множини A , або рівна 0 інакше. У нечітких системах елемент може частково належати до будь-якої множини. Ступінь приналежності до множини A , що є узагальненням характеристичної функції, називається функцією приналежності $\mu_A(x)$, причому $\mu_A(x) \in [0,1]$. Значення функції приналежності є раціональними числами з інтервалу $[0,1]$, де 0 означає відсутність приналежності до множини, а 1 – повну приналежність. Конкретне значення функції приналежності називається *ступенем або коефіцієнтом приналежності*. Цей ступінь може бути визначений явним чином у вигляді функціональної залежності (наприклад $\mu_A(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-3}{0,2}\right)^2\right)$ або дискретно – шляхом завдання кінцевій послідовності значень $x \in \{x_N\}$ у вигляді.

$$A(x) = \left\{ \frac{\mu(x_1)}{x_1}, \frac{\mu(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\mu(x_N)}{x_N} \right\}.$$

Наприклад, для послідовності дискретних значень змінної x , рівних $x_1 = 7, x_2 = 8, x_3 = 9, x_4 = 10, x_5 = 11, x_6 = 12, x_7 = 13$, їх коефіцієнт приналежності до чисел, близьких 10, може бути визначений у вигляді

$$A(x) = \left\{ \frac{0,1}{7}, \frac{0,3}{8}, \frac{0,8}{9}, \frac{1,0}{10}, \frac{0,8}{11}, \frac{0,3}{12}, \frac{0,1}{13} \right\}.$$

У теорії нечітких множин, крім змінних цифрового типу, існують лінгвістичні змінні з приписуваними ним значеннями. Хай змінна x позначає температуру ($x = \text{"температура"}$). Можна визначити нечіткі множини "негативна", "близька до нуля", "позитивна", що характеризується функціями $\mu_{\text{від}}(x)$, $\mu_{\text{бнул}}$, $\mu_{\text{догат}}(x)$. Так само як звичайна змінна може приймати різні значення, лінгвістична змінна "температура" може приймати різні лінгвістичні значення. У даному прикладі це: "негативна", "близька до нуля" і "позитивна". Отже, лінгвістичний вираз може мати вигляд: "температура негативна", "температура, близька до нуля", "температура позитивна".

На рис. А.1 приведена графічна ілюстрація функції приналежності змінної $x = T$ (де T означає температуру) для трьох названих множин значень температури. Безперервними лініями позначена класична (точна) приналежність, а пунктирними лініями – нечітка приналежність. Можна відзначити, що функція нечіткої приналежності є безперервним наближенням порогової функції точної приналежності.

Кожну нечітку множину має певний *носій* (англ.: *support*). Носієм множини $Supp(A)$ є підмножина тих елементів A , для яких коефіцієнт приналежності до A не рівний нулю, тобто $Supp(A) = \{x, \mu_A(x) > 0\}$. У приведеному вище прикладі на рис. А.1 носієм множини "близька до нуля" є множина температур в інтервалі від -4°C до $+4^{\circ}\text{C}$.

Дві множини $A(x)$ і $B(x)$ рівні між собою, коли $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ для кожного елементу обох множин. *Кардинальне число* нечіткої множини A рівно сумі коефіцієнтів приналежності всіх елементів до цієї множини $M(A) = \sum \mu_A(x)$. Це узагальнення аналогічного поняття, що відноситься до звичайних множин, для яких кардинальне число рівне сумі елементів множини. Нечітка множина є *нормальною*, якщо хоч би один елемент цієї множини має коефіцієнт приналежності, рівний 1. *Перетин α* нечіткої множини A утворюється підмножиною A_α , що містить ті елементи множини A , для яких $\mu_A(x) > \alpha$ (слабкий перетин) або $\mu_A(x) \geq \alpha$ (сильний перетин), причому $\alpha \in [0, 1]$.

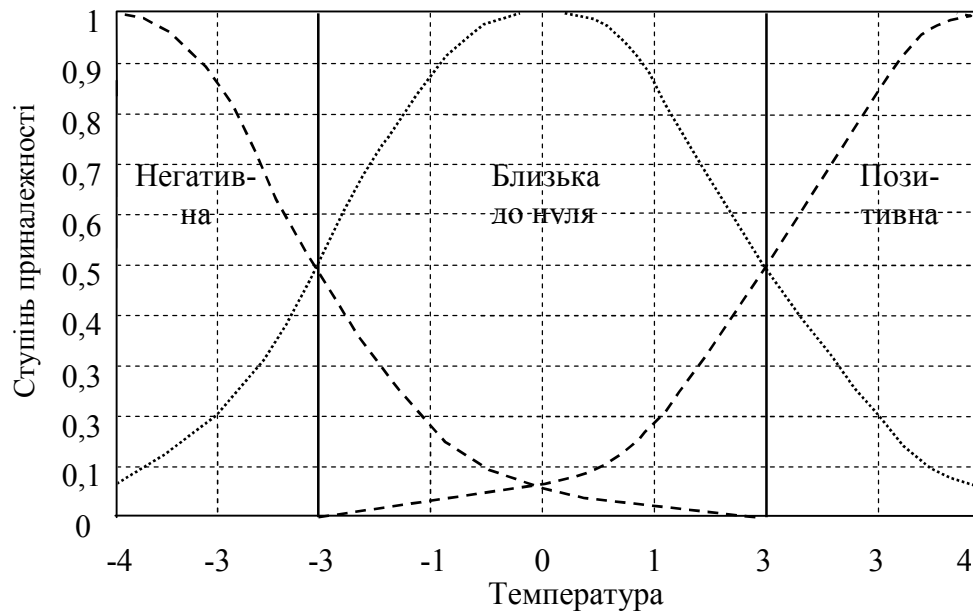


Рисунок А.1 – Ілюстрація поняття приналежності температури до області негативної, близької до нуля або позитивної (пунктирні лінії – нечітка система, суцільні лінії – точна система)

А.2 Операційні перетворення нечітких множин

На нечітких множинах, що розглядаються як узагальнення звичайних множин, можна визначити ряд математичних операцій, що є узагальненням аналогічних операцій, які виконуються на "чітких" множинах. До них серед інших відносяться:

1. Логічна сума множин $A \cup B$

$$M_{A \cup B}(x) = M_A(x) \cup M_B(x) = \text{Max}[A(x), B(x)],$$

де знак $\cup$ позначає оператора Max .

Наприклад, дано дві нечіткі множини A і B , визначені таким чином:

$$A = \left\{ \frac{1,0}{x_1}, \frac{0,7}{x_2}, \frac{0,5}{x_3}, \frac{0,1}{x_4} \right\},$$

$$B = \left\{ \frac{0,2}{x_1}, \frac{0,5}{x_2}, \frac{0,6}{x_3}, \frac{0,7}{x_4} \right\}.$$

Логічна сума цих множин рівна $C = A \cup B$:

$$C = \left\{ \frac{1,0}{x_1}, \frac{0,7}{x_2}, \frac{0,6}{x_3}, \frac{0,7}{x_4} \right\}.$$

2. Логічний добуток множин $A \cap B$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \text{Min}[A(x), B(x)],$$

де знак $\cap$ позначає оператора Min . Для даних з вище приведеного прикладу множина C , що є логічним добутком множин A і B , матиме вид

$$C = \left\{ \frac{0,2}{x_1}, \frac{0,5}{x_2}, \frac{0,5}{x_3}, \frac{0,1}{x_4} \right\}.$$

3. Заперечення множини $\bar{A}$

$$M_{\bar{A}}(x) = 1 - M_A(x).$$

На відміну від звичайних (чітких) множин, де заперечення елементів, що належать до множини, дає порожню множину, заперечення нечіткої множини визначає непорожню множину, що складається з елементів, функції приналежності яких також визначені на інтервалі $[0,1]$.

4. Рівність множин A і B

Нечіткі множини $A(x)$ і $B(x)$ рівні між собою, коли для всіх елементів x_i обох множин виконується умова $\mu_A(x_i) = \mu_B(x_i)$.

5. Операція концентрації $CON(A)$

$$\mu_{CON}(x) = [\mu_A(x)]^2.$$

Ця операція вельми часто виконується при діях з лінгвістичною змінною, в яких вона ототожнюється з інтенсифікатором "дуже".

6. Операція розтягування $DIL(A)$

$$\mu_{DIL}(x) = [\mu_A(0,5)]^{0,5}.$$

Лінгвістичне значення цієї операції формулюється як "приблизно".

7. Алгебраїчний добуток двох множин $A \cdot B$

$$\mu_{A \cdot B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x).$$

8. Обмежена сума двох нечітких множин $A|+|B$

$$\mu_{A|+|B}(x) = \min\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x)\}.$$

9. Обмежена різниця двох нечітких множин $A|-|B$

$$\mu_{A|-|B}(x) = \max\{0, \mu_A(x) - \mu_B(x)\}.$$

10. Обмежений добуток двох нечітких множин $A|\cdot|B$

$$\mu_{A|\cdot|B}(x) = \max\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1\}.$$

11. Нормалізація множини $NORM(A)$

$$\mu_{NORM}(x) = \frac{\mu_A(x)}{\max\{\mu_A(x)\}}$$

Слід зазначити, що множина A вважається підмножиною множини B , тобто $A \subset B$, коли для всіх елементів виконується нерівність $\mu_A(x_i) \leq \mu_B(x_i)$.

Наприклад, якщо $A = \left\{ \frac{0,5}{x_1}, \frac{0,3}{x_2}, \frac{0,1}{x_3} \right\}$ і $B = \left\{ \frac{0,6}{x_1}, \frac{0,5}{x_2}, \frac{0,4}{x_3} \right\}$, то $A \subset B$.

Визначені на нечітких множинах операції володіють властивостями асоціативності, комутативній і дистрибутивності, причому ці властивості розуміються таким чином:

- асоціативність: $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$;
- комутативна: $A \cdot B = B \cdot A$ (за винятком обмеженої різниці);
- дистрибутивність: $A \cdot (B \circ C) = (A \cdot B) \circ (A \cdot C)$,

де оператори $\cdot$ і $\circ$ позначають будь-яку визначену вище операцію на нечітких множинах. З властивостей нечітких множин виходить, що на відміну від добутку звичайних множин, логічний добуток множини і його заперечення не обов'язково утворюють порожню множину, що можна записати у вигляді

$$A \cap \bar{A} \neq \emptyset.$$

Так само і логічна сума нечіткої множини A і її заперечення не утворюють повна множину $\cup$, що можна записати у вигляді

$$A \cup \bar{A} \neq \cup.$$

А.3 Кількісні індикатори та метрики для оцінювання рівня нечіткості

Для визначення ступеня нечіткості множини введено поняття міри нечіткості, що відповідає так званим умовам А. ДеЛуки і С.Терміні, що зводиться до вимірювання рівня відмінності між множиною A і її запереченням B .

Найбільш популярна міра Р.Єгера, відповідно до якої ступінь нечіткості множини A у метриці p , що позначається $FUZ_p(A)$ визначається виразом

$$FUZ_p(A) = 1 - \frac{D_p(A, \bar{A})}{n^{1/p}}, \quad (A.1)$$

де $D_p(A, \bar{A})$ – це міра відстані між множинами A і $\bar{A}$, що містять n елементів. Значення $p=1$ відповідає метриці Хеммінга, в якій

$$D_1(A, \bar{A}) = \sum_{i=1}^n |2M_A(x_i) - 1|,$$

а значення $p = 2$ відповідає метриці Евкліда, в якій

$$D_1(A, \bar{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (2M_A(x_i) - 1)^2}.$$

Наприклад, якщо нечітка множина A визначається дискретним способом як

$$A(x) = \left\{ \frac{0,1}{x_1}, \frac{0,5}{x_2}, \frac{0,8}{x_3}, \frac{1,0}{x_4}, \frac{0,8}{x_5}, \frac{0,5}{x_6}, \frac{0,1}{x_7} \right\},$$

відповідно до міри Єгера отримуємо:

$$FUZ_1(A) = 1 - \frac{1}{7}(0,8 + 0 + 0,6 + 1 + 0,6 + 0 + 0,8) = 0,457,$$

$$FUZ_2(A) = 1 - \frac{1}{\sqrt{7}} = (0,64 + 0 + 0,36 + 1 + 0,36 + 0 + 0,64) = 0,347.$$

Іншу міру нечіткості (ентропійну) запропонував Б.Коско. Вона заснована на понятті кардинального числа множини. Відповідно до цієї міри

$$FUZ(A) = \frac{M(A \cap \bar{A})}{M(A \cup \bar{A})},$$

де $M(F)$ позначає кардинальне число множини F . Для множини A з прикладу отримуємо міру Коско, рівну

$$FUZ(A) = \frac{0,1 + 0,5 + 0,2 + 0 + 0,2 + 0,5 + 0,1}{0,9 + 0,5 + 0,8 + 1 + 0,8 + 0,5 + 0,9} = \frac{1,6}{5,4} = 0,296.$$

Слід звернути увагу, що обидві міри – Єгера і Коско – для чітких множин дають один і той же нульовий результат, оскільки в мірі Коско $M(A, \bar{A}) = 0$, а $D_p(A, \bar{A}) = n^{1/p}$ що унаслідок залежності (А.1) дає в результаті також $FUZ_p(A) = 0$.

А.4 Співвідношення між нечіткою невизначеністю та ймовірнісними моделями

У теорії вірогідності подія $u \in U$ або відбувається, або ні, а вірогідність $p(u)$ представляє міру того, що вона відбудеться або що випадкова змінна x прийме значення u . Оцінка вірогідності $p(u)$ може бути розрахована як відношення кількості експериментів, в яких вказана подія відбулася, до загальної кількості експериментів. Наприклад, якщо день 31 листопада протягом останніх 100 років був дощовим 83 рази, то вірогідність дощу цього дня в даному році оцінюється як 0,83. Слід підкреслити, що вірогідність події відноситься виключно до майбутнього. Коли відповідний день наступить, дана подія або відбудеться, або ні, і у цей момент поняття вірогідності її звершення втрачає сенс (наприклад, у момент початку дня 31 листопада все ще не ясно, буде цей день дощовим чи ні, проте коли він завершиться, ми говоритиме про те, відбулося чи ні подія, а не про її вірогідність).

Поняття нечіткості оцінюється абсолютно по-іншому. Воно вимірюється ступенем, з яким подія $x = u$ (наприклад, що тільки що відбулася) належить до деякої множини подій A . Фактично вимірюється ступінь, в якому універсальна множина U міститься в підмножині A . Наприклад, якщо 31 листопада дощ йшов впродовж 15 год., то ступінь його приналежності до множини дощових днів можна визначити як 15/24. З цієї точки зору поняття нечіткості відноситься не тільки до минулого, як це має місце у разі вірогідності, але також до сьогодення і до майбутнього.

Слід зазначити, що вірогідність може бути визначена як нечітке значення, особливо тоді, коли воно оцінюється приблизно, а не точним способом. Тому можна сказати, що вірогідність настання певної події складає, наприклад, "близько 0,7", оскільки змінна "близько 0,7" є лінгвістичною. Якщо ж нечітке поняття відноситься до майбутнього, йому можна приписати деяку вірогідність.

Як приклад розглянемо вірогідність випадання кості з певним номером з інтервалу [1-6]. Допустимо, що є три нечітка множина чисел: "мале", "середнє"

і "велике", функції приналежності яких представлені на рис. А.2,а. Вірогідність $p(x)$ настання нечіткої події, що x – це мале, середнє або велике число, визначається по формулі

$$p(x) = \sum_{i=1}^6 \mu(x_i) p(x_i),$$

де $p(x_i)$ позначає вірогідність випадання певного числа з [1-6]. Якщо допустити рівномірний розподіл вірогідності випадання кожного числа ($p(x_i) = 1/6$) так, як це представлено на рис. А.2,б, отримаємо:

$$p(x = \text{"мале"}) = \frac{1}{6} \cdot (1 + 0,5) = 0,25,$$

$$p(x = \text{"середнє"}) = \frac{1}{6} \cdot (0,5 + 1 + 0,5) = 0,333,$$

$$p(x = \text{"велике"}) = \frac{1}{6} \cdot (0,5 + 1 + 1) = 0,418.$$

У приведеному результаті враховується поняття нечіткості лінгвістичної змінної: "мале число", "середнє число", "велике числа", а кожній події приписується вірогідність її настання.

А.5 Принципи побудови нечітких продукційних правил і механізми логічного виведення

Базове правило виведення типу "якщо – то" (англ.: *if – then rule*) називається *нечіткою імплікацією*, що приймає форму

$$\text{якщо } x \text{ це } A, \text{ то } y \text{ це } B, \quad (\text{А.1})$$

де A і B – це лінгвістичні значення, ідентифіковані нечітким способом через відповідні функції приналежності для змінних x і y . Частина " x це A " називається умовою (передумовою), а " y це B " – слідством (висновком). Імплікацію (A.1) можна записати в скороченому вигляді $A \rightarrow B$. Нечітке міркування – це процедура, яка дозволяє визначити висновок, що витікає з множини правил "якщо – то". Така множина при N змінних x може прийняти вигляд

$$\text{якщо } x \text{ це } A_1 \text{ і } x_2 \text{ це } A_2 \text{ і } \dots \text{ і } x_N \text{ це } A_N, \text{ то } y \text{ це } B. \quad (\text{A.2})$$

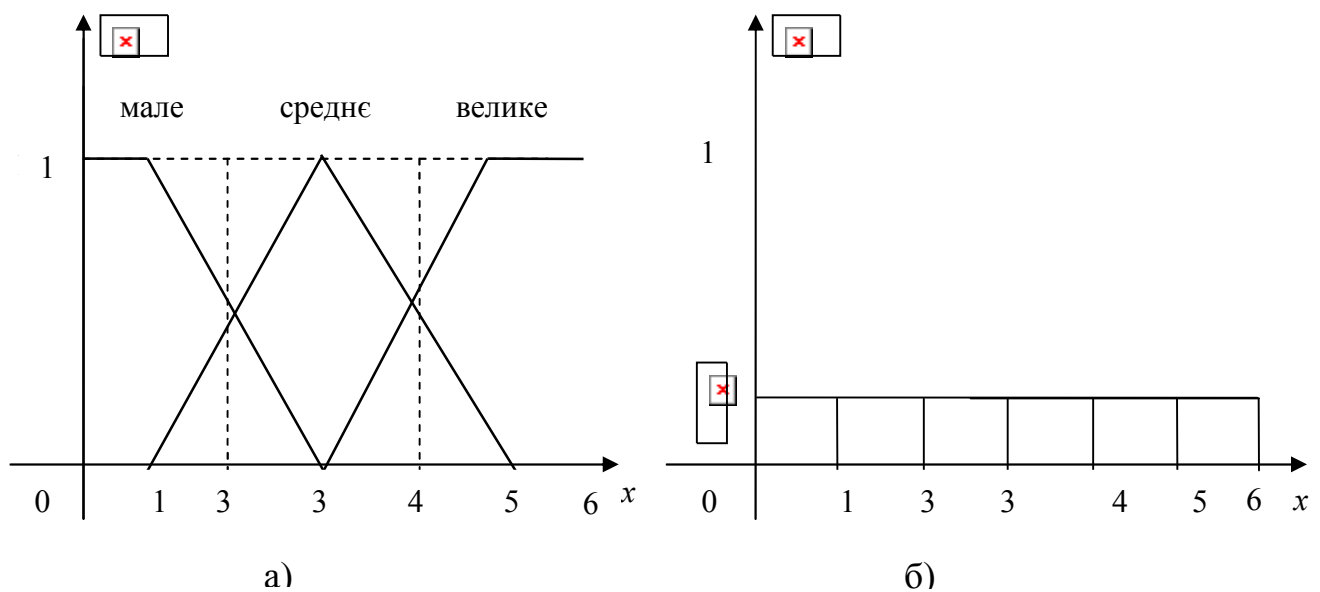


Рисунок А.2 – Графічна ілюстрація даних з прикладу викидання кості:

- а) функції приналежності;
- б) вірогідність випадання відповідного номера

Змінні $x_1, x_2, \dots, x_N$ утворюють N -мірний вхідний вектор x , що становить аргумент умови, в якій $A_1, A_2, \dots, A_N$ і B позначають величини відповідного коефіцієнта приналежності $\mu_A(x_i)$ і $\mu_B(y)$. Необхідно звернути увагу, що тут присутні індивідуальні функції приналежності для кожної змінної x_i , і окремо для y . Випадкове значення функції приналежності $\mu_A(x)$, де x – це вектор

$x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$, що відноситься до умови імплікації (рівень активації правила), повинно в подальшому інтерпретуватися з використанням введених раніше нечітких операцій. Можлива інтерпретація у формі логічного добутку множин або у формі алгебраїчного добутку:

- інтерпретація у формі логічного добутку

$$\mu_A(x) = \min_{i=1, \dots, N} (\mu_A(x_i)) ; \quad (\text{A.3})$$

- інтерпретація у формі алгебраїчного добутку

$$\mu_A(x) = \prod_{i=1}^N \mu_A(x_i) . \quad (\text{A.4})$$

Приписування єдиного значення функції приналежності, що описує багатовимірну умову, називатимемо *агрегацією передумови*. Кожній імплікації $A \rightarrow B$, визначеній виразом (A.2), можна приписати також єдине значення функції приналежності $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$. Найбільш популярні інтерпретації цієї функції також мають форму логічного або алгебраїчного добутку:

- форма логічного добутку

$$\mu_{A \rightarrow B} = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(y) \} ; \quad (\text{A.5})$$

- форма алгебраїчного добутку:

$$\mu_{A \rightarrow B} = \mu_A(x) \mu_B(y) . \quad (\text{A.6})$$

Приписування єдиного значення функції приналежності всій імплікації називається процедурою агрегації на рівні імплікації.

ДОДАТОК Б

АЛГОРИТМИ ТА СТРУКТУРИ СИСТЕМ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ

Б.1 Класична архітектура систем Мамдані–Заде

Елементи теорії нечітких множин, правила імплікації і нечітких міркувань утворюють систему нечіткого висновку. У ній можна виділити множину використовуваних в системі нечітких правил, базу даних, що містить описи функцій приналежності, а також механізм висновку і агрегації, який формується вживаними правилами імплікації. Слід згадати, що у разі технічної реалізації як вхідні і вихідні сигнали виступають вимірювані величини, що однозначно зіставляють вхідним значенням відповідні вихідні значення. Для забезпечення взаємодії множини цих двох видів вводиться нечітка система з так званими *фузифікатором* (перетворювачем множини вхідних даних в нечітку множину) на вході і *дефузифікатором* (перетворювачем нечітких множин в конкретне значення вихідної змінної) на виході. Структура такої системи представлена на рис.Б.1.

Фузифікатор перетворить точну множину вхідних даних в нечітку множину, визначувану за допомогою значень функцій приналежності, тоді як дефузифікатор вирішує зворотну задачу – він формує однозначне рішення щодо значення вихідної змінної на підставі багатьох нечітких висновків, що виробляються виконавчим модулем нечіткої системи. Вихідний сигнал цього модуля може мати вид M нечітких множин, що визначають діапазон зміни вихідний змінної. Дефузифікатор перетворить цей діапазон в одне конкретне значення, що приймається як вихідний сигнал всієї системи.

Необхідно відзначити, що також існують системи нечіткого висновку, в яких виконавчий механізм безпосередньо генерує чіткі значення, які вже не потрібно піддавати дефузифікації. Як приклад можна назвати систему Такаги-Сугено-Канга.

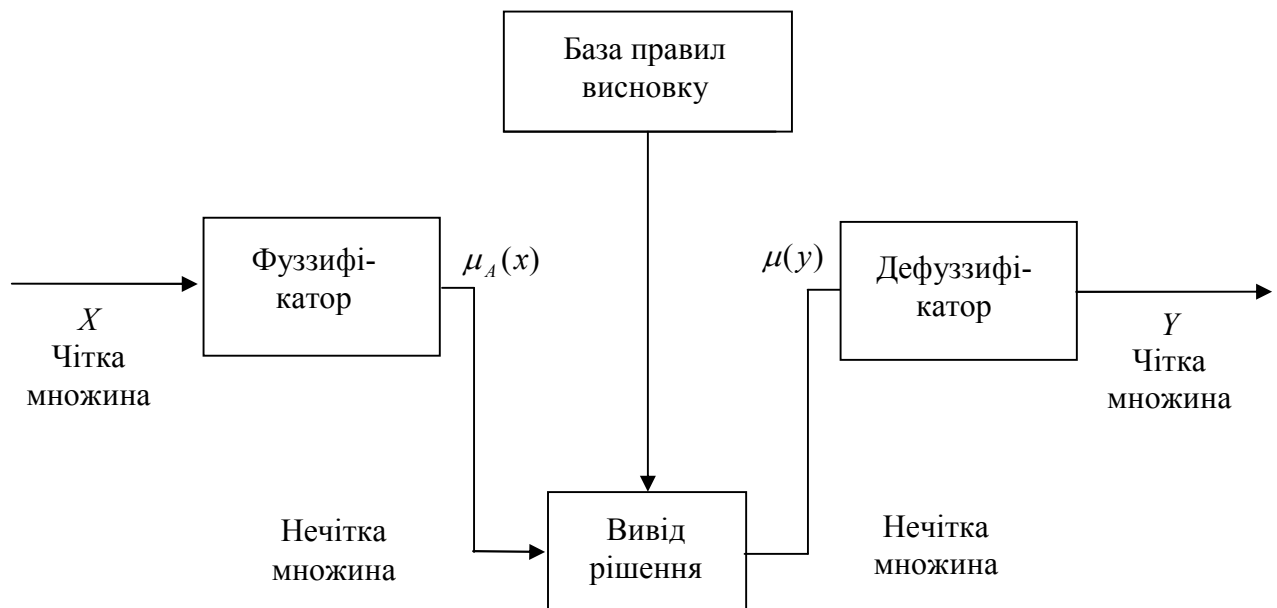


Рисунок Б.1 – Структура нечіткої системи з фузифікатором і дефузифікатором

Узагальнена функціональна структура системи, приведена на рис.А.2, може бути представлена в розширеній формі, яка в явному вигляді демонструє правила нечіткого висновку так, як це зображено на рис. Б.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-Заде. Вона дуже популярна в звичайних (неадаптивних) нечітких системах. Як правило, в моделі Мамдані-Заде присутні наступні оператори:

- оператор логічного або арифметичного добутку для визначення результуючого рівня активації, в якому враховуються всі компоненти вектора x умови;
- оператор логічного або арифметичного добутку для визначення значення функції приналежності для всієї імплікації $A \rightarrow B$;
- оператор логічної суми як агрегатор рівнозначних результатів імплікації багатьох правил;

- оператор дефузифікації, що трансформує нечіткий результат $\mu(y)$ у чітке значення вихідної змінної y .

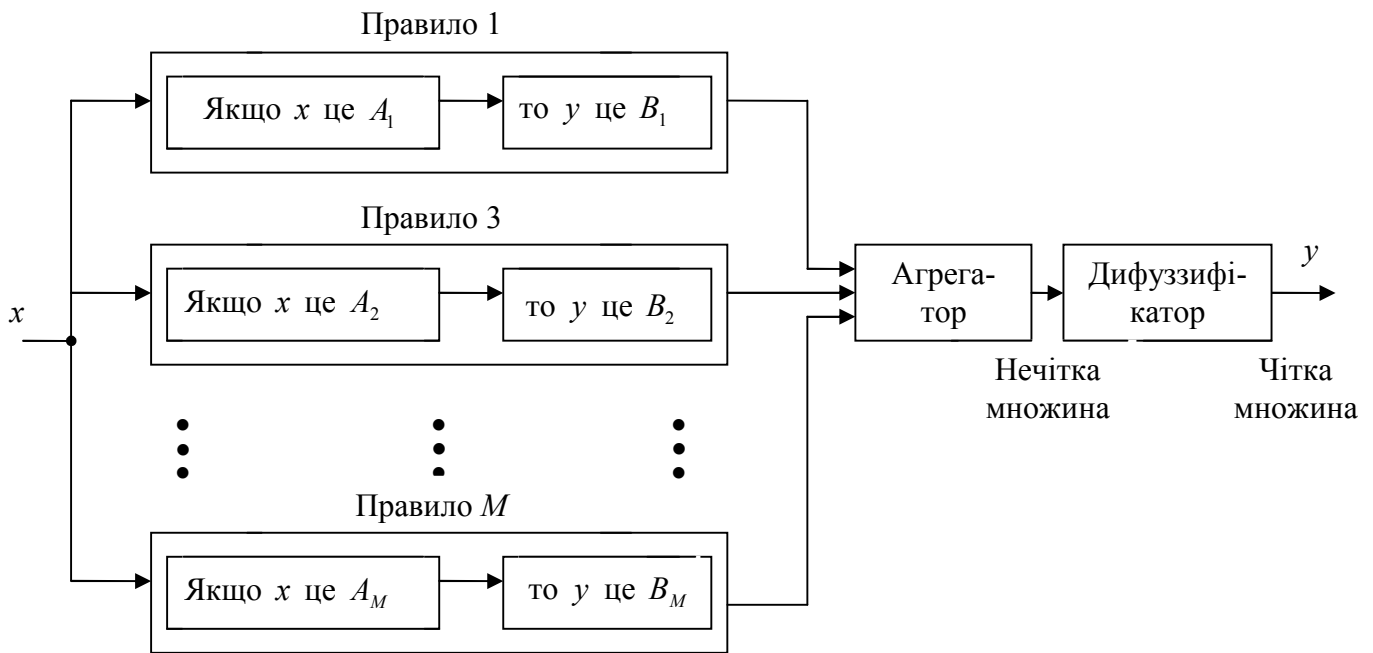


Рисунок Б.2 – Організація висновку в нечіткій системі
за наявності M правил висновку

Як приклад на рис. Б.3 представлений спосіб агрегації два правил нечіткого висновку при існуванні двох значень змінних x_1 і x_2 . Логічний добуток: (оператор Min) використовується як для агрегації нечітких правил щодо конкретних змінних x_i ($i=1,2$), утворюючих вектор x , так і на рівні імплікації $A \rightarrow B$ для одиночних правил висновку. Агрегація імплікацій, що стосуються правил 1 і 2, проводиться з використанням логічної суми (оператор Max). У правій нижній частині рисунка представлений нечіткий результат y у вигляді функції приналежності змінної y . Набуття чіткого значення y , відповідного також чітким значенням вхідних змінних x_1 і x_2 вимагало б в цьому випадку застосування процедури дефузифікації.

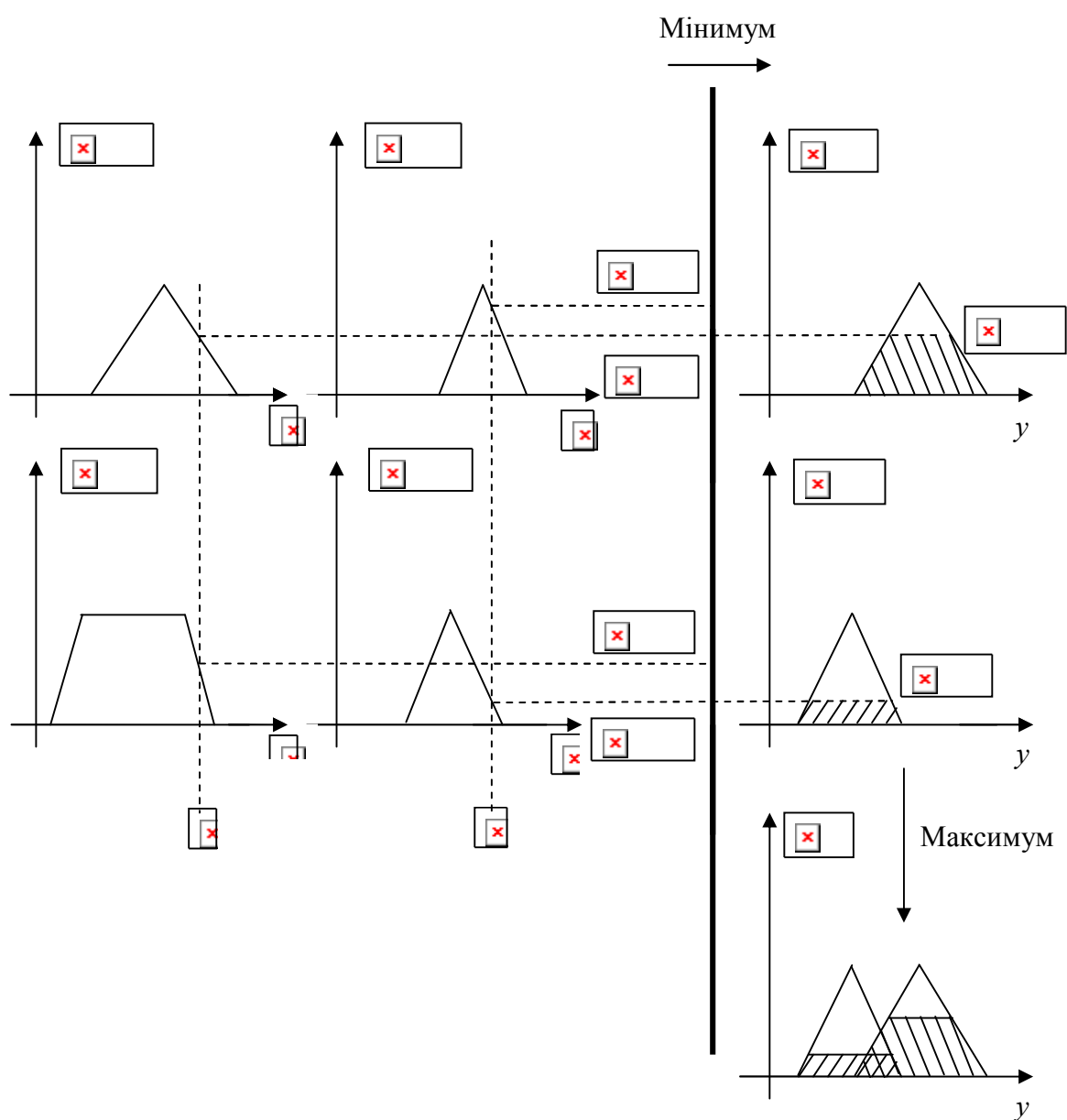


Рисунок Б.3 – Ілюстрація прикладу системи висновку Мамдані-Заде

Б.1.1 Фузифікатор

Фузифікатор перетворить N -мірний вхідний вектор $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ у нечітку множину A , що характеризується функцією приналежності $\mu_A(x)$ з чіткими змінними. Не дивлячись на те, що нечіткі системи можуть мати функції приналежності довільної структури, з практичної точки зору найбільшою популярністю користуються функції гаусового типу, а також трикутні і трапецієподібні функції.

Загальна форма функції гауса для змінної x з центром c і варіацією a для множини F має вигляд:

$$\mu_A(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c}{\sigma} \right)^2 \right]. \quad (\text{Б.1})$$

На рис. Б.4 представлена форма типових гаусових функцій при різних параметрах c і a , причому на рис. Б.4,а показаний вплив розміщення центру c при незмінному значенні a , а на рис. Б.4,б – вплив значення a при фіксованому положенні c . Параметр c позначає центр нечіткої множини, а його зміна відповідає зсуву функції приналежності по горизонтальній осі. Параметр, іноді званий коефіцієнтом широти, відповідає за форму функції. Чим менше його значення, тим більше крутизна функції. Слід зазначити, що при відповідному зсуві центру функція гауса може реалізувати і сигмоїдальну функцію (найчастіше при зсуві управо c).

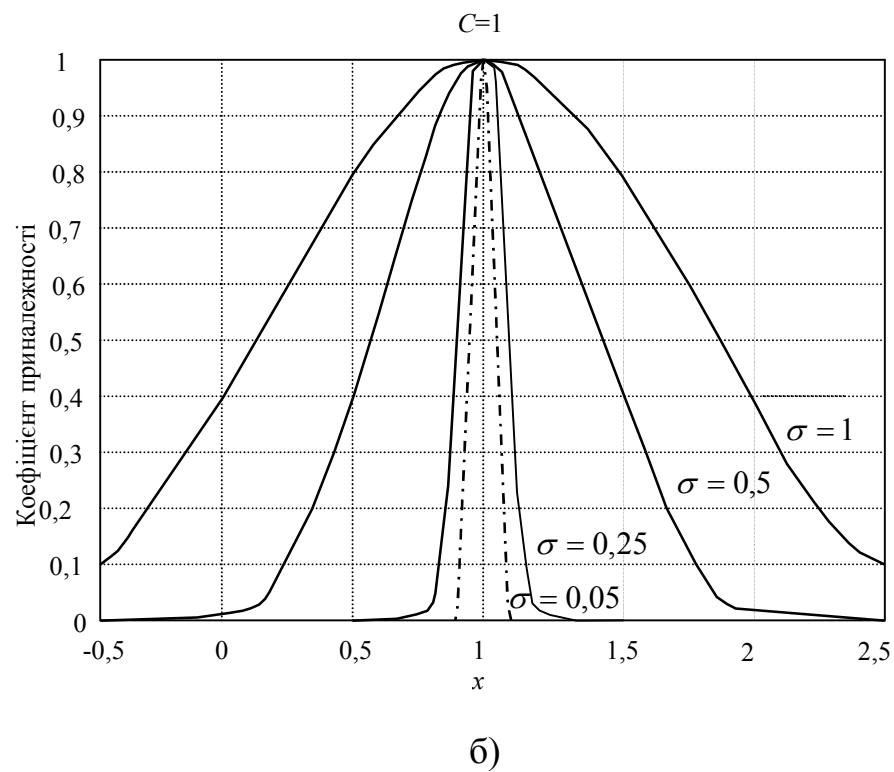
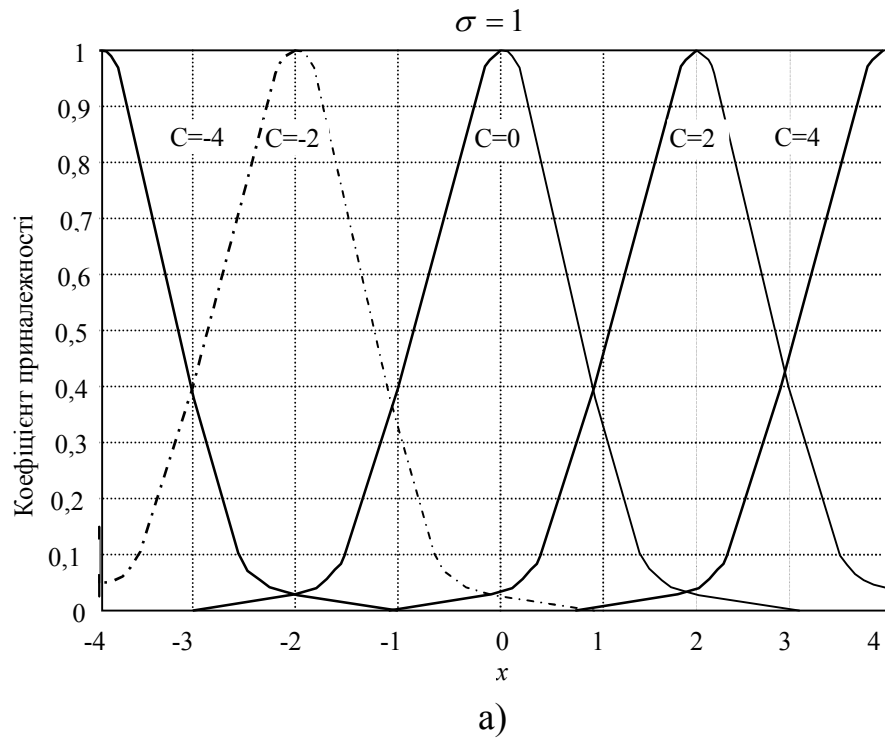


Рисунок Б.4 – Ілюстрація впливу параметрів функції гауса на її форму:

- а) – вплив розміщення центру c при $\sigma = 1$;
- б) – вплив значення σ при постійному значенні $c = 1$

У нечітких мережах також застосовується узагальнена функція гауса, яка визначається формулою

$$\mu_A(x) = \exp \left[- \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^{2b} \right]. \quad (\text{Б.2})$$

Вона оперує трьома параметрами: c , σ і b . Значення параметра b істотним чином впливає на форму кривої, що демонструється на рис.Б.5.

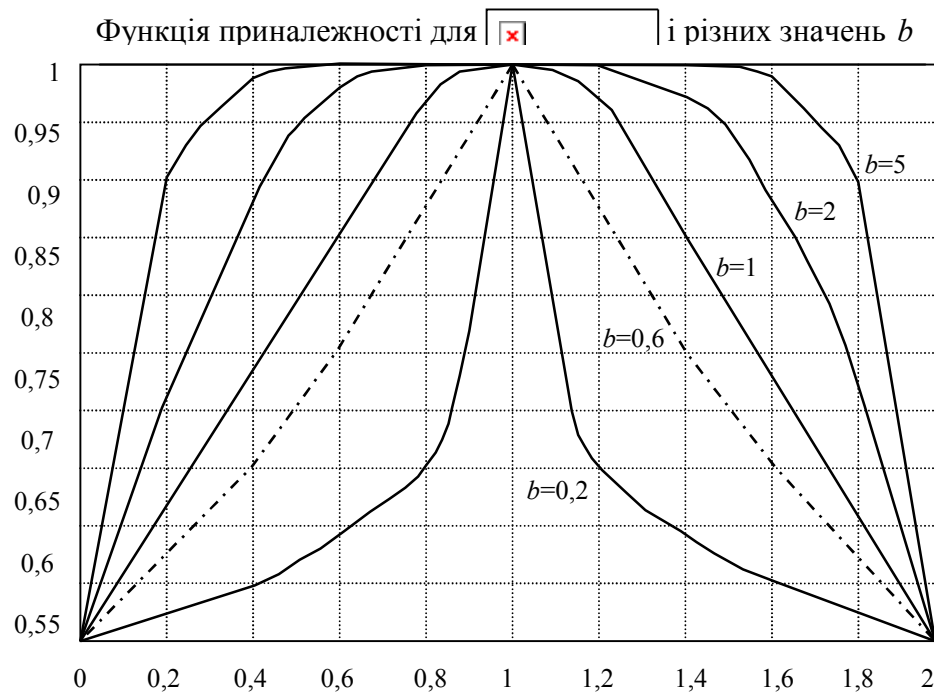


Рисунок Б.5 – Ілюстрація впливу параметра b на форму функції гауса

На рисунку видно, що при відповідному підборі показника ступеня b (залежність (Б.2)) вона може визначати як функцію Гауса, так і трикутну або трапецеїдальну функцію. Значення $b = 1$, очевидно, відповідає стандартній функції гауса. Узагальнена функція гауса також може бути представлена в раціональній формі:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^{2b}}, \quad (\text{Б.3})$$

яка аналогічна описуваній виразом (5.7).

Крім функції гауса приналежності, на практиці часто застосовується симетрична трикутна функція, яку можна записати у вигляді

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x-c|}{d} & \text{для } x \in [c-d, c+d] \\ 0 & \text{для решти} \end{cases}. \quad (\text{Б.4})$$

Інтерпретація центральної точки c і ширини d для трикутної функції представлена на рис. Б.6,а. Ця функція теж нормована і приймає одиничне значення в центральній точці c .

Узагальненням трикутної функції є трапецеїдальна функція приналежності, форма і позначення якої представлені на рис. Б.6,б.

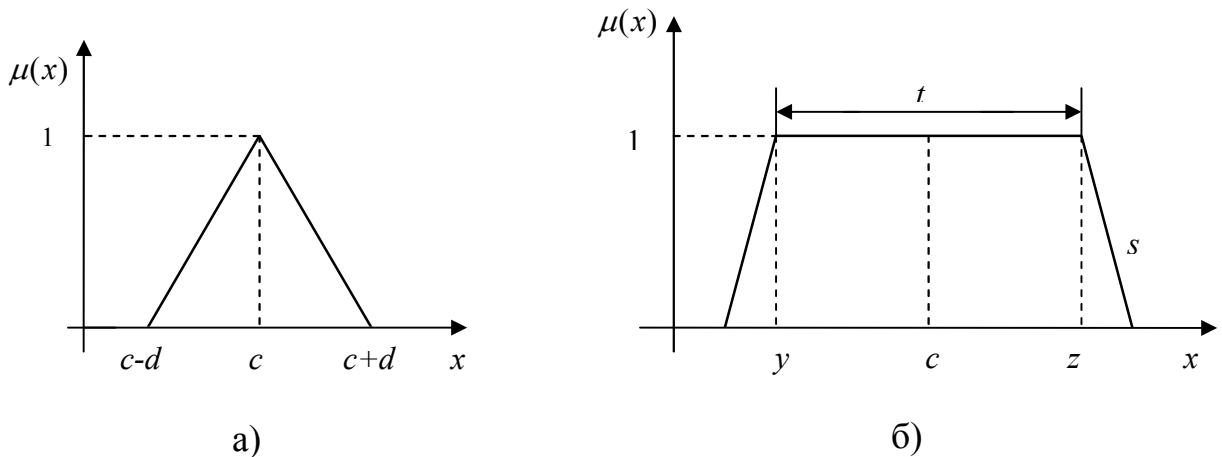


Рисунок Б.6 – Трикутна а) і трапецеїдальна б) форми функцій приналежності

Якщо визначити $y = c - \frac{t}{2} - \frac{1}{s}$, $z = c + \frac{t}{2} + \frac{1}{s}$, де s позначає кут нахилу, то трапецеїдальна функція описується залежністю

$$\mu_{A^{(1)}}(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{для } x > z \text{ або } x < y \\ 1 & \text{для } c - \frac{t}{2} \leq x \leq c + \frac{t}{2} \\ s(z-x) & \text{для } c + \frac{t}{2} \leq x \leq z \\ s(z-y) & \text{для } y \leq x \leq c - \frac{t}{2} \end{cases} \quad (\text{Б.5})$$

Вибір значення $t=0$ редукує трапецеїдальну функцію до трикутної форми.

Б.1.2 Деффузіфікатор

Деффузіфікатор трансформує нечітку множину в повністю детерміноване точкове рішення y . Нечітку множину представляє залежність $\mu_y = \mu_{A \rightarrow B}(y)$ як функцію від вихідної змінної y . Перетворення цієї множини в єдине точкове рішення можливо багатьма способами. Найбільш відомі серед них:

- деффузіфікація щодо центру області (англ.: *Center of Area*)

$$y_c = \frac{\int \mu(y)y dy}{\int_y \mu(y) dy}, \quad (\text{Б.6})$$

або в дискретній формі

$$y_c = \frac{\sum_i \mu(y_i)y_i}{\sum_i \mu(y_i)}; \quad (\text{Б.7})$$

- деффузіфікація щодо середнього центру (англ.: *Center Average*)

$$y_c = \frac{\sum_i^M \mu(y_{ci})y_{ci}}{\sum_i \mu(y_{ci})}, \quad (\text{Б.8})$$

де y_i позначає центр i -го нечіткого правила, а $\mu(y_{ci})$ – значення функції приналежності, відповідної цьому правилу;

- деффузификация щодо середнього максимуму (англ.: *Mean of Maxima*)

$$y_M = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m}, \quad (\text{Б.9})$$

де m позначає кількість точок змінної y , у яких $\mu(y_i)$ досягає максимального значення. Якщо функція $\mu(y)$ має максимальне значення тільки в одній точці $y_{\max}$, то $y_M = y_{\max}$. Якщо $\mu(y)$ досягає своїх максимальних значень між y_1 і y_2 ,

то $y_m = \frac{1}{2}(y_1 + y_2)$

- у формі вибору мінімального з максимальних значень y

$$y_s - \text{найменше значення } y, \text{ для якого } \{\mu(y) = \max\}; \quad (\text{Б.10})$$

- дефузифікація у формі вибору максимального з максимальних значень

$$y_L - \text{найбільше значення } y, \text{ для якого } \{\mu(y) = \max\}. \quad (\text{Б.11})$$

На практиці найчастіше застосовується дефузифікація щодо середнього центру.

На рис. Б.7 представлений нечіткий сигнал, отриманий після агрегації двох правил висновку.

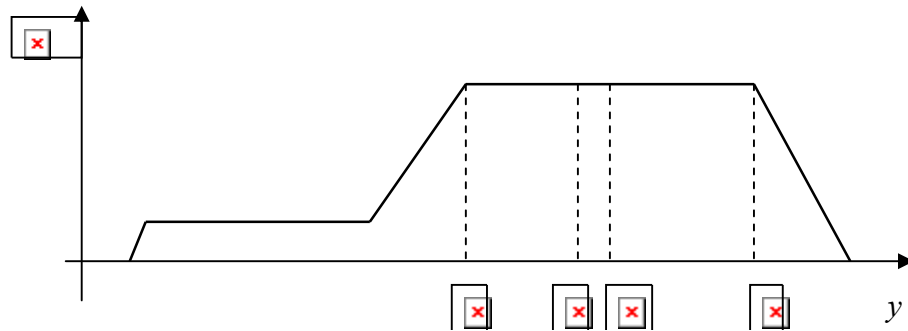


Рисунок Б.7 – Ілюстрація впливу різних способів дефузифікації на підсумкове рішення

Застосування перерахованих вище способів дефузифікації приводить до отримання результатів, відповідних точкам y_c , y_M , y_s і y_L на рисунку.

Б.2 Модель Мамдані–Заде як узагальнений інструмент апроксимації складних залежностей

Результат, цікавий з погляду його застосування в нечітких мережах, може бути отриманий при використанні як агрегатора оператор алгебраїчного добутку з подальшою дефузифікацією щодо середнього центру. Слід зазначити, що

$\mu(y)$ складається з суми нечітких функцій для імплікацій всіх M правил, утворюючих систему нечіткого висновку. У моделі Мамдані-Заде кожне з цих M правил визначається рівнем активації умови $\mu(y_i) = \prod_{j=1}^N \mu_{A_j}(x_j)$, тоді як y_i – це значення y , при якому величина μ_{y_i} стає максимальною (або приймає середнє з максимальних значень). Хай величина μ_i позначає центр c_i – нечіткої множини висновку i -го правила висновку. Тоді дефузифікація щодо середнього центру веде до моделі Менделя-Ванга [32], відповідно до якої

$$y = \frac{\sum_{i=1}^M c_i \left[\prod_{j=1}^N \mu_{A_j}(x_j) \right]}{\sum_{i=1}^M \left[\prod_{j=1}^N \mu_{A_j}(x_j) \right]}. \quad (\text{Б.12})$$

Допустимо, що існує нечітка система, що описується залежністю (5.18), на вхід якої подається послідовність векторів $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$. При використанні фузифікатора у вигляді узагальненої функції гауса $\mu(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c}{\sigma} \right)^{2b} \right]$ вихідний сигнал у цієї системи визначається по формулі

$$y = f(x) = \frac{\sum_{i=1}^M c_i \left[\prod_{j=1}^N \exp \left[- \left(\frac{x_j - c_j^{(i)}}{\sigma_j^{(i)}} \right)^{2b_j^{(i)}} \right] \right]}{\sum_{i=1}^M \left[\prod_{j=1}^N \exp \left[- \left(\frac{x_j - c_j^{(i)}}{\sigma_j^{(i)}} \right)^{2b_j^{(i)}} \right] \right]}, \quad (\text{Б.13})$$

у якій $c_j^{(i)}$, $\sigma_j^{(i)}$, $b_j^{(i)}$ позначають параметри центру, ширини і форми (умови) j -го компоненту вектора x для i -го нечіткого правила висновку. Вираз (5.19) визначає безперервну функцію, яка може використовуватися для апроксимації довільно заданої безперервної функції $g(x)$ від багатьох змінних x_i , утворюючих вектор x . У [32] було доведено, що при відповідному підборі параметрів умови

$(c_j^{(i)}, \sigma_j^{(i)}, b_j^{(i)})$ і висновки (c_i) функція (5.19) може апроксимувати задану функцію $g(x)$ з довільною точністю ε . Здатність нечіткої системи, що характеризується поряд нелінійних функцій від однієї змінної, до апроксимації нелінійної функції від багатьох змінних свідчить про можливість практичного застосування нечітких систем.

Б.3 Концепція та математичний апарат систем Такагі–Сугено–Канга

Найбільшу популярність серед нечітких систем адаптивного типу придбала модель виведення Такагі-Сугено-Канга (TSK) [27]. У цій моделі функція висновку визначається нечітким, але точковим чином. Завдяки цьому дефузифікатор на виході системи не потрібний, а модель висновку значно спрощується. Загальна форма моделі TSK може бути представлена у вигляді

$$\text{якщо } x_1 \text{ це } A_1 \text{ і } x_2 \text{ це } A_2 \text{ і } \dots \text{ і } x_N \text{ це } A_N, \text{ то } y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (\text{Б.14})$$

У векторному записі її можна записати ще простіше:

$$\text{якщо } \mathbf{x} \text{ це } \mathbf{A}, \text{ то } y = f(\mathbf{x}) \quad (\text{Б.15})$$

де $f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ – чітка функція. У цій залежності частина, що відноситься до умови, така сама, як і в моделі Мамдані-Заде. Принципова відмінність стосується висновку, який представляється у формі функціональної залежності, найчастіше – у вигляді поліноміальної функції декілька змінних. Класичне представлення цієї функції, найчастіше використовуване на практиці, – це поліном першого порядку

$$y = f(\mathbf{x}) = p_0 + \sum_{i=1}^N p_i x_i, \quad (\text{Б.16})$$

у якому коефіцієнти $p_0, p_1, \dots, p_N$ – це цифрові ваги, що підбираються в процесі адаптації (навчання). Ще простіша модель виведення TSK виходить, якщо застосовувати функцію $f(\mathbf{x})$ у вигляді полінома першого порядку, в якому

$$y = f(x) = p_0 . \quad (\text{Б.17})$$

В цьому випадку значення p_0 можна ототожнити з центром висновку c_i моделі Мамдані-Заде, присутнім у формулі (Б.13).

Якщо в моделі виведення TSK використовується декілька (M) правил, то вихід системи визначається як їх середньозважене. Приписуючи кожному правилу вагу w_i , отримаємо вихідний сигнал, представлений у вигляді

$$y = \frac{\sum_{i=1}^M w_i y_i}{\sum_{j=1}^M w_j} , \quad (\text{Б.18})$$

або

$$y = \sum_{i=1}^M \frac{w_i}{\sum_{j=1}^M w_j} y_i = \sum_{i=1}^M w'_i y_i . \quad (\text{Б.19})$$

Необхідно відзначити, що у виразі (Б.19) ваги w_i відповідають умові нормалізації: $\sum_{i=1}^M \frac{w_i}{\sum_{j=1}^M w_j} y_i = 1$. Якщо для кожного i -го правила (де $i = 1, 2, \dots, M$) реалізується функція TSK першого порядку

$$y_i = p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij} x_j , \quad (\text{Б.20})$$

то можна отримати опис вихідної функції моделі TSK у формі

$$y = \sum_{i=1}^M \frac{w_i}{\sum_{j=1}^M w_j} y_i \left(p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij} x_j \right) , \quad (\text{Б.21})$$

яка лінійна щодо всіх вхідних змінних системи x_j для $j = 1, 2, \dots, N$.

Ваги w_i присутні у формулі (Б.21), є нелінійними параметрами функції y . У адаптивних системах вони піддаються навчанню для досягнення якнайкращої пристосованості моделі до заданих значень, тоді як в неадаптивних системах вони уточнюються для визначення рівня активації умови в правилі висновку безпосередньо в процесі аналізу даних. Підбір цих рівнів – це результат агрегації правил, відповідних конкретним компонентам вектора x умови; він виконується з використанням логічного або алгебраїчного добутку так само, як це мало місце в моделі Мамдані-Заде.

Приклад рис. Б.8 ілюструє модель TSK. з двома правилами висновку для системи з двома вхідними змінними x_1 і x_2 .

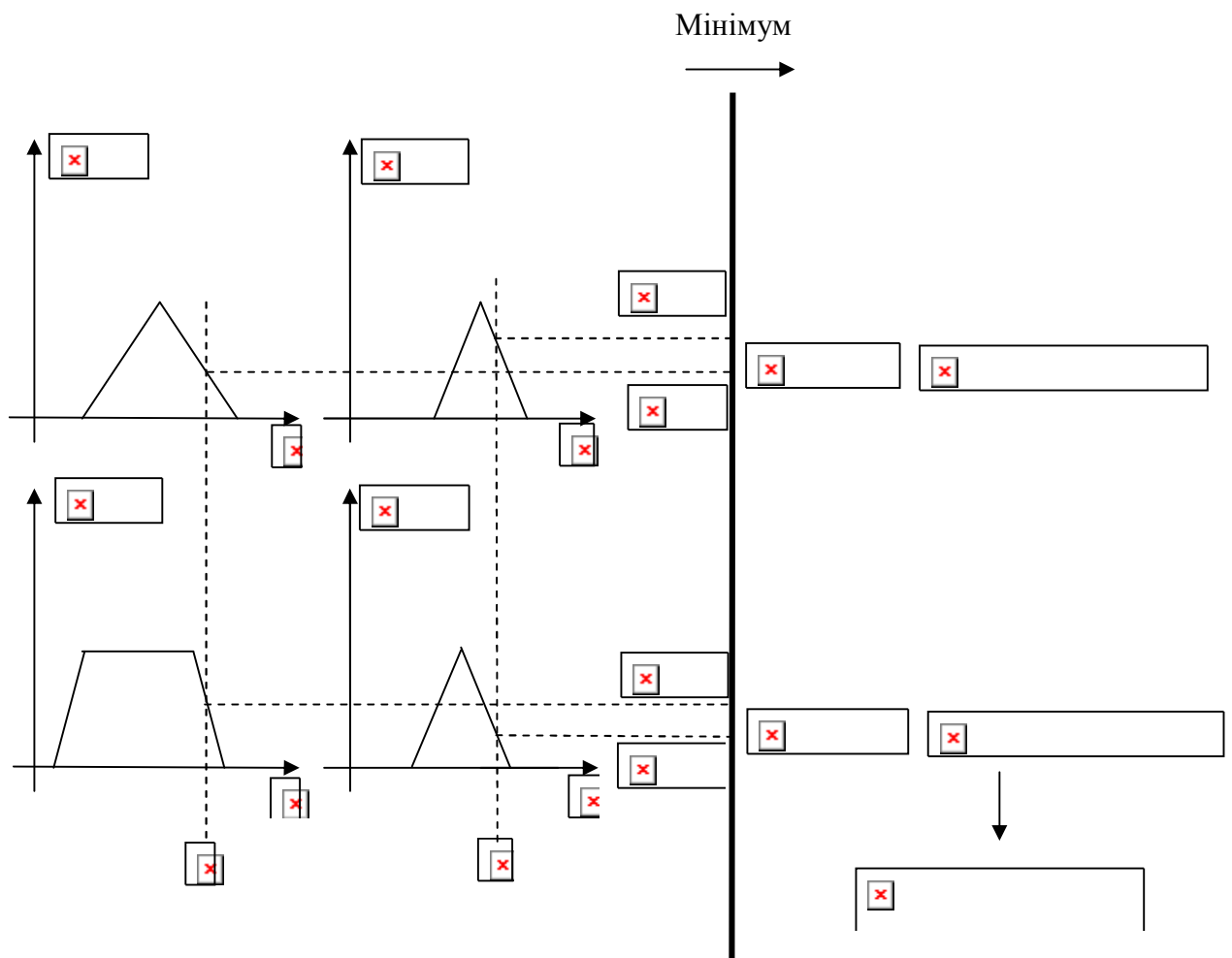


Рисунок Б.8 – Ілюстрація системи виведення TSK

ДОДАТОК В

ФАЙЛ ПОЧАТКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ

```
clear;clc;echo on;

% Система управління електроприводом
% механізму підйому шахтної підйимальної установки
% Система Г-Д, трьохмасова
% 2025 рік

% Вихідні дані
kg=2.85;
Tg=2.9;
ktp=22;
Tm=5e-3;
Tms=0.02;
Re=0.0269;
Te=0.056;
CF=161;
In=3180;
Mn=In*CF;
kdn=0.04;
kdc=3.02e-3;
kdv=6.43;
Jd=243638;
Jk=21028;
Jm=66750;
Js=Jd+Jm+Jk;
w0=3;
c=(w0^2)*((Jd+Jk/2)*(Jm+Jk/2))/(Jd+Jm+Jk);
c1=c^2;
c2=c1;
b1=0.005*c1;
b2=0.005*c2;

% Матриці
kin=1/(2*Tm*ktp*kg*kdn);
kpn=Tg*kin;
kic=kdn*Re/(4*Tm*kdc);
kpc=Te*kic;
kiv=kdc*Js/(128*Tm^2*CF*kdv);
kpv=16*Tm*kiv;

A=[-b2/Jm 1/Jm b2/Jm zeros(1,8);
-c2 0 c2 zeros(1,8);
b2/Jk -1/Jk (-b1-b2)/Jk 1/Jk b1/Jk zeros(1,6);
0 0 -c1 0 c1 zeros(1,6);
0 0 b1/Jd -1/Jd -b1/Jd CF/Jd zeros(1,5);
0 0 0 0 -CF/(Re*Te) -1/Te 1/(Re*Te) 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 -1/Tg kg/Tg 0 0 0;
0 0 0 0 (-kdv*kpv*kpn*kpc*ktp)/Tm -(kdc*kpc*kpn*ktp)/Tm -
(kdn*kpn*ktp)/Tm -1/Tm ktp/Tm (kpn*ktp)/Tm (kpc*kpn*ktp)/Tm;
```

```

0 0 0 0 -kdv*kpv*kpc*kin -kdc*kpc*kin -kdn*kin 0 0 kin kpc*kin;
0 0 0 0 -kdv*kpv*kic -kdc*kic zeros(1,4) kic;
0 0 0 0 -kdv*kiv zeros(1,6)]
B=[0 -1/Jm;
zeros(6,2);
(kpv*kpc*ktp*kpn)/Tm 0;
kpv*kpc*kin 0;
kpv*kic 0;
kiv 0];
C=zeros(4,11);
C(1,1)=1;C(2,2)=1;C(3,3)=1;C(4,4)=1;
C(5,5)=1;C(6,6)=1;
D=zeros(6,2)

```