

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

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОСНОВНИМИ МЕХАНІЗМАМИ
РОТОРНОГО ЕКСКАВАТОРА З ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРОМ.
ТЕМА КОМПЛЕКСНА. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.
СИНТЕЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
МЕХАНІЗМОМ ОБЕРТАННЯ КОЛЕСА РОТОРНОГО ЕКСКАВАТОРА
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 курсу, групи ДЕА-А23мг
спеціальності: 174 Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка

(код і найменування спеціальності)

_____ / Елвін Тахсін огли МАМЕДОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

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

Рецензент _____ / Олег ЛИТВИН
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024

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
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)

« » 2024р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістрського рівня вищої освіти

студенту (ці) Елвін Тахсін огли МАМЕДОВ
(ім'я, прізвище)

1. Тема роботи Системи управління основними механізмами роторного екскаватора з фаззи-регулятором. Тема комплексна. Спеціальна частина. Синтез і дослідження нечіткої системи управління механізмом обертання колеса роторного екскаватора
затверджена наказом по університету № 4801-5/3704 від "21" листопада 2024 р.
2. Термін здачі закінченої роботи "5" грудня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи Теоретична продуктивність по рихлій масі $Q=2400 \text{ м}^3 \cdot \text{год}$; діаметр роторного колеса $D_p=8 \text{ м}$; бічне зусилля різання $F_b=1,2 \cdot 10^4 \text{ Н}$; питоме зусилля копання $k_f=3,7 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2$; радіус різання $R_0=24,1 \text{ м}$; кутова швидкість повороту платформи $\omega_{пл}=2,4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; маса поворотної платформи $m_{пл}=700 \cdot 10^3 \text{ кг}$; маса приймальної частини $m_{пч}=127 \cdot 10^3 \text{ кг}$; маса відвальної частини $m_{пч}=124 \cdot 10^3 \text{ кг}$; частота обертання ротора $\omega_p=6 \text{ рад/хв}$; момент інерції поворотної платформи $J_{пл}=20 \cdot 10^7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; діаметр роликів $D_{кр}=11 \text{ м}$; діаметр опорних роликів $d_{тк}=0,88 \text{ м}$. Перерегулювання не більше 15%, час регулювання до 10с.
4. Зміст роботи (перелік питань, що їх належить розробити). Обґрунтувати перспективність застосування нечітких апроксимуючих систем для управління багатомасовою електро-механічною системою механізму обертання колеса роторного екскаватора. Розрахувати систему автоматичного регулювання координат електроприводу. Дослідити статичних і динамічних характеристик системи. Розробити математичну модель двомасової системи. Виконати моделювання на ЕОМ та провести аналіз показників якості перехідних процесів змінних стану двомасової системи. Розробити структурну схему нечіткої системи управління. Виконати синтез Fuzzy регулятора на ЕОМ з застосуванням пакету Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB. Провести аналіз результатів моделювання системи з Fuzzy.
5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал) 1. Магістерська кваліфікаційна робота. Формальні ознаки. 2. Механізм обертання колеса. Схема кінематична. 3. Нечіткі множини. Функції приналежності. 4. Нечіткі системи. Алгоритми нечіткого висновку. 5. Нечіткі системи. Алгоритми нечіткого висновку (продовження). 6. Нечіткі системи. Методи приведення до чіткості. 7. Система управління. Перехідні процеси. 8. Двомасова система. Математична модель. 9. Двомасова система. Перехідні процеси 10. Система з фаззи-регулятором. Структурна схема. 11. Система з фаззи-регулятором. Вікна завдання параметрів. 12. Система з фаззи-регулятором. Перехідні процеси. 13-14. Магістерська кваліфікаційна робота. Висновки.

6. Консультант:

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

7. Дата видачі завдання “ 9 ” вересня 2024 р.

Керівник

(підпис)

Тетяна ВАСИЛЕЦЬ.
(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Елвін Тахсін огли МАМЕДОВ
(підпис) (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	Обґрунтування застосування нечітких апроксимуючих систем для управління багатомасовою електромеханічною системою механізму обертання колеса роторного екскаватора.	09.09.2024- 18.09.2024	
2	Розрахунок системи автоматичного регулювання координат електроприводу. Дослідження статичних і динамічних характеристик системи.	19.09.2024- 15.10.2024	
3	Дослідження системи з урахуванням пружних елементів. Розробка математичної моделі двомасової системи та моделювання двомасової системи на ЕОМ.	16.10.2024- 05.11.2024	
4	Розробка нечіткої системи управління на ЕОМ з застосуванням пакету Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB. Моделювання нечіткої системи.	06.11.2024- 25.11.2024	
5	Оформлення роботи	26.11.2024- 05.12.2024	

Студент (ка)

(підпис)

Елвін Тахсін огли МАМЕДОВ
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з: 138 сторінок, 42 рисунки, 3 таблиці, 53 використаних джерел, 4 додатки.

Мета роботи – розробка методів синтезу системи управління електроприводом механізму обертання колеса роторного екскаватора для підвищення показників якості функціонування системи на основі Fuzzy регуляторів.

Розрахунковим шляхом з застосуванням фундаментальних положень теорії автоматичного управління визначаються параметри системи управління. Методи математичного моделювання використані для побудови математичних моделей роботи багатомасової системи з використання методів теорії нечітких множин і нечіткої логіки виконується синтез Fuzzy регулятора для управління двомасовою електромеханічною системою. Методом комп'ютерного моделювання із застосуванням пакету прикладних програм MATLAB досліджуються динамічні характеристики нечіткої системи.

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи науково обґрунтовано перспективність застосування нейромережевих технологій для управління багатомасовою електромеханічною системою механізму обертання колеса роторного екскаватора. Розроблена система управління координат електроприводу механізму. Розраховані параметри системи автоматичного управління. Проведено моделювання системи на ЕОМ.

Розроблена математична модель системи з урахуванням пружних елементів механічної частини електроприводу. Розраховані динамічні характеристики двомасової системи. Розглянута структура нечіткої системи управління і виконаний синтез Fuzzy регулятора в системі MATLAB.

Проведено моделювання нечіткої системи управління з Fuzzy регулятором на ЕОМ. Встановлено, що синтезована нечітка система має високі показники якості функціонування.

Основні положення магістерської роботи використовуються у навчальному процесі кафедри АМЕТ ННІ «УІПА» ХНУ ім. В.Н. Каразіна при читанні лекцій, проведенні практичних занять.

Основні положення та наукові результати апробовані на науково-практичній конференції студентів УІПА (Харків, 2024 р.).

Ключові слова: НЕЧІТКІ МНОЖИНИ, НЕЧІТКІ ВИСНОВКИ, РОТОРНИЙ ЕКСКАВАТОР, ЕЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНІЗМУ ОБЕРТАННЯ КОЛЕСА, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ, ОДНОМАСОВА І ДВОМАСОВА СИСТЕМИ, НЕЧІТКІ СИСТЕМИ, FUZZY РЕГУЛЯТОР

ABSTRACT

An explanatory message consists of: 138 pages, 42 figures, 3 tables, 53 used sources, 4 additions.

The purpose of work is the development of methods of synthesis of electric drive control system of the mechanism of rotation of the wheel of a rotary excavator to improve the quality indicators of the system functioning on the basis of Fuzzy regulator.

A calculation way with the use of fundamental positions of theory of automatic control is determine the parameters of the control system. Mathematical modeling techniques used to build mathematical models multimass system. With the use of methods of theory of unclear plurals and fuzzy logic a synthesis of Fuzzy regulator is executed for the control of two-mass electromechanics system. The method of computer simulation using MATLAB application package investigates the dynamic characteristics of fuzzy systems.

As a result of the master's qualification work scientifically grounded perspective the use of neural network technology to control multimass electromechanical system of the mechanism of rotation of the wheel of a rotary excavator. The control system of coordinates of mechanism electric drive is worked out. The parameters of automatic control system are calculated. The simulation of the system is executed on a computer.

Worked out the mathematical model of the system which takes into account the elastic elements of the mechanical part of the electric drive is developed. Dynamic descriptions of the two-mass system are calculated. The structure of the unclear control system is considered and the synthesis of Fuzzy regulator is executed in the system of MATLAB. The simulation of the Fuzzy control system with a fuzzy regulator is conducted on a computer. It is set that synthesized the unclear system has high indexes of quality of functioning.

The main provisions of the master's thesis are used in the educational process of the Department of AMET of the Scientific and Technological Research Institute "UIPA" of the V.N. Karazin KhNU when giving lectures, conducting practical classes.

Substantive provisions and scientific results are approved at scientifically-practical conference of students of UEPA (Kharkov, 2024 y.).

Keywords: FUZZY SETS, FUZZY CONCLUSIONS, ROTARY EXCAVATOR, ELECTRIC DRIVE OF THE MECHANISM OF ROTATION OF THE WHEEL, AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, THE SAME ONE-MASS AND TWO-MASS SYSTEMS, FUZZY SYSTEMS, FUZZY REGULATOR

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;

C – ємність;

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	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	13
1.1 Нечітка логіка в системах управління	13
1.2 Фактори, що обумовлюють ефективність використання систем нечіткого висновку в задачах управління	15
1.3 Області застосування сучасних технологій управління	17
1.4 Структура систем нечіткого управління	19
1.5 Загальні відомості про роторні екскаватори	21
1.6 Обґрунтування вибору системи електроприводу роторного колеса екскаватора	25
1.7 Постановка задачі дослідження і шляхи її вирішення	27
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	30
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ МЕХАНІЗМОМ ОБЕРТАННЯ КОЛЕСА РОТОРНОГО ЕКСКАВАТОРА ...	33
2.1 Технічні характеристики роторного екскаватора. Вимоги до системи управління.....	32
2.2 Розрахунок потужності і вибір електродвигунів механізму обертання колеса роторного екскаватора.....	34
2.3 Вибір основного електроустаткування електроприводу	36
2.4 Розрахунок і побудова статичних характеристик розімкненої і замкненої систем	37
2.5 Дослідження динамічних характеристик системи	47
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	61
РОЗДІЛ 3 ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	62
3.1 Математична модель двомасової системи	63
3.2 Розрахунок перехідних процесів двомасової системи	66

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	73
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ З FUZZY РЕГУЛЯТОРОМ.....	74
4.1 Процес нечіткого моделювання в середовищі MATLAB	74
4.2 Побудова і дослідження багатомасової системи з Fuzzy регулятором.....	75
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	95
ВИСНОВКИ.....	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99
ДОДАТОК А. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН.....	105
А.1 Визначення і способи завдання нечіткої множини	105
А.2 Функції приналежності нечіткої логіки.....	108
А.3 Міри нечіткості нечітких множин	118
ДОДАТОК Б. ОПЕРАЦІЇ НАД НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ.....	111
Б.1 Логічні операції.....	111
Б.2 Алгебраїчні операції з нечіткими множинами	115
Б.3 Модель виведення Такаґи-Сугено-Канґа.....	135
ДОДАТОК В. НЕЧІТКІ ВІДНОШЕННЯ.....	118
В.1 Способи завдання нечітких відношень	118
В.2 Операції над нечіткими відношеннями.....	119
ДОДАТОК Г. СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ	122
Г.1 Порядок формування нечітких висновків.....	122
Г.2 Алгоритм Mamdani	127
Г.3 Алгоритм Tsukamoto	128
Г.4 Алгоритм Sugeno	130
Г.5 Алгоритм Larsen.....	131
Г.6. Спрощений алгоритм нечіткого висновку	132
Г.6. Спрощений алгоритм нечіткого висновку	134
ДОДАТОК Д. ФАЙЛ ВИХІДНИХ ДАНИХ.....	136

ВСТУП

Актуальність теми. Вдосконалення систем автоматизованого управління промисловими установками засноване на новітніх наукових та технічних досягненнях і є критично важливим для підвищення продуктивності виробництва, зростання ефективності праці та покращення якості виготовляної продукції. Еволюція автоматизованих систем управління включає в себе розширення практичного застосування адаптивного управління, вдосконалення векторного управління електроприводами із змінним струмом, широке використання управляючих обчислювальних систем на різних рівнях складності, розвиток прямого цифрового управління та інших технологічних напрямів.

Одним з найбільш перспективних напрямків є розробка систем управління з застосуванням методів нечіткого управління. Методи створення систем управління, які базуються на теорії нечітких множин, значно розширюють традиційні підходи до автоматизованих систем управління [1-10]. Основні концепції теорії нечітких множин були вперше висловлені американським математиком Лотфі Заді [11]. Ця теорія дозволяє описувати якісні, приблизні концепції та наші уявлення про оточуючий світ, а також оперувати цими уявленнями з метою отримання нової інформації.

Застосування нечітких систем є одним з найбільш перспективних напрямів прикладних досліджень в області управління і ухвалення рішень. Нечіткі системи являються особливо корисним, коли в описі технічних об'єктів присутня невизначеність, яка утрудняє або навіть виключає застосування точних кількісних методів і підходів.

В галузі управління технічними системами використання нечітких систем дозволяє отримувати більш адекватні результати, ніж застосування традиційних аналітичних моделей та алгоритмів управління. Застосування нечітких методів постійно розширюється, охоплюючи різні галузі, такі як проектування промислових роботів, побутових електроприладів, управління доменними печами, рух потягів метро, а також автоматичне розпізнавання мови і зображень.

Нечітка логіка, яка лежить в основі методів нечіткого управління, набагато більш природно відображає спосіб мислення людини та хід її міркувань, у порівнянні з традиційними формально-логічними системами. Це пояснює, чому вивчення та використання математичних інструментів для представлення нечіткої початкової інформації дозволяє створювати моделі, які найбільш точно відображають різні аспекти невизначеності, що постійно присутні у нашому оточенні. При цьому системи нечіткого управління дозволяють покращити якість продукції, зменшуючи витрати ресурсів і енергії, а також забезпечують більшу стійкість до зовнішніх впливів у порівнянні з традиційними системами автоматичного управління.

Математична теорія нечітких множин служить засобом опису нечітких понять і знань, дозволяє оперувати цими знаннями та робити нечіткі висновки. Використання нечіткого управління стає особливо корисним у тих випадках, коли технологічні процеси стають надзвичайно складними для аналізу за допомогою загальноприйнятих кількісних методів або коли джерела інформації доступні у формі якісної, неточної чи невизначеної.

Основа на нечіткій логіці, нечітке управління більш відповідає людському мисленню та природним мовам, ніж традиційні логічні системи. Вона надає ефективні засоби відображення невизначеностей і неточностей реального світу. Наявність математичних засобів для відображення нечіткої початкової інформації дозволяє побудувати модель, яка більш адекватно відображає реальність.

Застосування нечітких методів для синтезу системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму обертання колеса роторного екскаватора, що має високі показники якості функціонування з застосуванням теорії нечітких множин і нечіткої логіки є важливою науково-технічною задачею, а тема роботи є актуальною.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка методів синтезу системи управління електроприводом механізму обертання колеса роторного екскаватора для підвищення показників якості функціонування системи на ос-

нові Fuzzy регуляторів. Досягнення поставленої мети здійснюється рішенням наступних основних задач.

Досягнення поставленої мети здійснюється рішенням наступних основних задач.

1. Аналіз факторів, що обумовлюють ефективність використання систем нечіткого висновку в задачах управління технічними системами.

2. Розробка системи підлеглого регулювання координат електроприводу механізму обертання колеса роторного екскаватора.

3. Побудова математичної моделі двомасової електромеханічної системи.

4. Синтез Fuzzy регулятора, який забезпечує задані показники якості функціонування двомасової електромеханічної системи.

5. Моделювання розробленої нечіткої системи на ЕОМ і аналіз отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – динамічні процеси в системі управління механізмом обертання колеса роторного екскаватора з урахуванням пружних елементів.

Предмет дослідження – моделі і методи синтезу нечітких систем управління механізмом обертання колеса роторного екскаватора з урахуванням податливості механічних зв'язків.

Методи досліджень. Всі теоретичні положення роботи базуються на фундаментальних положеннях теорії автоматичного управління. Методи математичного моделювання використані для побудови математичних моделей роботи системи. Методи теорії нечітких множин і нечіткої логіки дозволили синтезувати Fuzzy регулятор для управління двомасовою електромеханічною системою. Імітаційне моделювання дозволило проаналізувати якість функціонування нечіткої системи і підтвердило ефективність отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна результатів, одержаних в процесі виконання дисертаційної роботи, полягає в наступному.

1. Вперше отримано наукове обґрунтування доцільності використання нечіткого управління багатомасовою електромеханічною системою механізму обертання колеса роторного екскаватора.

2. Вперше запропонована і синтезована нечітка система управління двомасовою електромеханічною системою механізму обертання колеса роторного екскаватора, що задовольняє вимогам, які пред'являються до систем управління механізмами роторних екскаваторів.

3. Здійснений подальший розвиток математичних моделей об'єктів управління систем з складними кінематичними зв'язками у вигляді двомасових електромеханічних систем.

4. Одержали подальший розвиток методи синтезу нечітких регуляторів для системи управління з математичними моделями у вигляді двомасових електромеханічних систем.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці нечіткої системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму обертання колеса роторного екскаватора, що має високі показники якості функціонування.

Основні положення магістерської роботи використовуються у навчальному процесі кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій при читанні лекцій, виконанні курсових проектів, проведенні практичних та лабораторних занять.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати роботи, які винесені на захист, одержані магістром особисто. Серед них: синтезована система підлеглого регулювання координат електроприводу; розроблена модель системи з урахуванням пружних елементів, розроблена структурна схема нечіткої системи з фаззи-регулятором; синтезований Fuzzy регулятор з використанням пакету Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB; виконано моделювання нечіткої систем і проведено аналіз отриманих результатів.

В роботі наведені посилання на авторів і відповідні джерела при використанні відомих залежностей, експериментальних даних і наукових положень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та наукові результати були апробовані на науково-практичній конференції студентів УПА (Харків, 2024 р.).

Структура і об'єм роботи. Робота складається з вступу, 4 розділів основної частини, висновків, додатків і списку використаних літературних джерел. Повний об'єм роботи складає 138 сторінки, серед них: 21 рисунок за текстом, 21 рисуноків на 19 окремих сторінках, 3 таблиці, 4 додатки на 37 сторінках, список літературних джерел з 53 найменувань на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Нечітка логіка в системах управління

В даний час починають знаходити широке застосування так звані нечіткі системи управління (fuzzy-системи), що базуються на нечіткій логіці, розробленої професором Лотфі Заде ще в 1965 році [11]. Особливо ефективно застосування нечітких систем управління там, де об'єкт управління досить складний для його точного опису й існує дефіцит апіорної інформації про поведінку системи. Принцип дії нечітких систем управління ґрунтується на виконанні нечіткого логічного виводу. Нечіткі системи мають базу знань і зачатки штучного інтелекту.

Починаючи з 1965 р. нечітка логіка пройшла шлях від майже антинаукової теорії, практично відкинутої в Європі і США, до стрімкого розвитку в кінці минулого століття. Найбільш значущими з робіт в цій області слід зазначити публікації Л. Заде [12, 13], Д. Дюбуа (D. Dubois) і А. Прада (H. Prade) [14-16], по теорії нечіткої міри і міри можливості, М.Сугено (M. Sugeno) [17-19] по нечіткому висновку і нечіткому інтегралу, Дж. Беждека (J. Bezdek) [20, 21] по нечіткій кластеризації і розпізнаванню образів, Р. Ягера (R. R. Yager) [22] по нечіткій логіці.

Проте, не дивлячись на велику кількість теоретичних робіт, прикладне значення нечітких моделей довгий час ставилося під сумнів. Перші реалізації нечітких моделей в промисловості відносяться до середини 1970-х рр. Саме у цей період у Великобританії Ебрахим Мамдані (Ebrahim Mamdani) [23-26] використав нечітку логіку для управління парогенератором. Рішення цієї задачі звичайними методами було зв'язане з цілим рядом труднощів обчислювального характеру. Запропонований Е. Мамдані алгоритм, заснований на нечіткому логічному висновку, дозволив уникнути надмірно великого об'єму обчислень і

був по достоїнству оцінений фахівцями. У цей же період нечіткі моделі використовувалися для управління печами для випалювання цементу. Однак ці рідкісні застосування, які користувалися нечіткою логікою, по суті приховували цей факт, оскільки саме вони використовували терміни "багатозначна логіка" або "безперервна логіка" замість терміну "нечітка логіка".

На початку 1980-х рр. нечітка логіка і теорія нечітких множин отримали свій подальший розвиток в цілому ряду програмних засобів підтримки ухвалення рішень і в експертних системах аналізу даних [27-31]. Хоча багато з цих програмних засобів лишилися в межах наукових лабораторій і інститутів, їх робота принесла важливі емпіричні результати в моделюванні процесів людського мислення та ухвалення рішень за допомогою нечіткої логіки.

Після перших промислових впроваджень в Європі Японія за короткий час здобула лідерство у світі за кількістю пристроїв і механізмів, у яких застосовуються нечіткі технології. Поява мікропроцесорів і мікроконтролерів призвела до різкого зростання кількості побутових приладів і промислових установок, що використовують алгоритми управління на основі нечіткої логіки. Термін "фаззі" (fuzzy) став символом популярності та комерційного успіху нових промислових продуктів у цій країні.

У Японії з'явився широкий асортимент продукції з використанням нечітких технологій, включаючи бритви, пілососи та фотокамери [32-39]. Термін «fuzzy» став настільки поширеним, що в багатьох мовах його навіть не перекладають. Такий значний прогрес у розвитку нечітких систем управління не є випадковим. Їхня простота та економічність розробки змушують проєктувальників усе частіше обирати цю технологію. Після швидкого старту впровадження нечітких систем в Японії [32, 33, 35, 36] багато розробників з США та Європи почали використовувати цю технологію. Проте Японія залишалася світовим лідером у цій сфері [36, 37], де до кінця 1980-х років налагодили виробництво спеціалізованих нечітких контролерів, виготовлених за технологією HBIC [37-39]. Корпорація Intel, маючи в своєму арсеналі численні контролери від MCS-51 до MCS-96, які протягом років успішно використовувалися в різних застосу-

ваннях, вирішила створити платформу для розробки додатків на основі цих контролерів із використанням нечіткої логіки. Це дозволило уникнути значних витрат на розробку власних нечітких контролерів, а система Intel під назвою fuzzy TESH здобула величезну популярність не тільки в США та Європі, але й у всьому світі.

У додатках А-Г наведені основні поняття нечіткої логіки, операції над нечіткими множинами і відносинами, системи нечіткого висновку, які являються базою для розуміння виконаних в роботі досліджень.

1.2 Фактори, що обумовлюють ефективність використання систем нечіткого висновку в задачах управління

Можливість використання апарату нечіткої логіки базується на наступних результатах.

1. У 1992 р. Wang показав [40]: що нечітка система, що використовує набір правил

P_i : якщо $x_i \in A_i$ і $y_i \in B_i$, тоді $z_i \in C_i$, $i=1, 2, \dots, n$, при

1) гаусівських функціях приналежності

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

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

2) композиції у вигляді добутку

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

3) імплікації у формі (Larsen)

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

4) центроїдному методі приведення до чіткості

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

де α_i – центри C_i ; ϵ універсальним апроксиматором, тобто здатний апроксимувати будь-яку безперервну функцію на компакт U з заданою точністю (природно, при $n \rightarrow \infty$). Інакше кажучи, Wang довів теорему: для кожної речової безперервної функції, визначеної на компакт U , і для довільного $\epsilon > 0$ існує нечітка експертна система, яка формує вихідну функцію $= f(x)$, що задовольняє умові:

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

де $\|\bullet\|$ — символ прийнятої відстані між функціями.

2. У 1995 р. Castro показав[41], що логічний контролер Mamdani при:

1) симетричних трикутних функціях приналежності:

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

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

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

2) композиції з використанням операції min:

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

3) імплікації у формі Mamdani і центроїдного методу приведення до чіткості:

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

де c_i – центри C_i ; також є універсальним апроксиматором.

Системи з нечіткою логікою доцільно застосовувати для складних процесів, коли немає простій математичній моделі; якщо експертні знання про об'єкт або про процес можна сформулювати тільки в лінгвістичній формі.

Дані системи застосовувати недоцільно, коли необхідний результат може бути отриманий яким-небудь іншим шляхом, або коли для об'єкту або процесу вже знайдена адекватна і легко досліджувана математична модель.

Відзначимо, що *основні недоліки* систем з нечіткою логікою пов'язані з тим, що:

- початковий набір постулюємих нечітких правил формулюється експертом-людиною і може виявитися неповним або суперечливим;
- вигляд і параметри функцій приналежності, що описують вхідні і вихідні змінні системи, вибираються суб'єктивно і можуть виявитися такими, що не цілком відображають реальну дійсність.

1.3 Области застосування нечіткої логіки

На початковому етапі розвитку теорії нечіткої логіки в наукових журналах переважали статті, присвячені її потенційним сферам застосування. З часом, із прогресом у цій галузі, кількість практичних реалізацій систем на основі нечіткої логіки стрімко зростає. Сьогодні нечіткі технології набувають дедалі більшої популярності серед фахівців різних галузей.

Популярність систем з нечіткою логікою пояснюється такими перевагами:

- концептуальна простота та легкість для розуміння;
- гнучкість і стійкість до неточних вхідних даних;
- здатність моделювати нелінійні функції будь-якої складності;
- врахування досвіду та знань експертів;
- орієнтованість на природну мову людського спілкування.

Системи, що базуються на нечіткій логіці, успішно розробляються та впроваджуються в різних сферах, зокрема:

- управління технологічними процесами;
- транспортні системи;
- побутова техніка;
- медична та технічна діагностика;
- фінансовий менеджмент і аналіз;
- біржове прогнозування;
- розпізнавання образів;
- дослідження ризикових і критичних операцій;
- прогнозування землетрусів;
- складання автобусних розкладів;
- кліматичний контроль у будівлях.

Багато сучасних завдань управління не можуть бути вирішені за допомогою класичних методів через надзвичайну складність математичних моделей, які їх описують.

Основні особливості fuzzy-систем у порівнянні з іншими методами включають:

- можливість роботи з вхідними даними, що мають нечітке визначення, наприклад, з показниками, які змінюються в часі (динамічні задачі) або з даними, які не можна точно задати;
- здатність нечітко формалізувати критерії оцінки та порівняння, використовуючи такі поняття, як "більшість", "можливо", "переважно" тощо;

- можливість проведення якісної оцінки як вхідних даних, так і результатів, включаючи роботу не тільки з числовими значеннями, але й з їх ступенем достовірності та розподілом;
- можливість швидкого моделювання складних динамічних систем і їх порівняльного аналізу з певною точністю. Використовуючи принципи поведінки систем, описані fuzzy-методами, можна уникнути витрат часу на з'ясування точних значень змінних і складання рівнянь, а також оцінити різні варіанти результатів.

Застосування нечіткої логіки рекомендоване для вирішення складних процесів, де немає простих математичних моделей; для нелінійних процесів високого порядку; а також для обробки експертних знань, сформульованих мовою, що наближена до людської

1.4 Структура систем нечіткого управління

Однією з ключових областей практичного застосування нечітких систем є розв'язання завдань управління різними об'єктами або процесами. У цьому контексті побудова нечіткої моделі базується на формальному представленні характеристик досліджуваної системи через лінгвістичні змінні. Оскільки ключовими поняттями в системах управління є вхідні і вихідні параметри, саме їх розглядають як лінгвістичні змінні при створенні бази правил у нечітких системах.

Узагальненою метою управління є визначення значень управляючих параметрів на основі аналізу поточного стану об'єкту управління. Це дозволяє забезпечити бажану поведінку або стан системи. На сьогоднішній день для вирішення цих завдань застосовується загальна теорія управління, в рамках якої розроблено різноманітні алгоритми для знаходження оптимальних стратегій управління об'єктами різного типу.

Не затримуючись на деталях класичної теорії управління, розглянемо основні визначення, які допоможуть краще зрозуміти особливості та роль нечітких систем у вирішенні задач управління. Основна структура чи модель класичної теорії управління базується на представленні об'єкту та процесу управлін-

ня у вигляді деяких систем (рис.1.2). Об'єкт управління характеризується певним набором вхідних параметрів та набором вихідних параметрів. Системі управління надходять певні вхідні змінні, що формуються за допомогою кінцевого набору датчиків. За допомогою певного алгоритму управління система управління формує набір значень вихідних змінних, також відомих як управляючі змінні або змінні процесу управління. Ці значення вихідних змінних передаються на вхід об'єкту управління і, сполучаючись зі значеннями його вхідних параметрів, впливають на його поведінку у потрібному напрямі.

Розглянута архітектура є системою зворотного зв'язку для управління технічними об'єктами, контролери використовуються для цієї мети.



Рисунок 1.1 – Архітектура компонентів процесу управління із зворотним зв'язком

Класичним прикладом такого управління є PID-контролер (пропорційно-інтегрально-диференціальний контролер). Його алгоритм базується на порівнянні вихідних параметрів об'єкта з деякими заданими значеннями та визначенні різниці між ними, тобто помилки. Після цього визначаються вихідні змінні як сума цієї помилки, інтегралу та похідної цих значень протягом певного часового інтервалу.

Один з недоліків PID-контролерів полягає в тому, що вони базуються на припущенні про лінійний характер відношення між вхідними та вихідними параметрами управління, що обмежує їх адекватність у вирішенні конкретних за-

вдань. Інший недолік пов'язаний із складністю обчислень, що може спричинити неприпустимі затримки при управлінні об'єктами з високою динамікою змін вихідних параметрів.

Архітектура або модель нечіткого управління заснована на заміні класичної системи управління системою нечіткого управління, у якості якої використовуються системи нечіткого висновку. В цьому випадку модель нечіткого управління (рис. 1.2) будується з урахуванням необхідності реалізації всіх етапів нечіткого висновку, а сам процес висновку реалізується на основі одного з розглянутих вище алгоритмів нечіткого висновку.

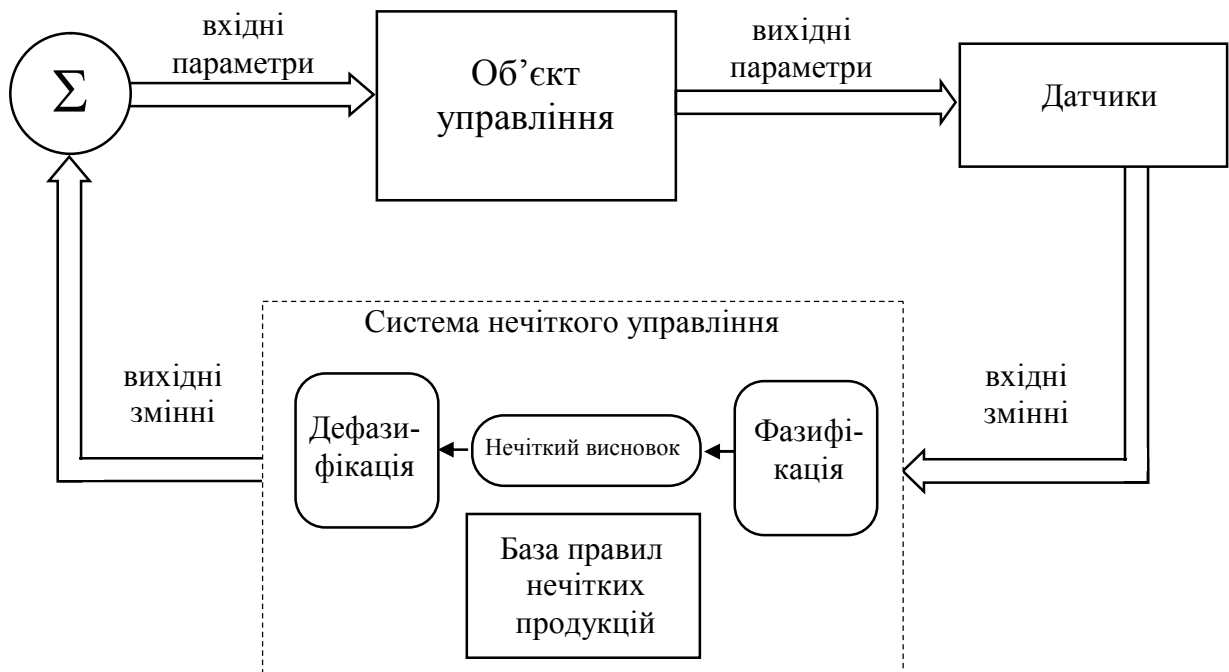


Рисунок 1.2 – Архітектура компонентів процесу нечіткого управління

1.5 Загальні відомості про роторні екскаватори

Головна складова гірничодобувних комплексів - це роторний екскаватор, що є складним утворенням, складається з більш ніж десяти взаємодіючих силових механізмів. Він має в собі як робоче, так і допоміжне обладнання, яке відповідає за транспортування розроблюваної породи до транспортних машин гір-

ничодобувного комплексу. На рис.1.3 наведено схему компоновання роторного екскаватора.

Конструкція екскаватора складається з поворотної і неповоротної частин, розділених опорно-поворотним пристроєм 1, яке забезпечує поворот верхньої частини машини щодо вертикальної осі. До складу поворотної частини входить платформа, на якій закріплена стріла ротора 4 з робочим роторним колесом 3 і встановленими по його периферії ковшами 2. При обертанні роторного колеса з урізуванням ріжучих крамок ковшів і поворотному русі стріли відбувається відділення природи, що поступає на розташований усередині фермової конструкції стріли конвейєр 16.

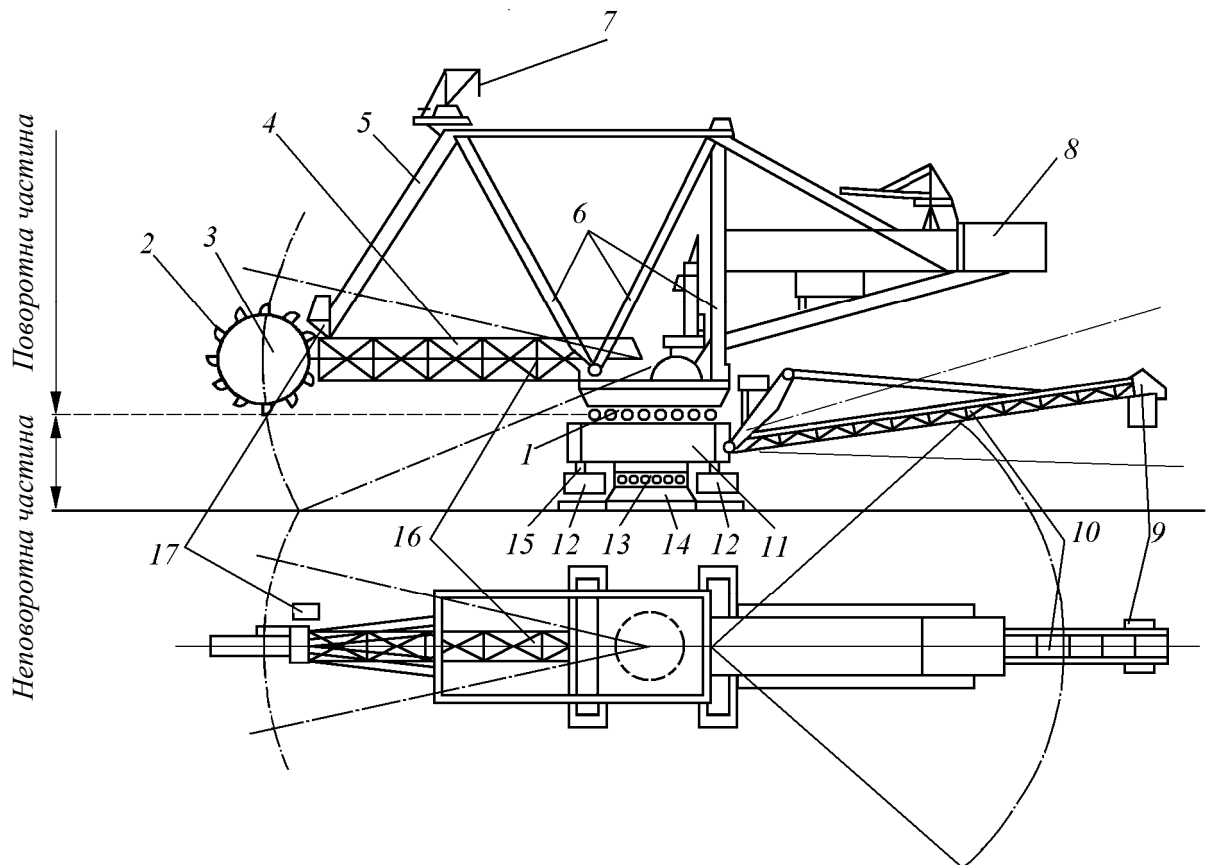


Рисунок 1.3 – Компоновальна схема роторного екскаватора

Потім порода подається в центральну частину екскаватора, де встановлений додрабливаючий пристрій, перетинає площину опорно-поворотного пристрою 1, поступає на конвейєр нижньої частини машини, потім на конвейєр, розташований усередині розвантажувальної консолі 10.

Для зміни положення роторного колеса у вертикальній площині стріла екскаватора може встановлюватися в робочому положенні в межах деякого сектора канатною підвіскою 5 і повертатися навколо осі, розташованої поворотної частини екскаватора. Верхнє положення стріли визначає найбільшу висоту оброблюваного уступу, нижнє- максимальну глибину копання нижче рівня стояння машини. Верхні блоки підвіски стріли закріплені на одному з порталів 6. За допомогою підкошувань, винесених убік, протилежну роторній стрілі, і встановлених на консольній частині будов 8, створюється противага, компенсуюча перекидаючий момент стріли.

Нижче за опорно-поворотний пристрій розташований могутній силовий пояс 11, сполучений внизу з опорною базою екскаватора 14. До нерухомої частини з обох боків кріпляться могутні гидродомкрати 15, здатні встановлювати конструкцію з опорной на ґрунт через базу або через шагающе-рейкове устаткування (лижі) Розвантажувальна консоль 10 разом з конвейєром може встановлюватися під різними кутами (в межах 80°) по відношенню до напрямку переміщень екскаватора, що забезпечує автономність її просторового положення в процесі розвантаження. Так само, як і стріла ротора, розвантажувальна консоль має можливість різної установки у вертикальній площині.

Управління робочими процесами екскаватора здійснюється з кабін управління, розташованих у роторного колеса 17, на кінці розвантажувальної консолі 10 і на нижній рамі.

Для розворотів екскаватора при зміні напрямку перестановки нерухома його частина разом з поворотною можуть повертатися щодо бази, для чого є ще один поворотний пристрій 13.

Зручність обслуговування елементів конструкції і устаткування екскаватора забезпечується установкою в трьох місцях – на поворотній платформі, верхній будові і похилому порталі – підйомних кранів вантажопідйомністю від 5 до 20 T .

Основними механізмами, що забезпечують робочий процес екскаватора, є наступні: механізм приводу ротора; механізм повороту стріли екскаватора; ме-

ханізм розвороту консолі; механізм розвороту екскаватора; механізм підйому; механізм ходу; механізм конвейєра стріли; механізм конвейєра розвантажувальної консолі.

Компоновка індивідуальних електроприводів роторного екскаватора показана на рис. 1.4. Безпосередньо у роторного колеса встановлюються електродвигуни і редуктори приводу обертання 1, а також електропривод барабанного живильника 2, що направляє потік породи, що відділяється від ковшів, на конвейєр стріли ротора. Електропривод конвейєра 3 розташовується в зоні осі гойдання стріли.

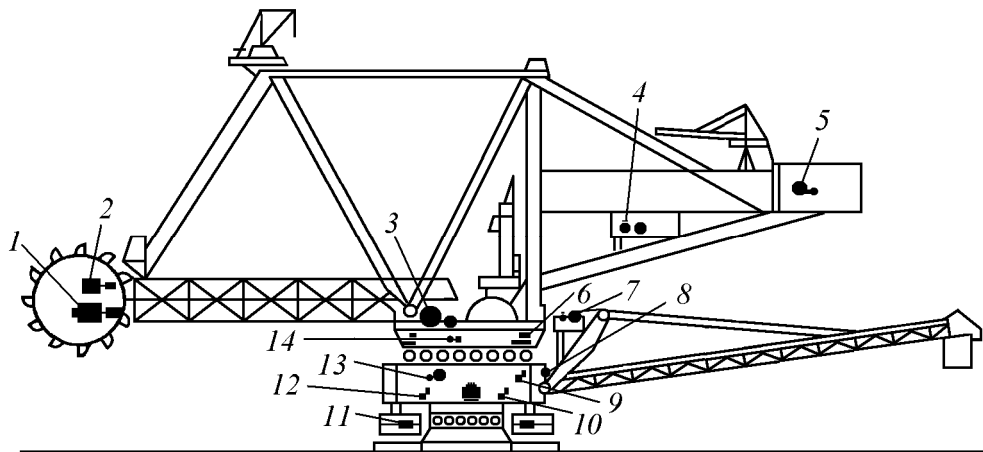


Рисунок 1.4 - Компоновка індивідуальних електроприводів роторного екскаватора

На поворотній частині опорно-поворотного механізму розташовані електродвигуни 6, що забезпечують взаємний поворот нижньої і верхньої частин машини. Привід підйому стріли ротора 5 встановлений в надбудові протитяги, в нижній частині якого розміщено вентиляційне устаткування 4.

У верхньому поясі в зоні установки воронки, що обертаються, або додроблюючого пристрою розташовується і їх приводи 14.

Переміщення розвантажувальної консолі у вертикальній площині забезпечується електродвигунами підйому 7, встановленими на спеціальному майданчику, нижче за горизонтальну площину коштує привід повороту консолі 9,

аналогічний приводу повороту верхньої будови, але меншій потужності, і привід конвейєра розвантажувальної консолі 8.

У неповоротній частині машини розташовуються електроприводи механізму розвороту екскаватора 12, конвейєра нижньої рами 13, а також електроустаткування введення електроенергії: струмоприймачі, вимикачі, трансформатори, розподільні пристрої високої і низької напруги 10.

Безпосередньо у металоконструкціях лиж рейковий-крокуючого ходу коштують електроприводи ходових лебідок 11.

1.6 Обґрунтування вибору системи електроприводу роторного колеса екскаватора

Роторне колесо виконує головний робочий рух, що забезпечує різання ґрунту, і його електропривод повинен працювати в тривалому режимі. У зв'язку відсутністю технологічної необхідності зміни напрямку обертання роторного колеса електропривод може бути нереверсивним.

Для забезпечення раціональних режимів різання різних по міцності ґрунтів і ефективного використання конструктивних можливостей екскаватора електропривод повинен забезпечувати зниження кутової швидкості роторного колеса на 30 – 60% по відношенню до номінальної. Отже, необхідний діапазон регулювання D , який визначається як відношення середніх значень максимальної швидкості до мінімальної [42]

$$D = \omega_{\text{ср max}} / \omega_{\text{ср min}}$$

лежать в межах $(1,4 - 1,7) : 1$.

Для усунення можливих резонансних коливань металоконструкцій, що виникають при несприятливих поєднаннях швидкостей роторного колеса, пружних властивостей системи ротор – стріла – підвіска стріли, міцності породи і т.п., бажаним є безступінчатє регулювання швидкості. Характер перехідних

процесів повинен бути оптимальним, таким, що забезпечує обмеження динамічних навантажень механізму і металоконструкцій.

Особливістю механізму є необхідність регулювання швидкості привода практично тільки в процесі різання, тобто під навантаженням. При істотних обмеженнях на динамічні навантаження, а значить, і на прискорення електропривод, як при розгоні, так і при гальмуванні працюватиме тільки в руховому режимі. Отже, забезпечення електроприводом рекуперативного гальмування не є обов'язковим.

Механічна характеристика електроприводу, що представляє залежність кутової швидкості електродвигунів від електромагнітного моменту $\omega = f(M)$, повинна мати екскаваторну форму. Для електроприводу роторного колеса потрібна, можливо, вища жорсткість робочої ділянки механічної характеристики. При недостатній жорсткості коливання зусилля різання викличуть відповідні коливання швидкості електродвигунів і роторного колеса, які будуть тим більше, чим м'якше характеристика. Коливання швидкості можуть додатково посилюватися унаслідок обернено пропорційної залежності між лінійною швидкістю різання і площею поперечного перетину стружок, що зрізаються, а, отже, і моментом навантаження електроприводу. Це може привести до небажаних коливань роторної стріли з небезпекою виникнення резонансних явищ в металоконструкціях екскаватора.

Можливість технологічних перевантажень і режимів стопоріння при зустрічі ковшів з непереборною перешкодою зумовила вимогу обмеження моменту, що розвивався двигунами, на допустимому рівні. Ділянка обмеження моменту механічної характеристики зазвичай має коефіцієнт відсічення, рівний:

$$k_{\text{відс}} = M_{\text{відс}} / M_{\text{стоп}} = 0,8,$$

де $M_{\text{відс}}$ - момент відсічення, перевищення якого супроводжується переходом з робочої ділянки механічної характеристики на ділянку обмеження моменту;

$M_{\text{стоп}}$ - момент стопоріння, відповідає максимально допустимому за умовами міцності механізму моменту.

Таке значення $k_{\text{відс}}$ дає можливість машиністові екскаватора, електроприводи якого не мають автоматичного регулювання швидкості повороту стріли ротора залежно від навантаження приводу роторного колеса, за швидкістю приводу оцінювати його навантаження і своєчасно управляти електроприводами роторного колеса і повороту стріли ротора, не допускаючи їх перевантаження і стопоріння.

Використання екскаваторної механічної характеристики у вживаних електроприводах роторного колеса не виключає в режимах стопоріння неприпустимих динамічних навантажень механічного устаткування, тому в кінематичний ланцюг механізму вводиться ланка з обмеженим граничним передаваним моментом.

Електродвигуни приводу роторного колеса встановлені на оголовці стріли і працюють в умовах підвищеної вібрації і трясіння, в зоні інтенсивної освіти пороши, при значних диферентах, пов'язаних з різним положенням стріли у вертикальній площині. У зв'язку з цим електродвигуни разом з передавальним і виконавчим механізмами повинні мати мінімальну масу і габарити. Крім того, електродвигуни повинні бути закритого виконання, допускати роботу при вібраціях і в похилому положенні, а також оснащуватися пристроями очищення від пилу повітря, використовуваного для охолодження електродвигунів.

Складність вимог, що пред'являються до регульованих електроприводів основних механізмів роторних екскаваторів, зумовила для більшості з них застосування системи електроприводу постійного струму керований перетворювач – двигун. Як керований перетворювач використовується або електромашинний перетворювач (система Г-Д), або реверсивний теристорний перетворювач (система ТП-Д). У магістерській роботі для електроприводу роторного колеса вибираємо систему генератор – двигун.

1.7 Постановка задачі дослідження і шляхи її вирішення

Наразі найбільш вдосконалені методи побудови автоматичних систем керування базуються на строгих математичних моделях об'єктів. Однак для більшості управляючих об'єктів, будь то штучні або природні, побудова точних математичних моделей практично неможлива через їх складність у формалізації. Крім того, ці об'єкти можуть працювати в змінному або непередбачуваному середовищі.

Керування такими об'єктами можливе лише за допомогою адаптивних методів. У випадку складності формалізації управляючого об'єкта, системи, засновані на нових інтелектуальних принципах, викликають особливий інтерес. Ці системи використовують досягнення напрямків штучного інтелекту, таких як нечітка логіка, експертні системи, генетичні алгоритми, штучні нейронні мережі та інші.

Обробка нечіткої інформації та нечіткі висновки вже давно використовуються в різних інтелектуальних системах, проте найбільший розповсюдження нечіткі системи отримали саме у сфері управління

Загальна процедура обробки нечіткої інформації має наступну структуру. Початкові точні дані від датчиків, які моніторять керуючий процес, перетворюються в лінгвістичні значення у спеціальному блоку, відомому як "фазіфікатор". Після цього застосовуються процедури нечіткого виведення на основі множини продукційних правил, що складають основу знань системи управління. Це призводить до формування лінгвістичних значень на виході, які потім перетворюються у точні значення обчислень у блоку "дефазіфікатор". Остаточні управлінські дії створюються на виході цього блоку і подаються на виконавчі механізми. Ця концептуальна структура лежить в основі так званого нечіткого контролера, який використовується в інтелектуальних системах обробки невідзначеної інформації, зокрема в "інтелектуальних" системах управління.

Аналіз показав, що застосування нечітких технологій для синтезу системи управління механізмом обертання колеса роторного екскаватора є обґрунтова-

ним. Це зумовлено тим, що за певних комбінацій швидкостей роторного колеса, пружних властивостей системи ротор-стріла-підвіска, міцності породи тощо можуть виникати резонансні коливання металоконструкцій, що негативно впливає на роботу механізму. Перехідні процеси повинні мати оптимальний характер, який обмежує динамічні навантаження на механізм і металоконструкції. Традиційні регулятори не забезпечують достатньо високі показники якості роботи системи.

Метою роботи є розробка нечіткої системи управління механізмом обертання колеса роторного екскаватора з урахуванням пружних властивостей системи ротор-стріла-підвіска стріли.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

1. Виконати вибір системи електроприводу механізму обертання колеса роторного екскаватора, вибір електродвигуна і основного електроустаткування силового ланцюга електроприводу. Виконати синтез системи управління електроприводом і провести моделювання системи на ЕОМ.

2. Розробити математичну моделі системи управління з урахуванням пружних властивостей системи ротор-стріла-підвіска стріли, провести моделювання багатомасової системи на ЕОМ і виконати аналіз отриманих результатів.

3. Розробити структурну схему нечіткої системи управління, що реалізує високоякісне регулювання з врахуванням пружності механічних зв'язків.

4. Синтезувати фаззфі-регулятор, що забезпечує високу швидкодію і якість управління двомасовою електромеханічною системою.

5. Виконати моделювання нечіткої систем і провести аналіз отриманих результатів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. В результаті аналізу літературних джерел за темою роботи обґрунтовано застосування теорії нечітких множин і нечіткої логіки в задачах управління. Наявність невизначеної або нечіткої інформації, яка не може бути інтерпретована в імовірнісних термінах, призводить до того, що традиційні кількісні методи, використовувані в теорії автоматичного управління, є недостатньо адекватними. В результаті з'являються труднощі у формуванні алгоритмів управління. Один із способів їх подолання полягає у використанні нечітких понять і знань, проведенні операцій з використанням нечітких логічних правил і в отриманні на їх основі нечітких висновків, на базі яких формуються алгоритми управління.

2. Стисло розглянуто математичні основи нечітких систем. Розглянуто поняття нечітких множин, наведені способи завдання нечітких множин, даються визначення функції приналежності, лінгвістичної змінної. Приведені основні операції на нечітких множинах.

3. Розглянуті нечіткі правила висновку. Компоненти теорії нечітких множин, правила імплікації та нечіткі міркування об'єднуються у систему нечіткого висновку. У цій системі виділяють множину застосовуваних нечітких правил, базу даних, що містить описи функцій належності, а також механізм висновку та агрегації, що формується використаними правилами імплікації. При технічній реалізації вхідні і вихідні сигнали представлені вимірюваними значеннями, які однозначно співставляють вхідні значення відповідним вихідним значенням. Для забезпечення взаємодії цих двох видів введено нечітку систему з фузифікатором (перетворювачем множини вхідних даних в нечітку множину) на вході та дефузифікатором (перетворювачем нечітких множин у конкретне значення вихідної змінної) на виході. Вивчені системи нечіткого висновку, такі як Mamdani, Tsukamoto, Sugeno та інші.

4. Одним з ключових напрямків практичного застосування систем нечіткого висновку є вирішення завдань керування різними об'єктами чи процесами.

У таких сценаріях створення нечіткої моделі базується на формальному описі характеристик досліджуваної системи у термінах лінгвістичних змінних. Оскільки, крім алгоритму управління, ключовими концепціями систем управління є вхідні та вихідні параметри, саме вони розглядаються як лінгвістичні змінні при створенні бази правил у системах нечіткого висновку.

5. Проаналізовано області застосування сучасних технологій управління. Показано, що класичні методи керування добре працюють при повністю детермінованому об'єкті управління і детермінованою середовищі. Технології управління з застосуванням штучних нейронних мереж є дуже ефективними і застосовуються в випадку високої складності об'єкту управління і дуже малій інформації про об'єкт. Для систем з неповною інформацією і високою складністю об'єкта управління оптимальними є нечіткі методи управління.

6. Виходячи з аналізу технічних вимог до електроприводів основних механізмів роторних екскаваторів, для електроприводу механізму обертання колеса обрано електропривод постійного струму, реалізований за системою Г–Д.

7. Дослідження доводять доцільність застосування нечітких технологій для синтезу системи управління механізмом обертання колеса роторного екскаватора. За певних несприятливих комбінацій швидкостей роторного колеса, пружних властивостей системи ротор-стріла-підвіска, міцності породи тощо можуть виникати резонансні коливання металоконструкцій, що негативно впливає на роботу механізму. Перехідні процеси мають бути оптимізовані для обмеження динамічних навантажень на механізм і металоконструкції. Традиційні системи управління не забезпечують необхідного рівня якості роботи систем управління механізмом обертання колеса роторного екскаватора.

8. Сформульовано задачу дослідження, що складається в розробці нечіткої системи управління механізмом обертання колеса роторного екскаватора з урахуванням пружності механічних зв'язків.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ МЕХАНІЗМОМ ОБЕРТАННЯ КОЛЕСА РОТОРНОГО ЕКСКАВАТОРА

2.1 Технічні характеристики роторного екскаватора. Вимоги до системи управління

Вихідні дані для розрахунку електроприводу механізму обертання колеса роторного екскаватора і синтезу системи управління наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні дані роторного екскаватора

	Параметри	Одиниці вимірю- вання	Позначен- ня	Величи- на
1	Теоретична продуктивність по рихлій масі	$m^3 \cdot год$	Q	2400
2	Діаметр роторного колеса	H	D_p	8
3	Бічне зусилля різання	H	F_6	$1,2 \cdot 10^6$
4	Питоме зусилля копання	$кг/м^2$	k_f	$3,7 \cdot 10^4$
5	Радіус різання	$м$	R_0	24,3
6	Кутова швидкість повороту платформи	c^{-1}	$\omega_{пл}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
7	Момент площ поворотної пла- тформи, що піддається дії вітру щодо осі обертання	$м^2 \cdot м$	$M_{пв}$	435
8	Швидкість руху транспортної стрічки	$м/с$	V_t	3,5
9	Маса поворотної платформи	$кг$	$m_{пл}$	$700 \cdot 10^3$
10	Маса приймальної частини	$кг$	$m_{пч}$	$127 \cdot 10^3$
11	Маса відвальної частини	$кг$	$m_{вч}$	$124 \cdot 10^3$

Продовження таблиці 2.1

	Параметри	Одиниці вимірю- вання	Позначен- ня	Величина
12	Діаметр роликового круга	m	$D_{кр}$	11
13	Діаметр опорних роликів	m	$d_{тк}$	0,88
14	Момент інерції поворотної плат- форми	$кг \cdot м^2$	$J_{пл}$	$20 \cdot 10^7$
15	Частота обертання ротора	$рад/хв$	ω_p	6
16	Щільність ґрунта	$кг/м^3$	γ_p	$1,8 \cdot 10^3$
17	Коефіцієнт аеродинамічного опору		$k_{ад}$	1,4
18	Максимально допустиме повіт- ряне навантаження	$Па$	$\lambda_{вт}$	300
19	Максимально подоланий уклон		γ	10^0
20	Число двигунів механізму пово- роту		k	2
21	Допустимі прискорення і упові- льнення платформи	c^{-2}	$\omega_{пл}$	0,005
22	КПД редуктора роторного колеса		η_p	0,8
23	КПД редуктора механізму пово- роту		η_p	0,45 – 0,65
24	Максимальний кут повороту		$\alpha_{п\ max}$	$\pm 75^0$

Вимоги до показників якості функціонування системи управління.

Перерегулювання швидкості механізму при ступінчастій входній дії не бі-
льше 15%, час регулювання не більше 10 с.

2.2 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна механізму обертання колеса роторного екскаватора

Режим роботи електроприводу роторного колеса тривалий, при цьому потужність на валу двигуна визначається співвідношенням

$$P_d = \frac{P_{p\Sigma}}{\eta_p}, \quad (2.1)$$

де η_p - ККД редуктора роторного колеса;

$P_{p\Sigma}$ - сумарна потужність на валу роторного колеса яка визначається наступним чином

$$P_{p\Sigma} = k_t (P_p + P_{\pi}), \quad (2.2)$$

де $k_t = 1,03 \div 1,05$ - коефіцієнт, що враховує навантаження на валу роторного колеса, від тертя ковшів об породу і навантаження, пов'язане з повідомленням окремої від масиву породи кінематичної енергії;

P_p - потужність копання

$$P_p = \frac{Q k_f}{3600 k_p} \cdot 10^{-3}, \quad (2.3)$$

Q - продуктивність екскаватора;

k_f - коефіцієнт питомого опору копанню;

k_p - коефіцієнт розпушування ґрунту; $k_p = 1,1 \div 1,5$, приймаємо $k_p = 1,3$

$$P_p = \frac{2400 \cdot 1,8 \cdot 10^6}{3600 \cdot 1,3} \cdot 10^{-3} = 923 \text{ кВт},$$

P_{π} - потужність, необхідна для здійснення роботи по подоланню сили тяжіння при підйомі породи після її відділення від масиву:

$$P_{\Pi} = Q \cdot \frac{\gamma_{\Pi} g D_p}{k_p \cdot 7200} \cdot 10^{-3}, \quad (2.4)$$

γ - щільність породи;

g - прискорення вільного падіння;

D_p - діаметр роторного колеса

$$P_{\Pi} = 2400 \cdot \frac{1,8 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 8}{1,3 \cdot 7200} \cdot 10^{-3} = 36,2 \text{ кВт}.$$

Набуті значення P_p і P_{Π} підставимо в рівняння (4.2) і (4.1), отримаємо:

$$P_{p\Sigma} = 1,04 \cdot (923 + 36,2) = 959,2 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{д.}} = \frac{1,04 \cdot (923 + 36,2)}{0,8} = 1247 \text{ кВт}.$$

По набутому значенню потужності $P_{\text{д.}}$ по каталогу вибираємо компенсований електродвигун постійного струму типа П-18-33-9к. Технічні дані двигуна: номінальна потужність $P_{\text{н}} = 1350 \text{ кВт}$, номінальна напруга $U_{\text{н}} = 630 \text{ В}$, номінальна швидкість обертання $n_{\text{н}} = 550 \text{ об/хв}$, номінальний струм $I_{\text{н}} = 2280 \text{ А}$, опір обмотки якоря $R_{\text{я д}} = 0,00462 \text{ Ом}$, опір обмотки додаткових полюсів $R_{\text{дп д}} = 0,00053 \text{ Ом}$, опір компенсаційної обмотки $R_{\text{ко д}} = 0,00303 \text{ Ом}$, число пар полюсів $2p = 6$, ККД $\eta_{\text{д}} = 0,94$, момент інерції $J_{\text{д}} = 775 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Оскільки періоди пуску і гальмування складають незначну частину від часу роботи, то перевірки двигуна по нагріву не вимагається [42].

2.3 Вибір основного електроустаткування електроприводу

Як керований перетворювач в електроприводі роторного колеса використовується генератор постійного струму (система Г-Д) [42].

Параметри генератора в системі Г-Д визначаються з умови

$$I_{нг} \geq I_{нд}; \quad U_{нг} \geq U_{нд}; \quad P_{нг} \geq \frac{P_{нд}}{\eta_d} \quad (2.5)$$

Вибираємо генератор постійного струму типа П-18-33-9к. Технічні дані генератора: номінальна потужність $P_n = 1750 \text{ кВт}$, номінальна напруга $U_n = 750 \text{ В}$, номінальна швидкість обертання $n_n = 750 \text{ об/хв}$, номінальний струм $I_n = 2535 \text{ А}$, опір обмотки якоря $R_{яг} = 0,00443 \text{ Ом}$, опір обмотки додаткових полюсів $R_{дпг} = 0,00049 \text{ Ом}$, опір компенсаційної обмотки $R_{ког} = 0,00314 \text{ Ом}$, число пар полюсів $2p = 6$, ККД $\eta_g = 0,94$, номінальна напруга збудження $U_{нзб} = 750 \text{ В}$, опір обмотки збудження $R_{збг} = 5,73 \text{ Ом}$, мило витків обмотки збудження $W_{зб} = 330$

Як привідний двигун вибираємо синхронний електродвигун СДЭ8-15-76-6. Технічні дані синхронного двигуна: номінальна потужність $P_n = 2200 \text{ кВт}$, номінальна напруга $U_n = 10 \text{ кВ}$, номінальна швидкість обертання $n_n = 1000 \text{ об/хв}$.

Для живлення обмотки збудження генератора вибираємо тиристорний перетворювач – збудник БУВ-3603-12. Номінальна потужність збудника $P_n = 11,5 \text{ кВт}$, номінальна випрямлена напруга $U_{дн} = 230 \text{ В}$, номінальний випрямлений струм $I_{дн} = 50 \text{ А}$, схема випрямлення – реверсивна трифазна нульова, управління групами тиристорів – роздільне.

2.4 Розрахунок і побудова статичних характеристик розімкненої і замкненої систем

На рис. 2.1. зображена схема системи Г-Д.

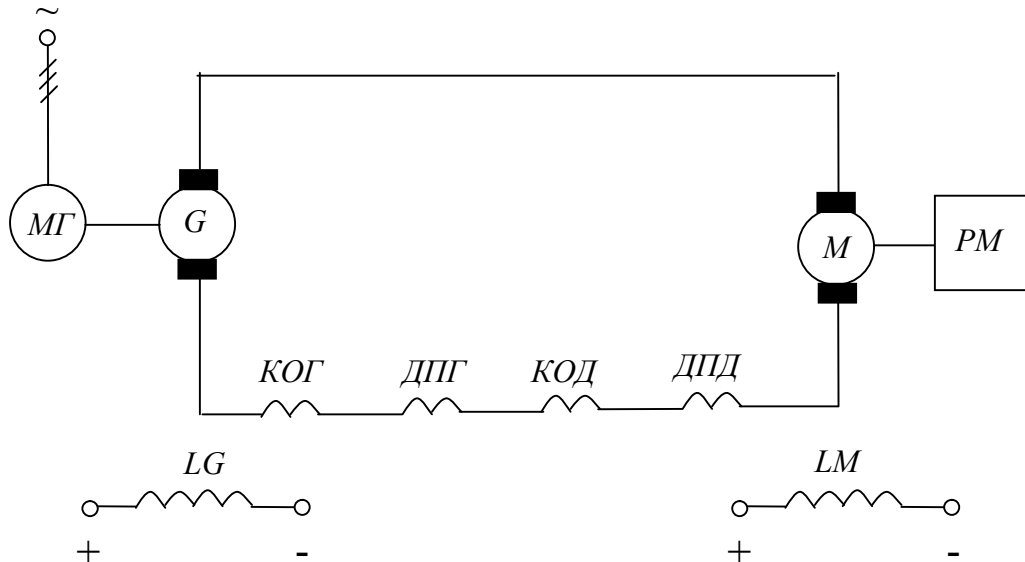


Рисунок 2.1 – Схема якірного ланцюга перетворювального агрегату

На схемі прийняті наступні позначення:

PM – робочий механізм;

M , G , MG – двигун, генератор і приводний двигун генератора;

$КОД$, $КОГ$, $ДПД$, $ДПГ$ – компенсаційні обмотки і обмотки додаткових полюсів двигуна і генератора відповідно;

LM , LG – обмотки збудження двигуна і генератора відповідно.

Якірні обмотки двигуна і генератора сполучені послідовно і утворюють якірний ланцюг.

Якщо розглядати ЕДС генератора E_{Γ} як джерело живлення двигуна, то рівняння електромеханічної характеристики електроприводу матиме вид:

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{k_{\Gamma} \Phi_{\text{нд}}} - I_{\text{я}} \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{k_{\text{д}} \Phi_{\text{нд}}} = \omega_0 - \Delta\omega_{\text{ст}}, \quad (2.6)$$

$R_{\text{я}\Sigma}$ – сумарний опір якірного ланцюга, Ом ,

$$R_{\Sigma} = R_{\Sigma Д} + R_{\Sigma Г}; \quad (2.7)$$

$R_{\Sigma Д}$ – сумарний опір якірного ланцюга двигуна, Ом,

$$R_{\Sigma Д} = k_t (R_{я д} + R_{дп д} + R_{ко д}); \quad (2.8)$$

$R_{я д}$, $R_{дп д}$, $R_{ко д}$ – опір обмотки якоря, компенсаційної і додаткових полюсів двигуна, Ом;

$R_{\Sigma Г}$ – сумарний опір якірного ланцюга генератора, Ом:

$$R_{\Sigma Г} = k_t (R_{я Г} + R_{дп Г} + R_{ко Г}); \quad (2.9)$$

$R_{я Г}$, $R_{дп Г}$, $R_{ко Г}$ – опір обмотки якоря, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки генератора, Ом;

k_t – температурний коефіцієнт; у каталогах опори обмоток електричних машин приводяться для 20°C, отже, при розрахунках їх слід приводити до робочої температури, тобто множити на температурний коефіцієнт, який для машин з класом ізоляції H рівний $k_t = 1,36$.

Оскільки результуючий опір якірного ланцюга в системі Г-Д вище в порівнянні з опором якірного ланцюга двигуна, жорсткість механічної характеристики $\beta = k_d \Phi_{нд}^2 / R_{\Sigma}$ в системі Г-Д нижча за жорсткість природної характеристики двигуна.

$$R_{\Sigma Д} = 1,36 \cdot (0,00462 + 0,00303 + 0,00053) = 0,011 \text{ Ом}.$$

$$R_{\Sigma Г} = 1,36 \cdot (0,00433 + 0,00314 + 0,00049) = 0,01 \text{ Ом}.$$

$$R_{\Sigma} = (0,011 + 0,01) = 0,021 \text{ Ом}$$

k_d - конструктивний коефіцієнт двигуна;

$\Phi_{нд}$ - номінальний потік двигуна.

Добуток k_d на $\Phi_{нд}$ (позначимо надалі як c) можна визначити з виразу для природної електромеханічної характеристики двигуна:

$$k_d \Phi_{нд} = \frac{U_{нд} - I_{нд} R_{я\Sigma}}{\omega_{нд}} ; \quad (2.10)$$

$U_{нд}$, $I_{нд}$, $\omega_{нд}$ – номінальні напруга, B , струм, A , і швидкість c^{-1} двигуна;

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (2.11)$$

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot 550}{30} = 57,6 \text{ } c^{-1}$$

$$k_d \Phi_{нд} = \frac{630 - 2280 \cdot 0,011}{57,6} = 10,5 \text{ } B \cdot c / \text{рад}.$$

При побудові механічних і електромеханічних характеристик системи Г-Д в якості максимальної ЕДС генератора E_r приймаємо номінальну напругу двигуна, тобто $E_r = U_n = 630 \text{ } B$.

Побудуємо електромеханічні характеристики розімкненої системи Г-Д для $E_r = U_n = 630 \text{ } B$, а також для $E_r = 0,5U_n = 630/2 = 315 \text{ } B$, $E_r = 0$, $E_r = -0,5U_n = -315 \text{ } B$ і $E_r = -U_n = -630 \text{ } B$. Для побудови електромеханічних характеристик використовуємо рівняння (2.1). Оскільки електромеханічні характеристики системи Г-Д є прямими лініями, то для їх побудови досить розрахувати 2 точки.

1 точка – точка ідеального холостого ходу:

$$I = 0, \quad \omega = \omega_0 = \frac{E_r}{k_d \Phi_{нд}}$$

$$E_r = U_n = 630 \text{ } B, \quad \omega_{01} = \frac{630}{10,5} = 60 \text{ } c^{-1}.$$

$$E_r = 0,5U_n = 315 \text{ } B, \quad \omega_{02} = \frac{315}{10,5} = 30 \text{ } c^{-1}$$

$$E_r = 0, \quad \omega_{03} = 0$$

2 точка – номінальна точка:

$$I = I_{\text{н}} = 2280 \text{ A}, \quad \omega_{\text{н}} = \frac{E_{\text{г}}}{k_{\text{д}} \Phi_{\text{нд}}} - I_{\text{н}} \frac{R_{\Sigma}}{k_{\text{д}} \Phi_{\text{нд}}},$$

$$E_{\text{г}} = U_{\text{н}} = 630 \text{ B}, \quad \omega_{\text{н1}} = \frac{630}{10,5} - 2280 \cdot \frac{0,021}{10,5} = 60 - 4,56 = 55,44 \text{ c}^{-1}$$

$$E_{\text{г}} = 0,5 U_{\text{н}} = 315 \text{ B}, \quad \omega_{\text{н1}} = \frac{315}{10,5} - 2280 \cdot \frac{0,021}{10,5} = 30 - 4,56 = 25,44 \text{ c}^{-1}$$

Графіки електромеханічних характеристик розімкненої системи показані на рис. 2.2 пунктирними лініями.

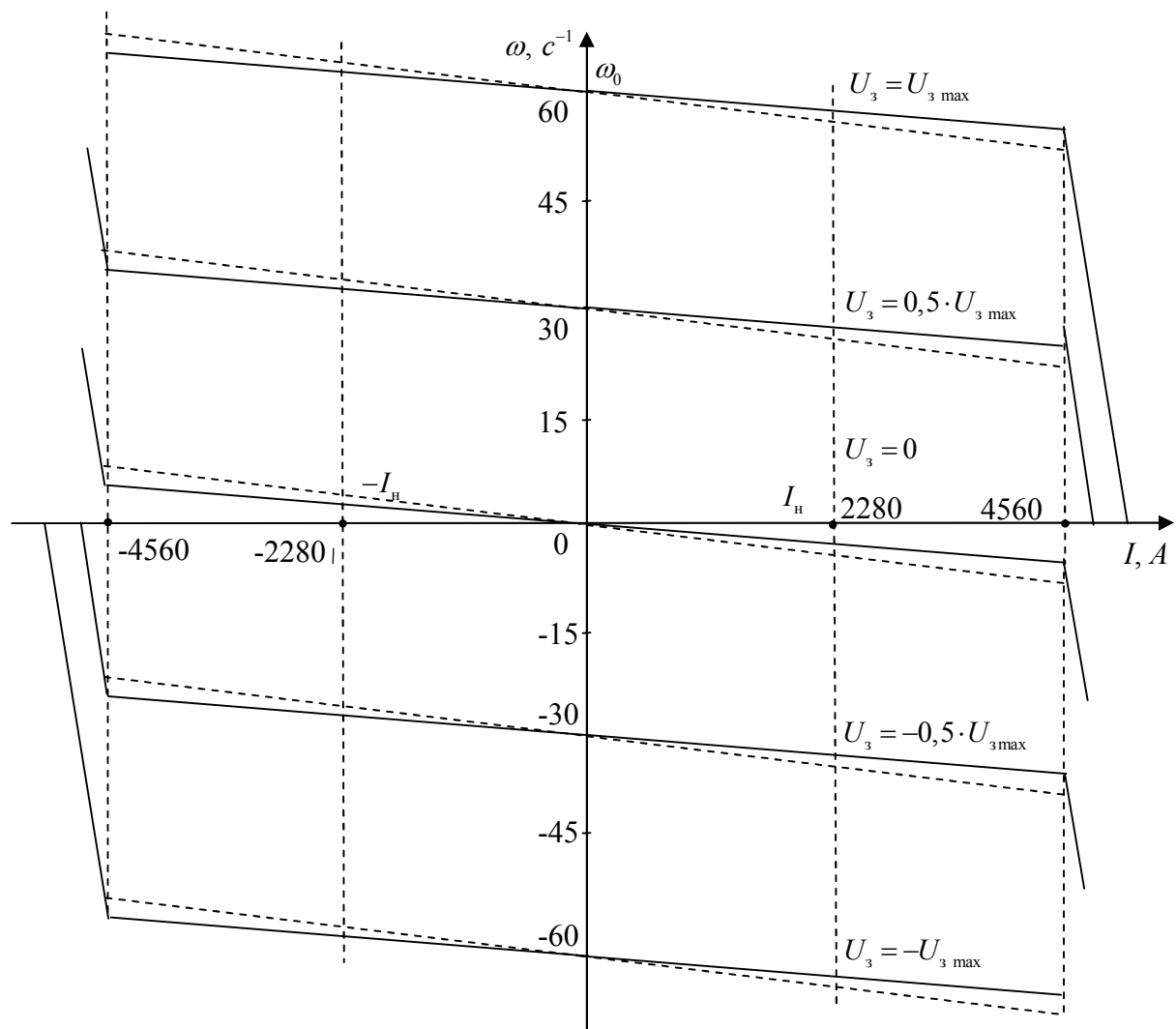


Рисунок 2.2 – Електромеханічні характеристики замкнутої системи Г-Д

Характеристики для від'ємних значень напруги симетричні відносно осі координат характеристикам, побудованим для додатних значень напруги.

Оскільки $M = k_{\text{д}} \Phi_{\text{нд}} \cdot I$, то механічні характеристики аналогічні електро-механічним.

До електроприводів механізмів роторного екскаватора пред'являються підвищені вимоги відносно жорсткості робочої частини електромеханічних (і механічних) характеристик і обмеження максимального значення струму (і моменту), що розвивається, тобто необхідність формування “екскаваторної” характеристики показаної на рис. 2.3.

На робочій ділянці 1 у міру зростання навантаження потрібне аж до струму відсічення $I_{\text{я}} = I_{\text{відс}}$ (відповідає моменту відсічення $M_{\text{відс}}$) пропорційне

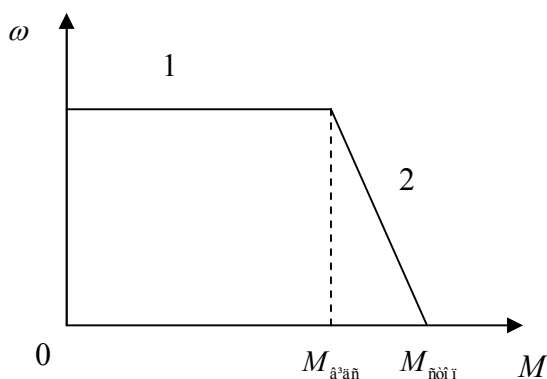


Рисунок 2.3 – Екскаваторна механічна характеристика

струму $I_{\text{я}}$ збільшення ЕДС генератора, $E_{\text{г}}$ чим компенсується зростаюче падіння напруги на опорі $R_{\text{я}\Sigma}$ і забезпечується підвищення жорсткості робочої ділянки характеристики. Подальше збільшення навантаження повинне супроводжуватися пропорційним різниці $\Delta I_{\text{я}} = I_{\text{я}} - I_{\text{відс}}$ зниженням $E_{\text{г}}$ і, отже, швидкості приводу, яка досягає нуля

$\omega = 0$ при струмі $I_{\text{я}} = I_{\text{стоп}}$ (відповідає моменту стопоріння $M_{\text{д}} = M_{\text{стоп}}$) і ЕДС генератора $E_{\text{г}} = I_{\text{стоп}} R_{\text{я}\Sigma}$ (ділянка 2 характеристики).

Забезпечити формування такої характеристики можна тільки в замкнутих САУ електроприводом. Як указувалося вище, на роторних екскаваторах використовуються САУ, що мають структуру з підсумовуючим підсилювачем, на вході якого підсумовуються сигнали завдання і сигнали зворотних зв'язків. Зворотні зв'язки можуть бути різних типів: жорсткі і гнучкі ЗЗ по напрузі генератора, ЗЗ за швидкістю двигуна, ЗЗ по струму з відсіченням. Для електроприводу

використовуємо САУ із 33 за швидкістю, гнучким 33 по струму і 33 по струму з відсіченням.

Функціональна схема показана на рис. 2.4.

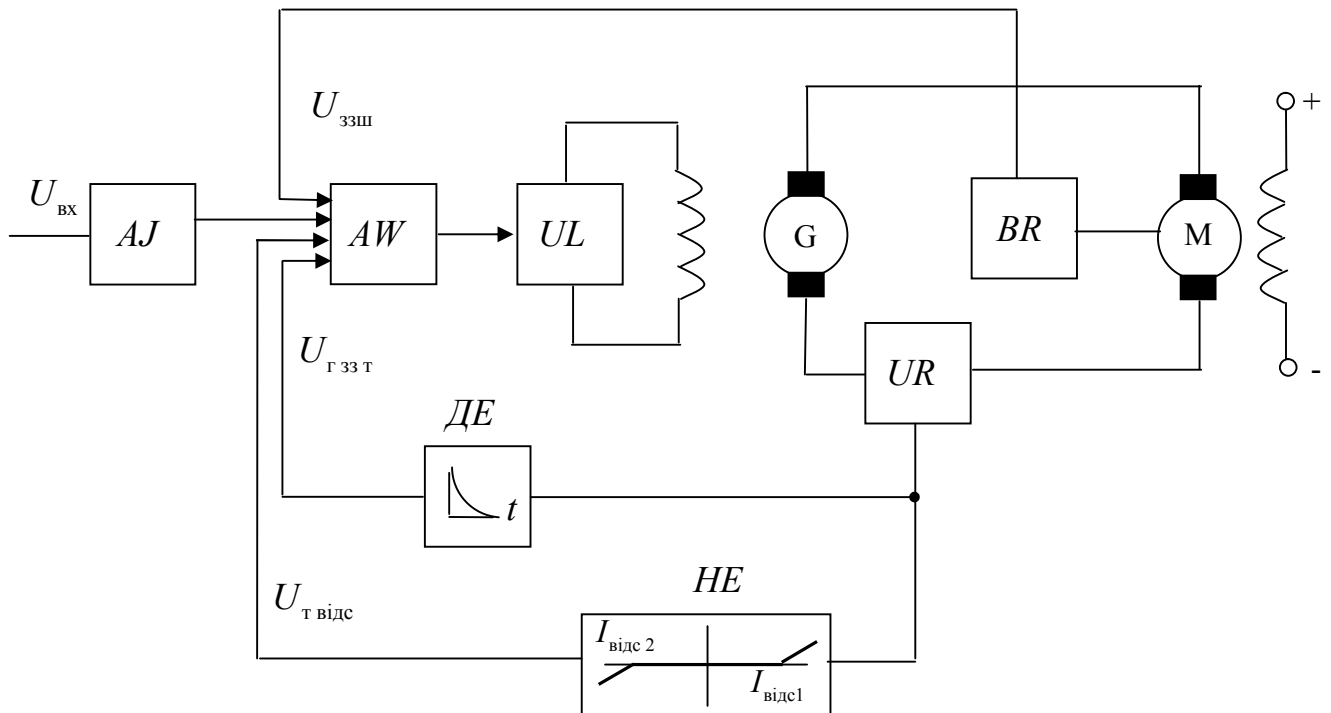


Рисунок 2.4 - Функціональна схема електроприводу Г-Д

На схемі прийняті наступні позначення: AJ - задатчик інтенсивності; AW - підсилювач, що підсумовує; UL - збудник генератора; UA - датчик струму; BR - датчик швидкості; HE - нелінійний елемент; DE - диференціюючий елемент

Задатчик інтенсивності і гнучкі 33 не беруть участь у формуванні статичних характеристик приводу. Істотну для формування характеристик нелінійність має нелінійний елемент HE , що стоїть в ланцюзі 33 по струму з відсіченням. Його характеристика вхід-вихід містить зону нечутливості, за допомогою якої створюється затримка введення сигналу 33 до тих пір, поки струм якоря лежить в межах

$$I_{\text{відс2}} \leq I_{\text{я}} \leq I_{\text{відс1}} \quad (2.12)$$

У даному приводі зазвичай витримується рівність

$$I_{\text{відс1}} = |I_{\text{відс2}}| = I_{\text{відс}} = 2 I_{\text{нд}} . \quad (2.13)$$

Рівняння електромеханічної характеристики замкнутої системи має вид:

$$\begin{aligned} \omega &= U_3 \frac{k_\Sigma}{c + k_\Sigma k_{\text{ззш}}} - I_{\text{я}} \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{c + k_\Sigma k_{\text{ззш}}} - 1(\Delta I)(I_{\text{я}} - I_{\text{відс}}) \frac{k_{\text{т відс}} k_\Sigma}{c + k_\Sigma k_{\text{ззш}}} = \\ &= \omega_0 - \Delta \omega_{\text{ст1}} - 1(\Delta I) \Delta \omega_{\text{ст2}} , \end{aligned} \quad (2.14)$$

де $k_\Sigma = k_{AW} k_{UL} k_\Gamma$ - результуючий коефіцієнт посилення прямого ланцюга САУ, рівний добутку коефіцієнтів передачі елементів AW , UL і G на лінійній частині їх характеристик вхід-вихід;

$k_{\text{ззш}}$, $k_{\text{т відс}}$ - коефіцієнти за швидкістю і струму з відсіченням;

$$c = k_{\text{д}} \Phi_{\text{нд}} ;$$

$1 \cdot (\Delta I)$ - одинична функція, рівна 0 при $|I_{\text{я}}| \leq I_{\text{відс}}$ і рівна 1 при $|I_{\text{я}}| > I_{\text{відс}}$.

Коефіцієнт посилення генератора

$$k_\Gamma = \frac{E_{\text{нг}}}{U_{\text{нзбг}}} = \frac{U_{\text{нг}} + I_{\text{нг}} R_{\text{я}\Sigma\Gamma}}{U_{\text{нзбг}}} , \quad (2.15)$$

де $U_{\text{нг}}$, $U_{\text{нзбг}}$ - номінальна напруга на якорі і номінальна напруга збудження генератора, В;

$I_{\text{нг}}$ - номінальний струм генератора, А.;

$E_{\text{нг}}$ - номінальна ЕДС генератора

$$k_\Gamma = \frac{750 + 2535 \cdot 0,01}{220} = 3,4 .$$

Коефіцієнт посилення тиристорного збудника приблизно можна визначати, як

$$k_{UL} = \frac{U_{\text{днзб}}}{U_y} ,$$

де $U_{днзб}$ – номінальна випрямлена напруга збудника, B , приймаємо $U_{днзб} = U_{нзбг}$;

U_y – напруга управління на вході тиристорного збудника; оскільки в каталозі значення U_y не вказані, приймаємо $U_y = 10 B$.

$$k_{UL} = \frac{230}{10} = 23,$$

Коефіцієнт посилення суматора приймаємо $k_{AW} = 0,1$, тоді

$$k_{\Sigma} = 0,1 \cdot 23 \cdot 3,4 = 7,82.$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю $k_{ззш}$ розраховуємо, виходячи з необхідного статичного перепаду швидкості $\Delta\omega_{ст1}$ при номінальному струмі двигуна:

$$\Delta\omega_{ст1} = I_{нд} \frac{R_{я\Sigma}}{k_c + k_{\Sigma}k_{ззш}}, \quad (2.16)$$

звідки

$$k_{ззш} = I_{нд} \frac{R_{я\Sigma}}{k_{\Sigma}\Delta\omega_{ст1}} - \frac{c}{k_{\Sigma}}. \quad (2.17)$$

Значення $\Delta\omega_{ст1}$ приймаємо рівним половині статичного перепаді швидкості в розімкненій системі $\Delta\omega_{ст}$ при номінальному навантаженні

$$\Delta\omega_{ст1} = 0,5\Delta\omega_{ст} = 0,5(\omega_{01} - \omega_{н1}), \quad (2.18)$$

ω_{01} , $\omega_{н1}$ - розраховані вище швидкість ідеального холостого ходу і швидкість при номінальному навантаженні розімкненої системи.

$$\Delta\omega_{ст1} = 0,5 \cdot (60 - 55,44) = 2,28 \text{ } c^{-1}.$$

$$k_{ззш} = 2280 \cdot \frac{0,021}{8,1 \cdot 2,28} - \frac{10,5}{8,1} = 1,3.$$

Розрахунок коефіцієнта відсічення по струму $k_{\text{т відс}}$ проводиться в цілях отримання заданого максимального струму стопоріння по формулі:

$$k_{\text{т відс}} = \frac{U_{\text{з max}} - I_{\text{стоп}} \frac{R_{\Sigma}}{k_{\Sigma}}}{I_{\text{стоп}} - I_{\text{відс}}} . \quad (2.19)$$

Приймаємо

$$I_{\text{відс}} = 2I_{\text{нд}} = 2 \cdot 2280 = 4560 \text{ A}; \quad I_{\text{стоп}} = 2,3I_{\text{нд}} = 2,3 \cdot 2280 = 5244 \text{ A}.$$

Величину напруги завдання $U_{\text{з max}}$ визначаємо з умови отримання при $U_{\text{з max}}$ швидкості ідеального холостого ходу розімкненої системи при $E_{\Gamma} = U_{\text{нд}}$.

$$\omega_0 = U_{\text{з max}} \frac{k_{\Sigma}}{c + k_{\Sigma} k_{\text{зш}}} = \frac{U_{\text{нд}}}{c}, \quad (2.20)$$

звідки

$$U_{\text{з max}} = \frac{U_{\text{нд}} (c + k_{\Sigma} k_{\text{зш}})}{c k_{\Sigma}} . \quad (2.21)$$

$$U_{\text{з max}} = \frac{630 \cdot (10,5 + 7,82 \cdot 1,3)}{10,5 \cdot 7,82} = 158,6 \text{ B}$$

$$k_{\text{т відс}} = \frac{158,6 - 5244 \cdot 0,021 / 7,82}{5244 - 4560} = 0,21 .$$

Отже, рівняння електромеханічної характеристики замкнутої системи (Г-Д) управління електроприводом роторного колеса екскаватора, після підстановки чисельних значень, прийме вид

$$\begin{aligned} \omega &= U_{\text{з}} \cdot \frac{7,82}{10,5 + 7,82 \cdot 1,3} - I_{\text{я}} \frac{0,021}{10,5 + 7,82 \cdot 1,3} - 1(\Delta I)(I_{\text{я}} - 4560) \frac{0,21 \cdot 7,82}{10,5 + 7,82 \cdot 1,3} = \\ &= U_{\text{з}} \cdot 0,378 - I_{\text{я}} \cdot 0,001016 - 1 \cdot (\Delta I) \cdot (I_{\text{я}} - 4560) \cdot 0,0795 . \end{aligned}$$

Виконаємо розрахунок характеристик при для трьох значень $U_{\text{з}}$, а саме:

$$U_{\text{з}} = U_{\text{з max}} = 158,6 \text{ B}, U_{\text{з}} = 0,5U_{\text{з max}} = 0,5 \cdot 158,6 = 79,3 \text{ B}, U_{\text{з}} = 0).$$

1 точка- точка ідеального холостого ходу

$$I_{\text{я}} = 0, \quad M = 0.$$

$$\omega_{01} = 158,6 \cdot 0,378 = 60 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_{02} = 79,3 \cdot 0,378 = 30 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_{03} = 0 \cdot 0,378 = 0$$

2 точка – відповідає подвійному номінальному навантаженню

$$I_{\text{я}} = I_{\text{відс}} = 4560 \text{ A}$$

$$\omega_1 = 60 - 4560 \cdot 0,001016 = 55,44 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_2 = 30 - 4560 \cdot 0,001016 = 25,44 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_3 = 0 - 4560 \cdot 0,001016 = -4,56 \text{ c}^{-1}$$

3 точка відповідає струму стопоріння

$$\omega_{1,2} = 0 ;$$

$$I_1 = I_{\text{стоп1}} = 5244 \text{ A}.$$

Струми стопоріння для характеристики при $U_3 = 79,3 \text{ B}$ визначаємо з виразу для електромеханічної характеристики, підставивши $\omega = 0$, одержимо $I_{\text{стоп2}} = 4902 \text{ A}$.

Електромеханічні характеристики замкнутої системи для трьох значень напруги завдання і для двох напрямів обертання, побудовані на рисунку 2.2, суцільні лінії.

2.5 Дослідження динамічних характеристик системи

Для дослідження динамічних характеристик розробляємо алгоритмічну схему системи. Алгоритмічна схема системи, побудована відповідно до функціональної схеми рисунка 2.4, показана на рис.2.5.

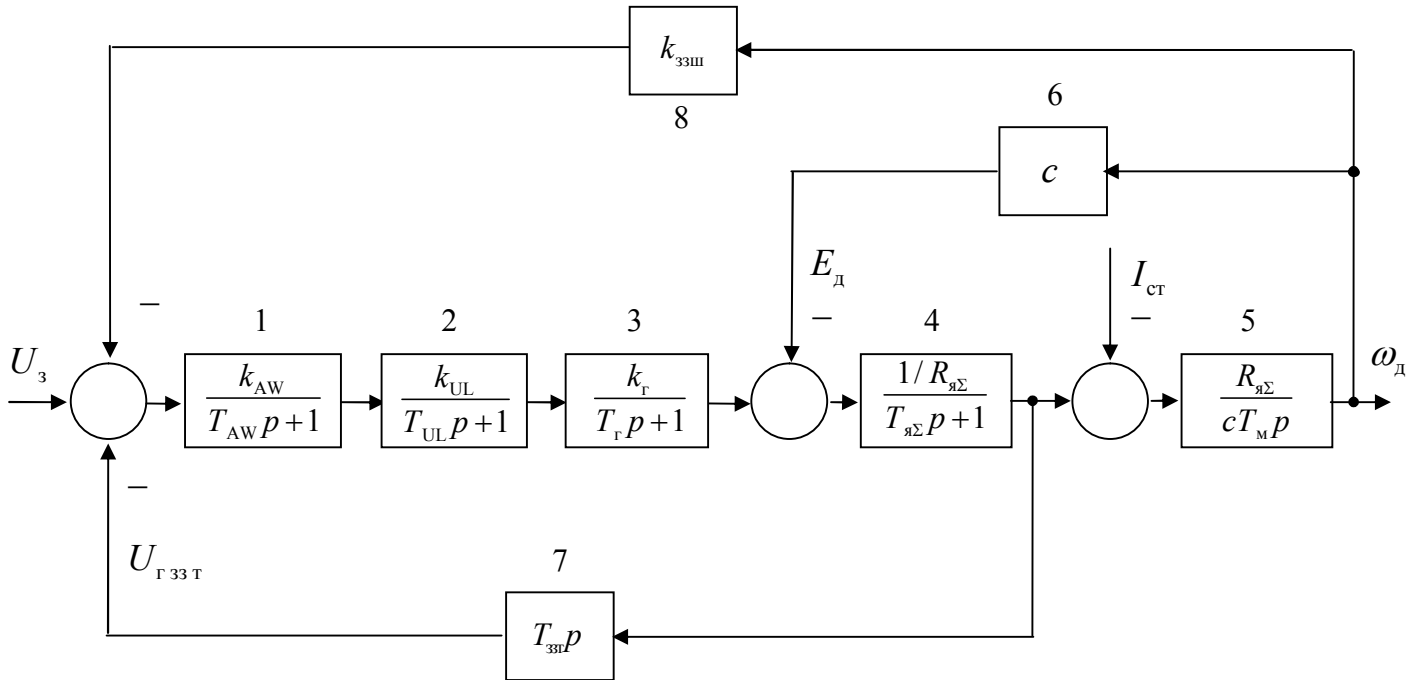


Рисунок 2.5 – Алгоритмічна схема замкненої системи автоматичного управління електроприводу Г-Д

У алгоритмічній схемі не приведений зворотний зв'язок по струму з відсіченням, оскільки він не бере участь в робочих режимах, і задатчик інтенсивності, оскільки його вплив можна врахувати шляхом подачі завдання $U_3(t)$, що лінійно змінюється в часі.

Визначимо значення параметрів системи.

При визначенні постійної часу генератора T_Γ вважаємо, що вона приблизно рівна постійній часу незалежної обмотки збудження (це справедливо за відсутності паралельної і послідовної обмотки і зневазі вихровими струмами):

$$T_\Gamma = T_{36\Gamma} = \frac{2 p_\Gamma W_{36} k_\Phi}{R_{36}}, \quad (2.31)$$

де $W_{зб}$, $R_{зб}$ – число витків на полюс і активний опір, Ом, незалежної обмотки збудження;

p_r – число пар полюсів генератора;

k_ϕ – коефіцієнт нахилу кривої намагнічення для лінійної ділянки кривої намагнічення, можна прийняти $k_\phi = \Delta\Phi / \Delta I_{зб} = 0,29 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{с}$.

$$T_r = T_{зб\Gamma} = \frac{6 \cdot 330 \cdot 0,29 \cdot 10^{-2}}{5,73} = 1,002 \text{ с}.$$

Електромеханічна постійна часу електроприводу

$$T_m = \frac{J_\Sigma R_{я\Sigma}}{(k c)^2}; \quad (2.50)$$

де J_Σ – сумарний момент інерції якоря двигуна і приведений до його швидкості момент інерції механізму, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$. У розрахунках можна прийняти $J_\Sigma = 1,3 J_d$

$$T_m = \frac{1,3 \cdot 775 \cdot 0,021}{10,5^2} = 0,19 \text{ с}$$

Електромагнітна постійна часу електроприводу

$$T_\gamma = \frac{L_{я\Sigma}}{R_{я\Sigma}} \quad (2.52)$$

де $L_{я\Sigma}$ – сумарна індуктивність якірного ланцюга, Гн

$$L_{я\Sigma} = k L_{яд} + L_{яг}, \quad (2.53)$$

$L_{яд}$, $L_{яг}$ – індуктивність двигуна і генератора відповідно; дані індуктивності можуть бути визначені по наближеній формулі, Гн:

$$L_{\text{я д}(\Gamma)} = k_k \frac{U_{\text{н д}(\Gamma)}}{p_{\text{д}(\Gamma)} \omega_{\text{н д}(\Gamma)} I_{\text{н д}(\Gamma)}}, \quad (2.54)$$

k_k – коефіцієнт, рівний $k_k = 0,25$ для компенсованої машини і $k_k = 0,6$ для некомпенсованої;

$U_{\text{н д}(\Gamma)}$, $I_{\text{н д}(\Gamma)}$, $\omega_{\text{н д}(\Gamma)}$ – номінальні величини напруги, B , струму, A , і швидкості, c^{-1} , двигуна і генератора відповідно;

$p_{\text{д}(\Gamma)}$ – число пар полюсів двигуна і генератора.

Номінальна швидкість генератора:

$$\omega_{\text{н Г}} = \frac{\pi n_{\text{н Г}}}{30}, \quad (2.55)$$

$$\omega_{\text{н Г}} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,4 \text{ } c^{-1}$$

$$L_{\text{я д}} = 0,25 \cdot \frac{630}{3 \cdot 57,6 \cdot 2280} = 0,0004 \text{ Гн}$$

$$L_{\text{я Г}} = 0,25 \cdot \frac{750}{3 \cdot 78,4 \cdot 2535} = 0,00031 \text{ Гн}$$

$$L_{\text{я } \Sigma} = 0,0004 + 0,00031 = 0,00071 \text{ Гн}$$

$$T_{\text{я}} = \frac{0,00071}{0,021} = 0,034 \text{ с}$$

Постійну часу зворотного зв'язку по току $T_{\text{ззГ}}$ можна визначити таким чином: використовуючи критерій Гурвіца, знайти мінімальне значення $T_{\text{ззГ min}}$, при якому система стійка. Потім провести розрахунок перехідних характеристик для значень $T_{\text{ззГ}} \geq T_{\text{ззГ min}}$ і вибрати те значення, при якому перехідний процес оптимальний. Якщо система стійка при будь-якому значенні $T_{\text{ззГ}}$, то слід задатися рядом значень $T_{\text{ззГ}}$ (наприклад, $T_{\text{ззГ}} = 0,005; 0,01; 0,05$) і вибрати оптимальне

значення. У роботі величину $T_{ззт}$ визначимо шляхом моделювання системи на ЕОМ.

Проводимо виведення передавальних функцій системи по задаючій і збудуючій діях. Для спрощення розрахунків без істотної погрішності можна виключити з розгляду постійні часу напівпровідникових суматорів AW і тиристорних збудників UL , постійні часу яких більш ніж в 50 разів менші за T_a . Отримаємо алгоритмічну схему рис. 2.6. На схемі ланки пронумеровані для зручності досліджень.

Дану схему використовуємо для одержання передатних функцій.

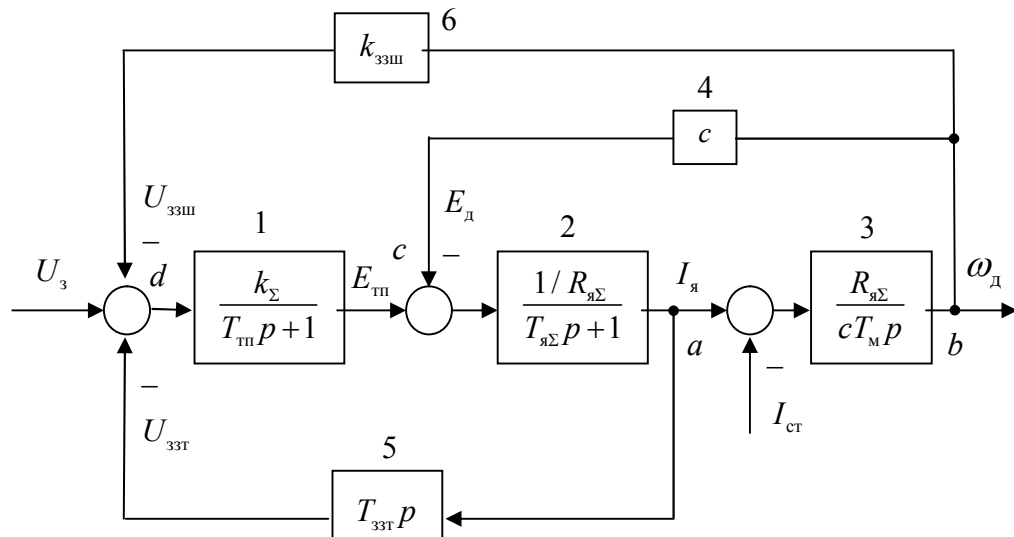


Рисунок 2.6 – Спрощена алгоритмічна схема системи управління

1. Передавальна функція для швидкості по задаючій дії:

$$W_1(p) = \frac{\omega_d(p)}{U_3(p)}. \quad (2.56)$$

При виведенні передавальної функції вважаємо $I_{ст} = 0$. Перемкнемо на рис. 2.6 лінії з т. a в т. b , отримаємо схему рис.2.7.

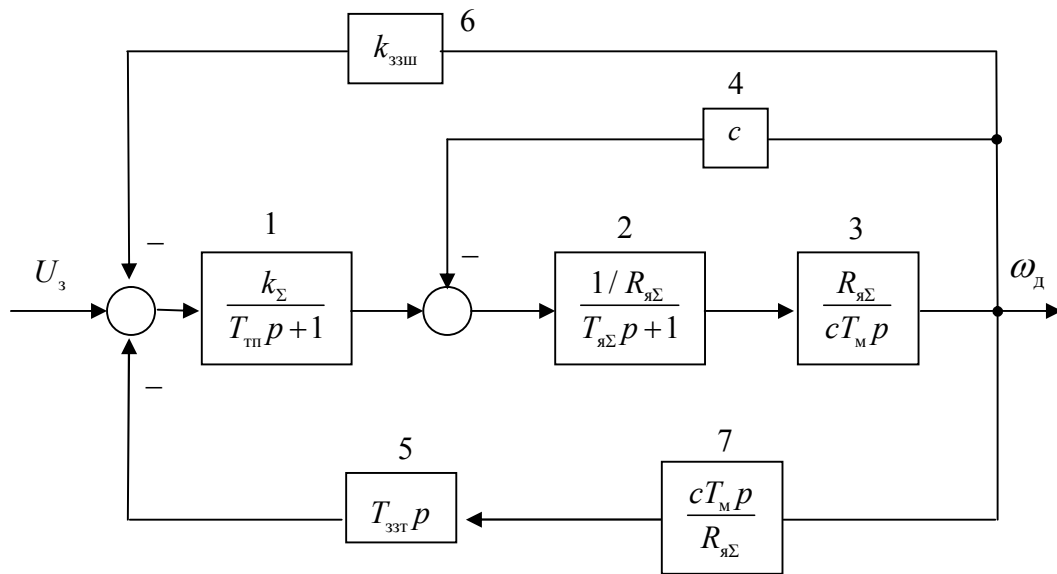


Рисунок 2.7 – Алгоритмічна схема для отримання передавальної

$$\text{функції } W_1(p) = \frac{\omega_d(p)}{U_3(p)}$$

Використовуючи правила визначення передавальних функцій при паралельному, послідовному та зустрічному паралельному з'єднанні ланок, знаходимо шукану передавальну функцію для швидкості по задаючій ді.

$$1) W_{2,3} = \frac{1/R_{я\Sigma}}{T_{я\Sigma}p + 1} \cdot \frac{R_{я\Sigma}}{cT_{мп}p} = \frac{1}{cT_{мп}p(T_{я\Sigma}p + 1)}.$$

$$2) W_{2,3,4} = \frac{\frac{1}{cT_{мп}p(T_{я\Sigma}p + 1)}}{1 + \frac{1}{cT_{мп}p(T_{я\Sigma}p + 1)} \cdot c} = \frac{1}{cT_{мп}p(T_{я\Sigma}p + 1) + c}.$$

$$3) W_{5,7} = T_{33T} p \cdot \frac{c T_M p}{R_{\Sigma}} = \frac{c T_{33T} T_M p^2}{R_{\Sigma}}.$$

$$4) W_{1,2,3,4} = \frac{k_{\Sigma}}{T_{\Pi} p + 1} \cdot \frac{1}{c T_M p (T_{\Sigma} p + 1) + c} = \frac{k_{\Sigma}}{[c T_M p (T_{\Sigma} p + 1) + c] (T_{\Pi} p + 1)}.$$

$$5) W_{5,6,7} = \frac{c T_{33T} \cdot T_M p^2}{R_{\Sigma}} + k_{33\Pi}.$$

$$6) W_1(p) = \frac{\omega_d(p)}{U_3(p)} = \frac{\frac{k_{\Sigma}}{[c T_M p (T_{\Sigma} p + 1) + c] (T_{\Pi} p + 1)}}{1 + \frac{k_{\Sigma}}{[c T_M p (T_{\Sigma} p + 1) + c] (T_{\Pi} p + 1)} \cdot \left[\frac{c T_{33T} \cdot T_M p^2}{R_{\Sigma}} + k_{33\Pi} \right]}.$$

Після перетвореньіспрощеньотримаємо:

$$W_1(p) = \frac{\omega_d(p)}{U_3(p)} = \frac{k_{\Sigma}}{c \left[T_M T_{\Sigma} T_{\Pi} p^3 + \left(T_M T_{\Pi} + T_M T_{\Sigma} + \frac{k_{\Sigma} T_{33T} T_M}{R_{\Sigma}} \right) p^2 + (T_{\Pi} + T_M) p + 1 + \frac{k_{33\Pi} k_{\Sigma}}{c} \right]}.$$

Позначимо $1/\tilde{n} = k_{\tilde{a}}$, тоді передатна функція набуває виду:

$$W_1(p) = \frac{\omega_d(p)}{U_3(p)} = \frac{k_{\Sigma} k_d}{T_M T_{\Sigma} T_{\Pi} p^3 + \left(T_{\Pi} T_M + T_M T_{\Sigma} + \frac{k_{\Sigma} T_M T_{33T}}{R_{\Sigma}} \right) p^2 + (T_{\Pi} + T_M) p + 1 + k_{33\Pi} k_{\Sigma} k_d}.$$

2. Передавальна функція для швидкості по збурюючій дії. $U_{\varphi} = 0$

$$W_2(p) = \frac{\omega_d(p)}{I_{\text{ст}}(p)}. \quad (2.57)$$

Звертаючись до схеми рис. 2.6, перемкнемо 33 з точки c в т. d . Отримаємо схему, показану на рис. 2.8

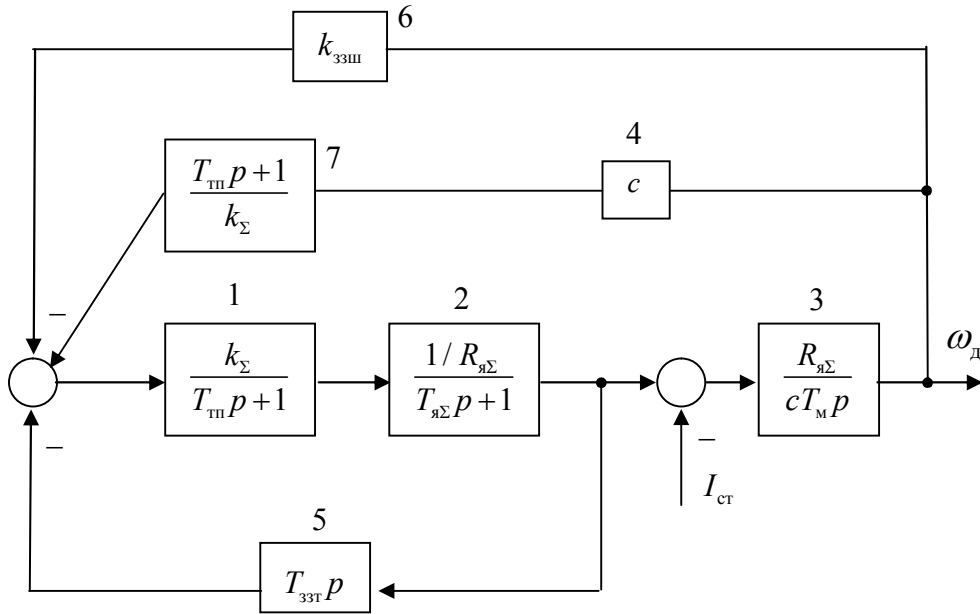


Рисунок 2.8 – Алгоритмічна схема для отримання передавальної

$$\text{функції } W_2(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)}$$

$$1) W_{4,7} = \frac{c(T_{\text{тп}}p + 1)}{k_{\Sigma}}.$$

$$2) W_{4,6,7} = \frac{c(T_{\text{тп}}p + 1)}{k_{\Sigma}} + k_{\text{з3ш}}.$$

$$3) W_{1-2} = \frac{k_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p + 1)(T_{\text{я}\Sigma}p + 1)}.$$

$$4) W_{1-2-5} = \frac{\frac{k_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p + 1)(T_{\text{я}\Sigma}p + 1)}}{1 + \frac{k_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p + 1)(T_{\text{я}\Sigma}p + 1)} \cdot T_{\text{з3т}}p} = \frac{k_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p + 1)(T_{\text{я}\Sigma}p + 1) + k_{\Sigma} T_{\text{з3т}}p / R_{\text{я}\Sigma}}$$

$$5) W_{1,2,5,4,6,7} = \frac{c(T_{\text{тп}}p + 1) + k_{\text{з3ш}} k_{\Sigma}}{k_{\Sigma}} \cdot \frac{k_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p + 1)(T_{\text{я}\Sigma}p + 1) + k_{\Sigma} T_{\text{з3т}}p / R_{\text{я}\Sigma}} =$$

$$= \frac{[c(T_{\text{тп}}p + 1) + k_{\text{ззш}}k_{\Sigma}] / R_{\text{я}\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p + 1)(T_{\text{я}\Sigma}p + 1) + k_{\Sigma}T_{\text{ззт}}p / R_{\text{я}\Sigma}}.$$

$$\begin{aligned} 6) \quad W_2(p) &= \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)} = \frac{\frac{R_{\text{я}\Sigma}}{cT_{\text{м}}p}}{1 + \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{cT_{\text{м}}p} \cdot \frac{[c(T_{\text{тп}}p + 1) + k_{\text{ззш}}k_{\Sigma}] / R_{\text{я}\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p + 1)(T_{\text{я}\Sigma}p + 1) + k_{\Sigma}T_{\text{ззт}}p / R_{\text{я}\Sigma}}} = \\ &= \frac{[T_{\text{тп}}T_{\text{я}\Sigma}p^2 + (T_{\text{тп}} + T_{\text{я}\Sigma} + k_{\Sigma}T_{\text{ззт}} / R_{\text{я}\Sigma})p + 1]R_{\text{я}\Sigma}k_{\text{д}}}{T_{\text{м}}T_{\text{я}\Sigma}T_{\text{тп}}p^3 + \left(T_{\text{тп}}T_{\text{м}} + T_{\text{м}}T_{\text{я}\Sigma} + \frac{k_{\Sigma}T_{\text{м}}T_{\text{ззт}}}{R_{\text{я}\Sigma}}\right)p^2 + (T_{\text{тп}} + T_{\text{м}})p + 1 + k_{\text{ззш}}k_{\Sigma}k_{\text{д}}} \end{aligned}$$

3 Передавальна функція для струму якоря по задаючій дії $I_{\text{ст}} = 0$.

$$W_3(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{U_3(p)}. \quad (2.58)$$

Користуючись початковою схемою (рис. 2.6) перенесемо сигнал з т. $\dot{a}$ в т. b , отримаємо схему рис. 2.9:

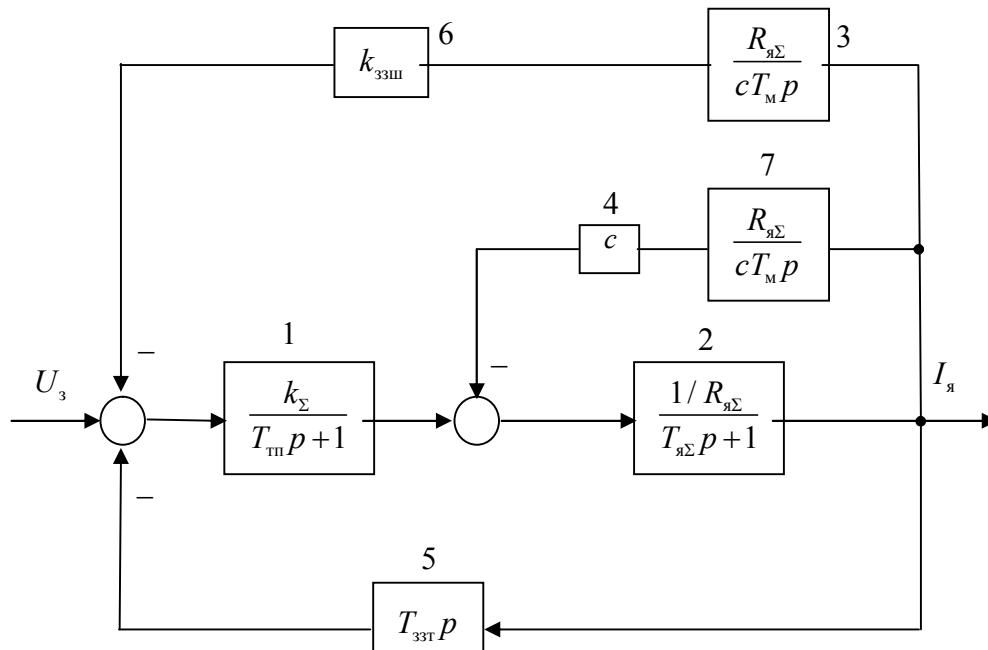


Рисунок 2.9 – Алгоритмічна схема для отримання передавальної

$$\text{функції } W_3(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{U_3(p)}$$

$$1) W_{4,7} = \frac{R_{я\Sigma}}{cT_{\text{м}}p} \cdot c = \frac{R_{я\Sigma}}{T_{\text{м}}p}.$$

$$2) W_{6,3} = \frac{k_{33\text{ш}} R_{я\Sigma}}{cT_{\text{м}}p}.$$

$$3) W_{2-4-7} = \frac{\frac{1/R_{я\Sigma}}{T_{я\Sigma}p+1}}{1 + \frac{1/R_{я\Sigma}}{T_{я\Sigma}p+1} \cdot \frac{R_{я\Sigma}}{T_{\text{м}}p}} = \frac{T_{\text{м}}p / R_{я\Sigma}}{T_{\text{м}}p(T_{я\Sigma}p+1)+1}.$$

$$4) W_{3,6,5} = \frac{k_{33\text{ш}} R_{я\Sigma}}{cT_{\text{м}}p} + T_{33\text{т}}p.$$

$$5) W_{1,2,4,7} = \frac{k_{\Sigma} T_{\text{м}}p / R_{я\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p+1)[T_{\text{м}}p(T_{я\Sigma}p+1)+1]}.$$

$$6) W_3(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{U_3(p)} = \frac{\frac{k_{\Sigma} T_{\text{м}}p / R_{я\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p+1)[T_{\text{м}}p(T_{я\Sigma}p+1)+1]}}{1 + \frac{k_{\Sigma} T_{\text{м}}p / R_{я\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p+1)[T_{\text{м}}p(T_{я\Sigma}p+1)+1]} \cdot \left[\frac{k_{33\text{ш}} R_{я\Sigma}}{cT_{\text{м}}p} + T_{33\text{т}}p \right]}$$

$$= \frac{k_{\Sigma} T_{\text{м}}p / R_{я\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p+1)[T_{\text{м}}p(T_{я\Sigma}p+1)+1]cT_{\text{м}}p + \left[\frac{k_{\Sigma} k_{33\text{ш}}}{c} + \frac{k_{\Sigma} T_{\text{м}} T_{33\text{т}} p^2}{R_{я\Sigma}} \right]} =$$

$$= \frac{k_{\Sigma} T_{\text{м}}p / R_{я\Sigma}}{T_{\text{м}} T_{я\Sigma} T_{\text{тп}} p^3 + \left(T_{\text{тп}} T_{\text{м}} + T_{\text{м}} T_{я\Sigma} + \frac{k_{\Sigma} T_{\text{м}} T_{33\text{т}}}{R_{я\Sigma}} \right) p^2 + (T_{\text{тп}} + T_{\text{м}})p + 1 + k_{33\text{ш}} k_{\Sigma} k_{\text{д}}}.$$

4 Передавальна функція для току якоря по збурюючій дії $U_3 = 0$.

$$W_4(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)}. \quad (2.59)$$

Перетворимо початкову схему (рис 2.6) – перемкнемо сигнал з т.с в т.д, отримаємо схему, показану на рис. 2.10.

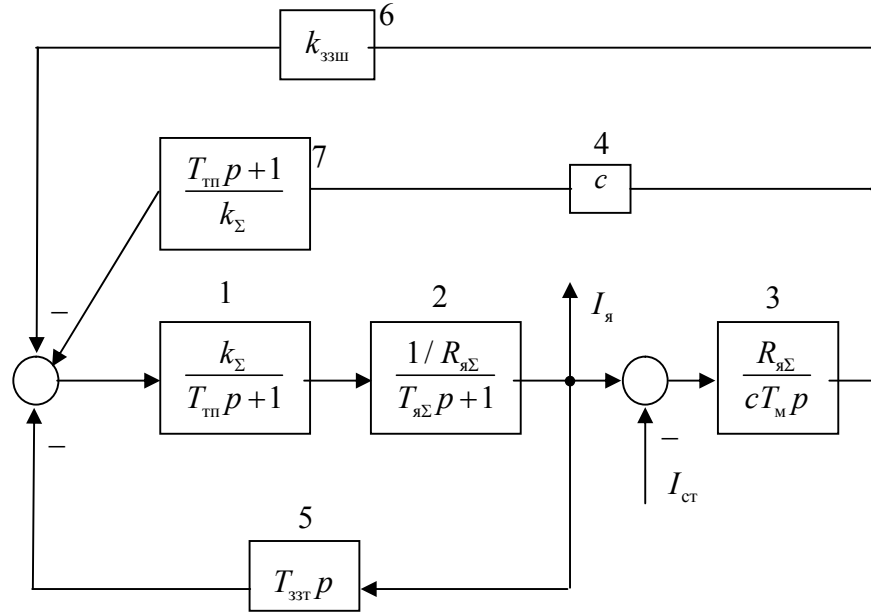


Рисунок 2.10 – Алгоритмічна схема для отримання передавальної

$$\text{функції } W_4(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)}$$

$$1) W_{4,7} = \frac{c(T_{\text{тп}} p + 1)}{k_{\Sigma}}.$$

$$2) W_{4,7,6} = \frac{c(T_{\text{тп}} p + 1)}{k_{\Sigma}} + k_{33ш}.$$

$$3) W_{1,2,5} = \frac{\frac{k_{\Sigma}}{T_{\text{тп}} p + 1} \cdot \frac{1 / R_{\text{я}\Sigma}}{T_{\text{я}\Sigma} p + 1}}{1 + \frac{k_{\Sigma}}{T_{\text{тп}} p + 1} \cdot \frac{1 / R_{\text{я}\Sigma}}{T_{\text{я}\Sigma} p + 1} \cdot T_{33T} p} = \frac{k_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}}{(T_{\text{тп}} p + 1)(T_{\text{я}\Sigma} p + 1) + T_{33T} p k_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}}$$

$$\begin{aligned}
4) \quad W_{1,2,5,4,7,6,3} &= \left[\frac{c(T_{\text{тп}}p+1)}{k_{\Sigma}} + k_{33\text{ш}} \right] \cdot \frac{k_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}}{(T_{\text{тп}}p+1)(T_{\text{я}\Sigma}p+1) + T_{33\text{т}}pk_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}} \cdot \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{cT_{\text{м}}p} = \\
&= \frac{T_{\text{тп}}p+1 + k_{\Sigma}k_{33\text{ш}}k_{\text{д}}}{T_{\text{м}}p[(T_{\text{тп}}p+1)(T_{\text{я}\Sigma}p+1) + T_{33\text{т}}pk_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}]} \\
W_4(p) &= \frac{I_{\text{я}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)} = \frac{\frac{T_{\text{тп}}p+1 + k_{\Sigma}k_{33\text{ш}}k_{\text{д}}}{T_{\text{м}}p[(T_{\text{тп}}p+1)(T_{\text{я}\Sigma}p+1) + T_{33\text{т}}pk_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}]} }{1 + \frac{T_{\text{тп}}p+1 + k_{\Sigma}k_{33\text{ш}}k_{\text{д}}}{T_{\text{м}}p[(T_{\text{тп}}p+1)(T_{\text{я}\Sigma}p+1) + T_{33\text{т}}pk_{\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}]} } = \\
&= \frac{T_{\text{тп}}p+1 + k_{33\text{ш}}k_{\Sigma}k_{\text{д}}}{T_{\text{м}}T_{\text{я}\Sigma}T_{\text{тп}}p^3 + \left(T_{\text{тп}}T_{\text{м}} + T_{\text{м}}T_{\text{я}\Sigma} + \frac{k_{\Sigma}T_{\text{м}}T_{33\text{т}}}{R_{\text{я}\Sigma}} \right) p^2 + (T_{\text{тп}} + T_{\text{м}})p + 1 + k_{33\text{ш}}k_{\Sigma}k_{\text{д}}}.
\end{aligned}$$

По передавальних функціях системи $W_1(p) - W_4(p)$ розраховуємо перехідні характеристики при ступінчастій задаючій і збурюючій діях. Розрахунки проводилися на ЕОМ з використанням пакету прикладних програм MATLAB. Графіки перехідних процесів показані на рис. 12 і рис. 13. Криві під номером 1 відповідають $T_{33\text{т}} = 0,005 \text{ с}$, криві 2 - $T_{33\text{т}} = 0,015 \text{ с}$, криві 3 - $T_{33\text{т}} = 0,03 \text{ с}$. Як видно з графіків, оптимальним є значення $T_{33\text{т}} = 0,005 \text{ с}$, при якому перехідні процеси мають кращі показники якості.

Для отримання графіків перехідних процесів використовувалася також модель системи, розроблена за допомогою пакету MATLAB в режимі SIMULINK. Сама модель показана на рисунках 2.11. Графіки, побудовані за допомогою моделі, повністю співпадають з графіками, отриманими по передавальних функціях, що свідчить про правильність отриманих результатів.

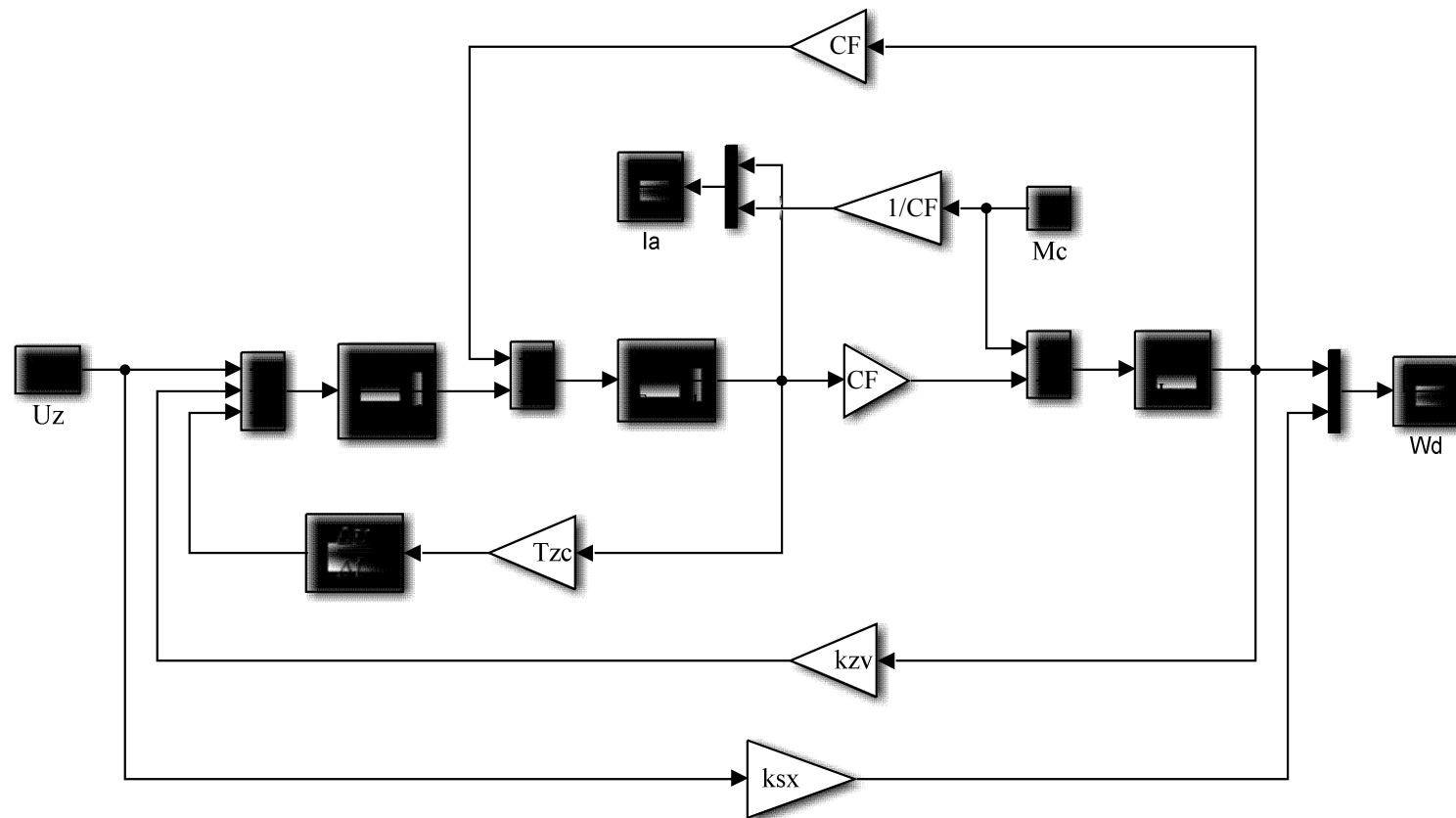


Рисунок 2.11 – Схема моделі системи, розроблена на ЕОМ

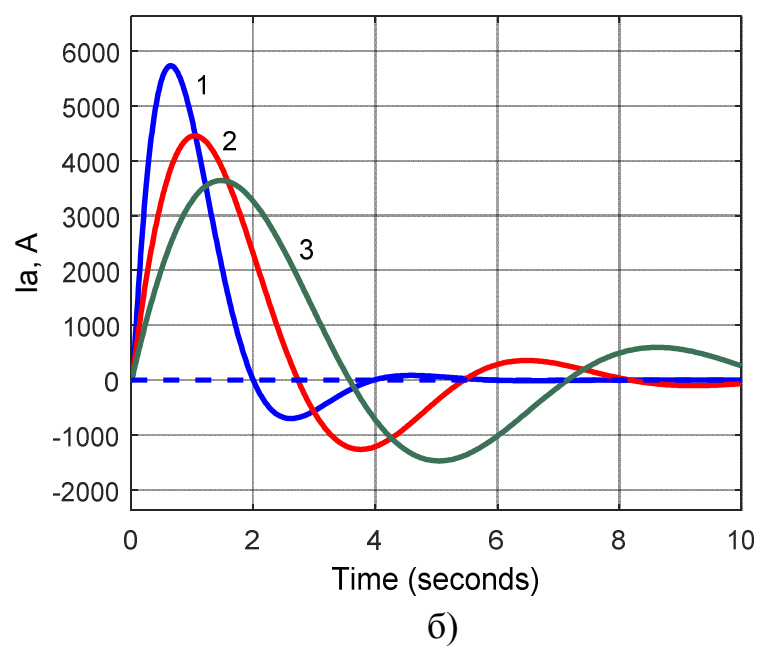
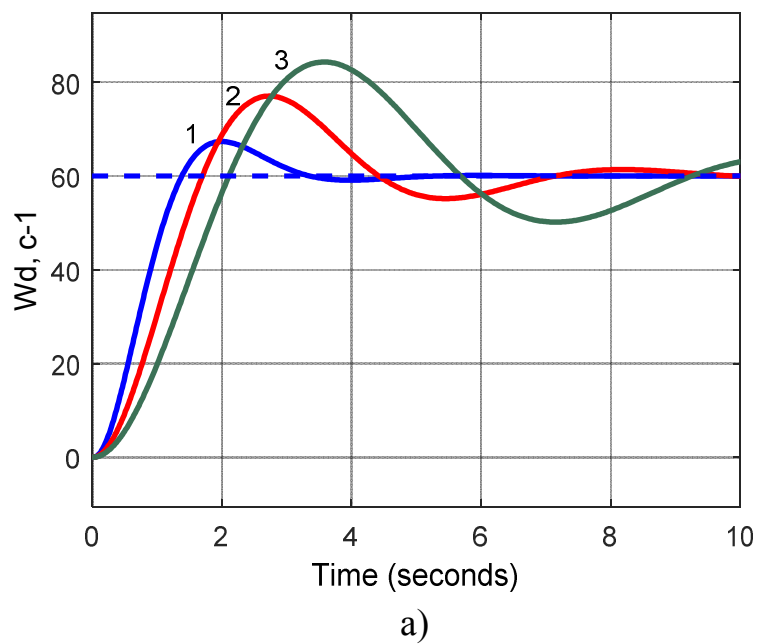


Рисунок 2.12– Графіки перехідних процесів швидкості а) і струму б)

по задаючій дії:

$$1 - T_{33T} = 0,005 \text{ c}; \quad 2 - T_{33T} = 0,015 \text{ c}; \quad 3 - T_{33T} = 0,03 \text{ c}$$

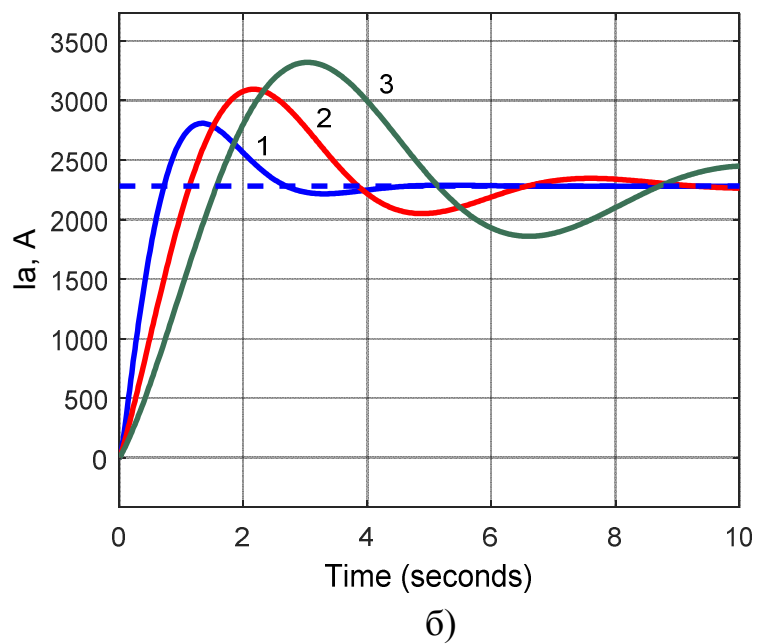
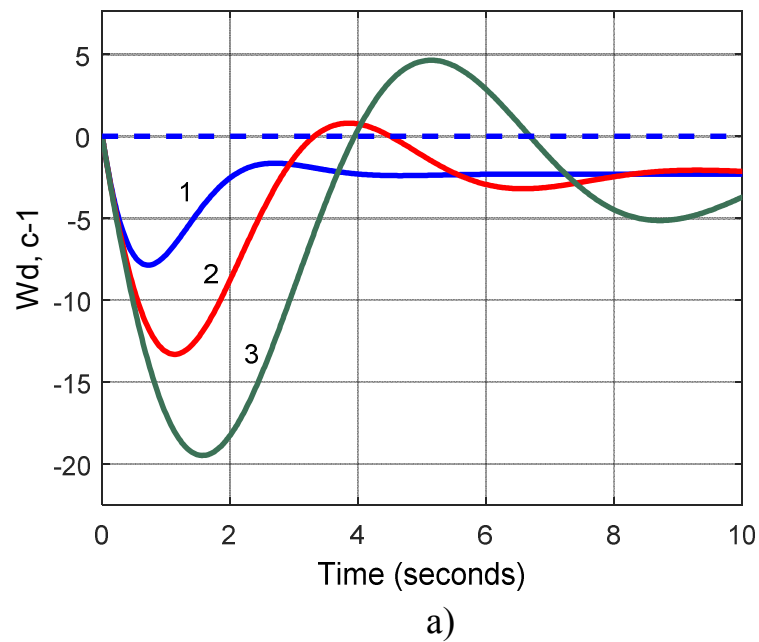


Рисунок 2.13 – Графіки перехідних процесів швидкості а) і струму б)
по збурюючій дії:

$$1 - T_{33T} = 0,005 \text{ c}; \quad 2 - T_{33T} = 0,015 \text{ c}; \quad 3 - T_{33T} = 0,03 \text{ c}$$

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Виконано вибір електродвигуна і основного електроустаткування силового ланцюга електроприводу.
2. Виконано розрахунок параметрів силового ланцюга електроприводу, що використовуються при розрахунку системи автоматичного управління.
3. Проведено вибір структури системи автоматичного управління. До електроприводів більшості основних механізмів роторних екскаваторів пред'являються підвищені вимоги відносно жорсткості робочої частини механічної характеристики і обмеження максимального значення моменту, що розвивається.. Згідно рекомендацій [42] вибрано систему із зворотним зв'язком за швидкістю, гнучким зворотним зв'язком по струму і зворотним зв'язком по струму з відсіченням.
4. Проведений розрахунок статичних характеристик розімкненої і замкненої системи. Складено алгоритмічну схему системи та визначені передавальні функції системи по задаючій і збурюючій діях.
5. Проведено моделювання синтезованої системи на ЕОМ з використанням пакету прокладних програм MATLAB. В режимі SIMULINK системи MATLAB розроблена схема моделі системи, що дозволяє виконати дослідження динамічних характеристик системи. Шляхом моделювання визначено значення постійної часу зворотного зв'язку по струму, при якій перехідні процеси змінних стану системи мають задовільні показники якості.

РОЗДІЛ 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Математична модель двомасової системи

При синтезі і дослідженні системи управління електроприводом роторного колеса екскаватора механічна частина електроприводу представлялася жорсткою приведеною ланкою, що не враховує пружних властивостей системи ротор-стріла-підвіска стріли. Прикладення до реальної системи управляючої дії (моменту двигуна) або збурюючої дії (навантаження), викликають коливання в'язаних мас, що збільшує максимальні навантаження зв'язків і ускладнює точність відпрацювання необхідних рухів робочого органу машини.

Якщо виділити основні маси, які визначають рух системи, і найменші жорсткості зв'язків між ними, то кінематична схема механізму обертання роторного колеса може бути приведена до двомасової системи (рис. 3.1).

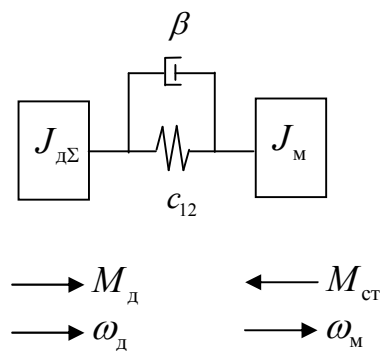


Рисунок 3.1 – Двомасова розрахункова схема

Параметрами двомасової системи є сумарний момент інерції якоря двигуна і жорстко пов'язаних з ним елементів $J_{дΣ}$, сумарний приведений до швидкості двигуна момент інерції роторного колеса (механізму) $J_{м}$ і безінерційний пружний зв'язок між ними, що характеризується приведеною еквівалентною жорсткістю c_{12} і коефіцієнтом внутрішнього в'язкого тертя між масами $β$.

Якщо привести всі рухомі маси і жорсткості електроприводу механізму обертання колеса роторного екскаватора до кутової швидкості двигуна, то для двомасової системи отримаємо наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} J_{\text{м}} \frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} = M_{\Sigma} - M_{\text{ст}}; \\ \frac{dM_{\text{пр}}}{dt} = c_{12}(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{м}}); \\ J_{\text{д}\Sigma} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = k\Phi_{\text{н}} I_{\text{я}} - M_{\Sigma}, \end{cases} \quad (3.1)$$

де M_{Σ} сумарний момент, що передається пружною передачею, який рівний сумі пружного моменту $M_{\text{пр}}$ і моменту в'язкого тертя $M_{\text{вт}} = \beta(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{м}})$;

$$M_{\Sigma} = M_{\text{пр}} + \beta(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{м}}), \quad (3.2)$$

β – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя між масами;

$\omega_{\text{д}}$, $\omega_{\text{м}}$ - кутова швидкість двигуна і механізму відповідно;

$M_{\text{ст}}$ - момент статичного навантаження, прикладений до другої маси;

Запишемо систему (3.1) з урахуванням (3.2) у формі Коші

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} = \frac{1}{J_{\text{м}}} M_{\text{пр}} + \frac{\beta}{J_{\text{м}}} \omega_{\text{д}} - \frac{\beta}{J_{\text{м}}} \omega_{\text{м}} - \frac{1}{J_{\text{м}}} M_{\text{ст}}; \\ \frac{dM_{\text{пр}}}{dt} = c_{12} \omega_{\text{д}} - c_{12} \omega_{\text{м}}; \\ \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{k\Phi_{\text{н}}}{J_{\text{д}\Sigma}} I_{\text{я}} - \frac{1}{J_{\text{д}\Sigma}} M_{\text{пр}} - \frac{\beta}{J_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{д}} + \frac{\beta}{J_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{м}}. \end{cases} \quad (3.3)$$

Диференціальні рівняння, що описують електромеханічні процеси в розробленій в попередніх розділах одномасовій системі мають наступну форму

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{м}} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{c} (I_{\text{я}} - I_{\text{ст}}); \\ T_{\text{я}\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + I_{\text{я}} = \frac{1}{R_{\text{я}\Sigma}} (E_{\Gamma} - c\omega_{\text{д}}); \\ T_{\Gamma} \frac{dE_{\Gamma}}{dt} + E_{\Gamma} = k_{\Sigma} U_3 - k_{33\text{ш}} k_{\Sigma} \omega_{\text{д}} - k_{\Sigma} U_{\Gamma 33\Gamma}; \\ T_{33\Gamma} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = U_{\Gamma 33\Gamma}. \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Запишемо систему (3.4) у формі Коші, враховуючи, що $I_{\text{ст}} = M_{\text{ст}}/c$, $T_{\text{м}} = J_{\text{д}\Sigma} \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{(k\Phi_{\text{н}})^2} = J_{\text{д}\Sigma} \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{c^2}$. Об'єднаємо системи (3.3) і (3.4) і проведемо деякі нескладні перетворення. Отримаємо наступну систему рівнянь стану двомасової системи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = +\frac{\beta}{J_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{м}} - \frac{1}{J_{\text{д}\Sigma}} M_{\text{пр}} - \frac{\beta}{J_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{д}} + \frac{c}{J_{\text{д}\Sigma}} I_{\text{я}}; \\ \frac{dM_{\text{пр}}}{dt} = -c_{12} \omega_{\text{м}} + c_{12} \omega_{\text{д}}; \\ \frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} = -\frac{\beta}{J_{\text{м}}} \omega_{\text{м}} + \frac{1}{J_{\text{м}}} M_{\text{пр}} + \frac{\beta}{J_{\text{м}}} \omega_{\text{д}} - \frac{1}{J_{\text{м}}} M_{\text{ст}}; \\ \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = -\frac{c}{T_{\text{я}\Sigma} R_{\text{я}\Sigma}} \omega_{\text{д}} - \frac{1}{T_{\text{я}\Sigma}} I_{\text{я}} + \frac{1}{T_{\text{я}\Sigma} R_{\text{я}\Sigma}} E_{\Gamma}; \\ \frac{dE_{\Gamma}}{dt} = \left(\frac{ck_{\Sigma} T_{33\Gamma}}{T_{\text{я}\Sigma} R_{\text{я}\Sigma} T_{\Gamma}} - \frac{k_{33\text{ш}} k_{\Sigma}}{T_{\Gamma}} \right) \omega_{\text{д}} + \frac{k_{\Sigma} T_{33\Gamma}}{T_{\text{я}\Sigma} T_{\Gamma}} I_{\text{я}} + \left(-\frac{k_{\Sigma} T_{33\Gamma}}{T_{\text{я}\Sigma} R_{\text{я}\Sigma} T_{\Gamma}} - \frac{1}{T_{\Gamma}} \right) E_{\Gamma} + \frac{k_{\Sigma}}{T_{\Gamma}} U_3 \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Введемо вектор стану системи

$$\vec{X}(t) = [\omega_{\text{м}}(t); M_{\text{пр}}(t); \omega_{\text{д}}(t); I_{\text{я}}(t); E_{\Gamma}(t)]^T \quad (3.6)$$

і вектор зовнішніх дій

$$\vec{U}(t) = [U_3(t); M_{\text{ст}}(t)]^T \quad (3.7)$$

Система, записана у векторний-матричній формі і доповнена рівнянням виходу має вид:

$$\begin{cases} \dot{\vec{X}}(t) = \mathbf{A}\vec{X}(t) + \mathbf{B}\vec{U}(t); \\ \vec{Y}(t) = \mathbf{C}\vec{X}(t), \end{cases} \quad (3.8)$$

де $\mathbf{A}$ - матриця стану системи;

$\mathbf{B}$ - матриця управління;

$\mathbf{C}$ - матриця виходу;

$\vec{Y}(t)$ - вектор виходу.

Матриці стану $\mathbf{A}$ і управління $\mathbf{B}$ мають структуру:

$$\mathbf{A} = \begin{array}{ccccc} \omega_{\text{м}} & M_{\text{пр}} & \omega_{\text{д}} & I_{\text{я}} & E_{\text{г}} \\ \hline -\frac{\beta}{J_{\text{м}}} & \frac{1}{J_{\text{м}}} & \frac{\beta}{J_{\text{м}}} & 0 & 0 \\ -c_{12} & 0 & c_{12} & 0 & 0 \\ \frac{\beta}{J_{\text{м}}} & -\frac{1}{J_{\text{м}}} & -\frac{\beta}{J_{\text{м}}} & \frac{c}{J_{\text{м}}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{c}{T_{\text{я}\Sigma}R_{\text{я}\Sigma}} & -\frac{1}{T_{\text{я}\Sigma}} & \frac{1}{T_{\text{я}\Sigma}R_{\text{я}\Sigma}} \\ 0 & 0 & \frac{ck_{\Sigma}T_{33\Gamma}}{T_{\text{я}\Sigma}R_{\text{я}\Sigma}T_{\Gamma}} - \frac{k_{33\text{ш}}k_{\Sigma}}{T_{\Gamma}} & \frac{k_{\Sigma}T_{33\Gamma}}{T_{\text{я}\Sigma}T_{\Gamma}} & \frac{-k_{\Sigma}T_{33\Gamma}}{T_{\text{я}\Sigma}R_{\text{я}\Sigma}T_{\Gamma}} - \frac{1}{T_{\Gamma}} \end{array} \quad \mathbf{B} = \begin{array}{cc} U_3 & M_{\text{ст}} \\ \hline 0 & -\frac{1}{J_{\text{м}}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_{\Sigma}}{T_{\Gamma}} & 0 \end{array}$$

Алгоритмічна схема двомасової системи показана на рис.3.2.

3.2 Розрахунок перехідних процесів двомасової системи

Використовуючи математичну модель системи у вигляді рівнянь стану були проведені розрахунки перехідних процесів по задаючій і збурюючій діях. Текст файлу, що містить початкові дані, матриці A , B , C приведений в додатку Д. Дослідження проводилися також за допомогою схеми моделі системи, приведеної на рис. 3.3. Всі розрахунки виконувалися на ЕОМ за допомогою пакету прикладних програм MATLAB.

Графіки перехідних процесів показані на рисунках 3.4 – 3.7. На рисунках приведені перші чотири змінні стани системи. Як видно з графіків, мають місце значні коливання основних координат системи, що несприятливо позначається на роботі механізму.

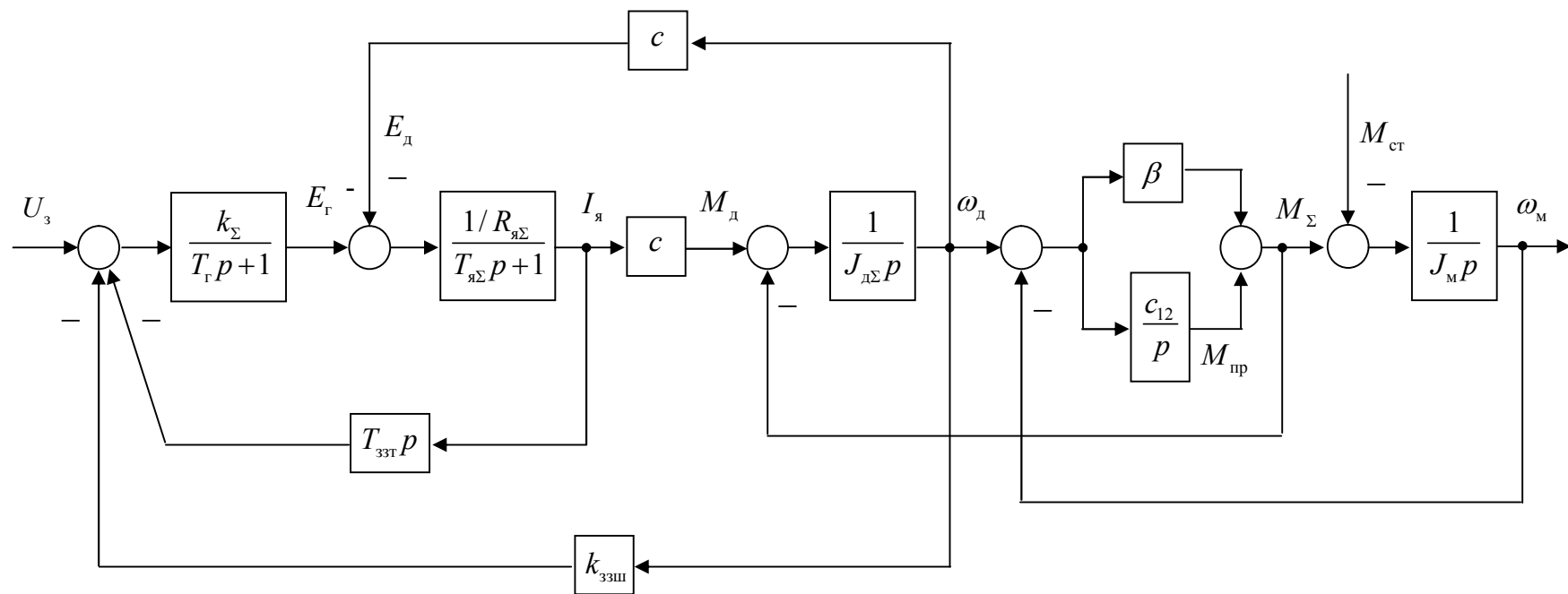


Рисунок 3.2 - Алгоритмічна схема двомасової системи.

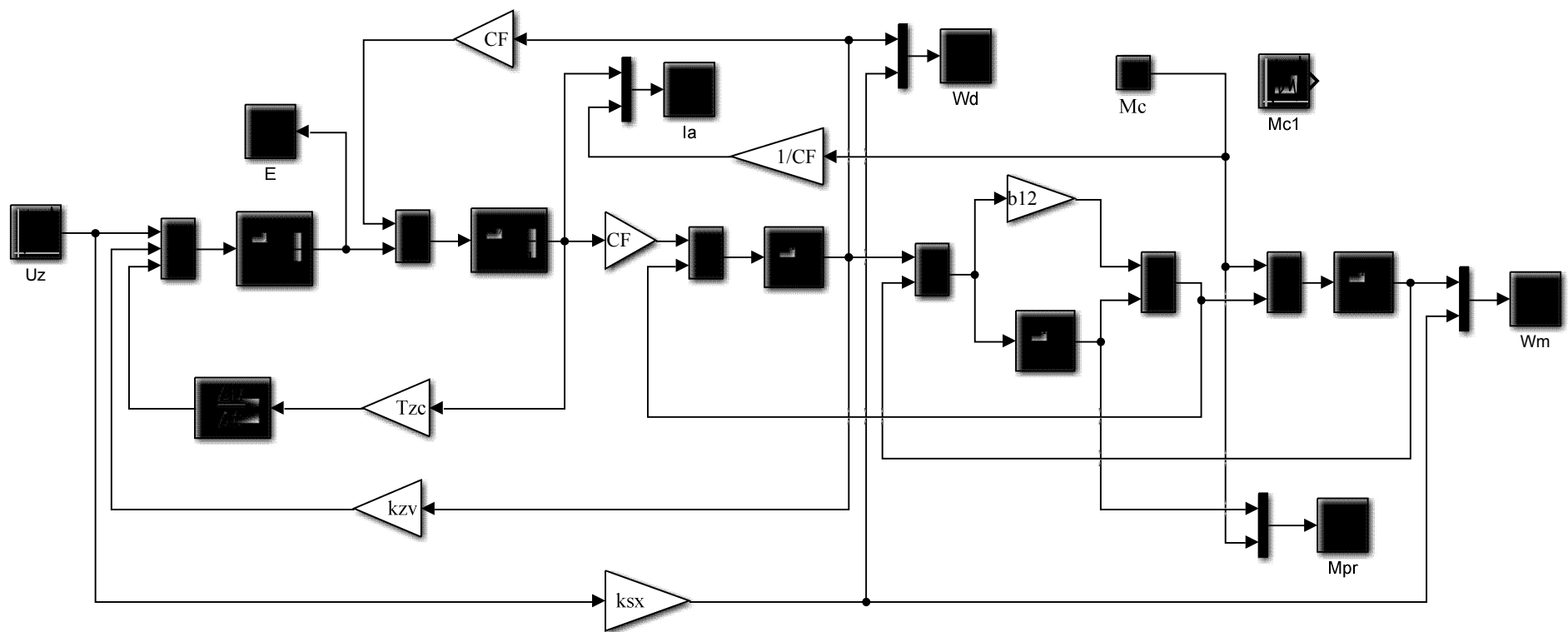
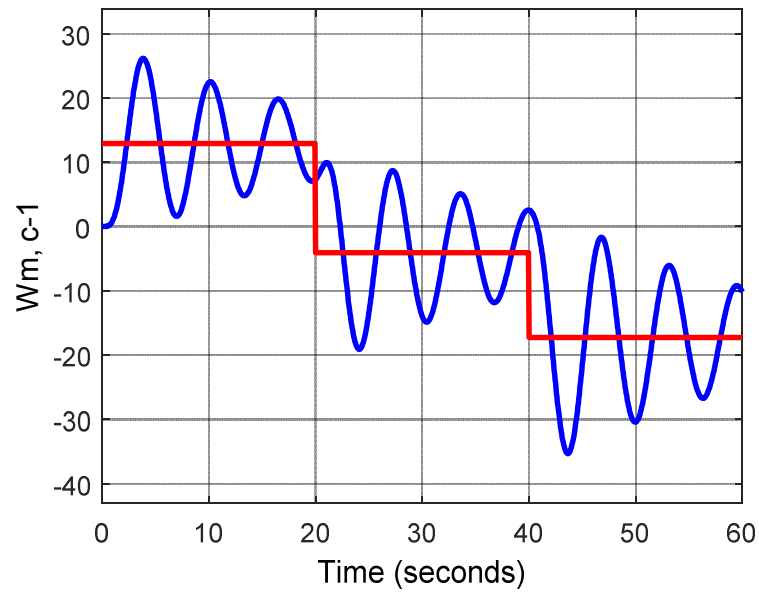
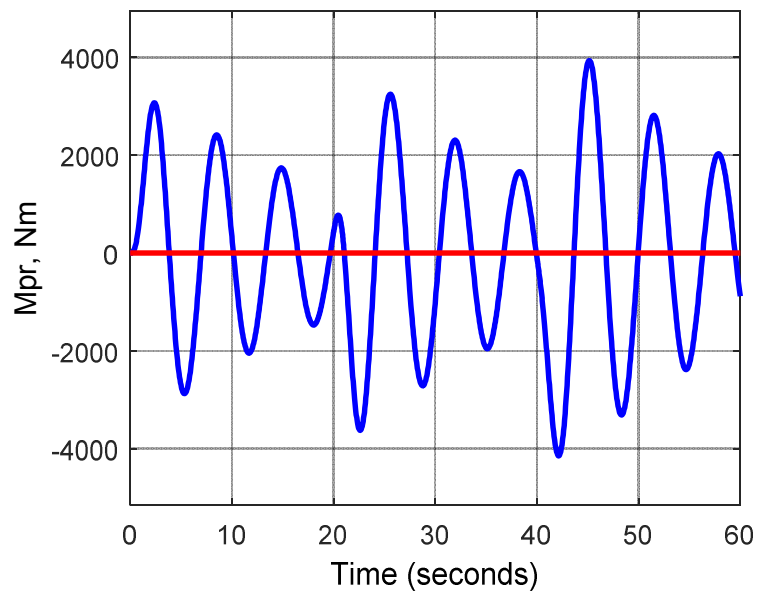


Рисунок 3.3 - Схема моделі двомасової системи, розроблена на EOM



a)



б)

Рисунок 3.4 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{\text{пр}} = f(t)$ (б) двомасової системи по задаючій дії

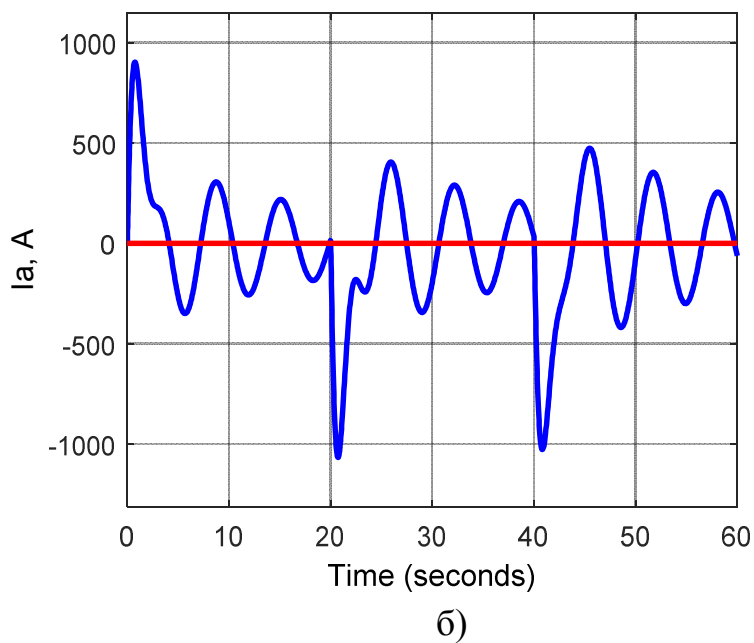
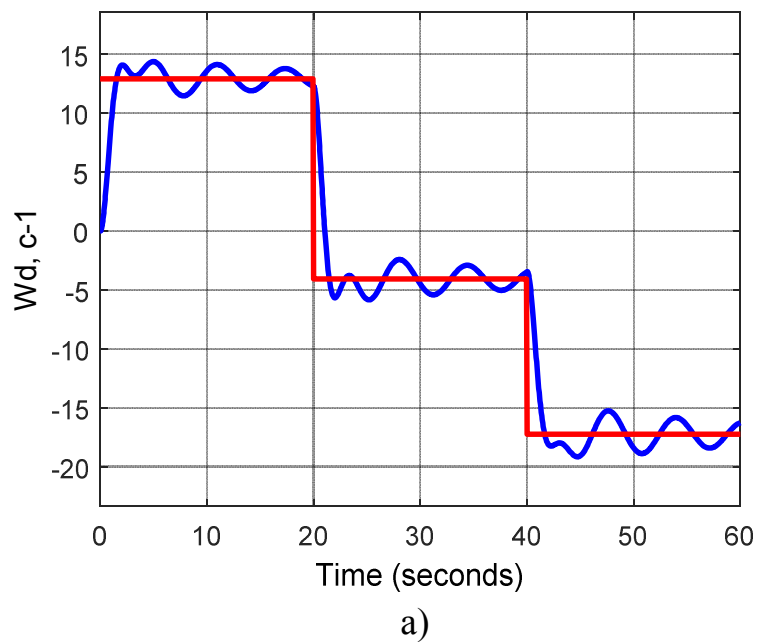
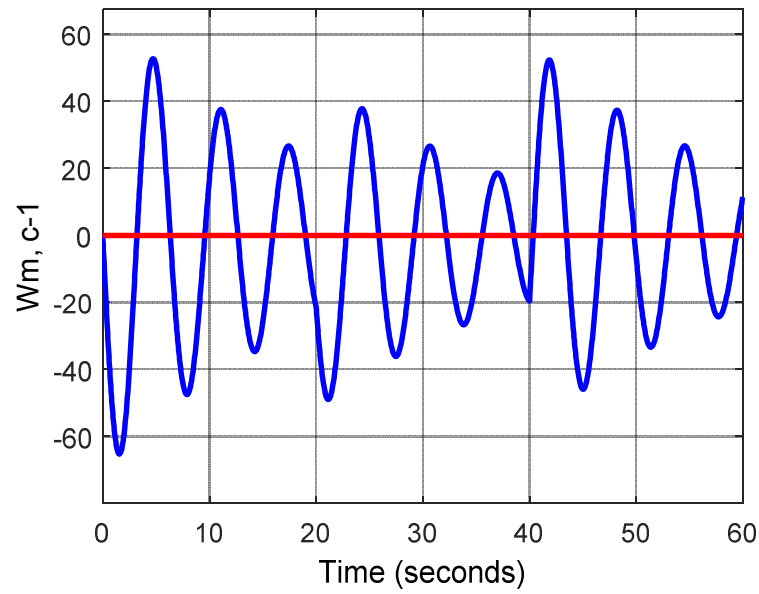
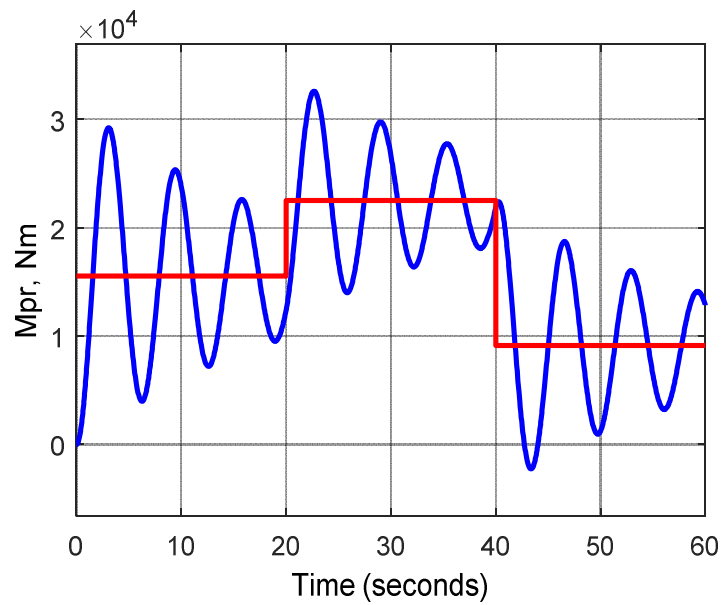


Рисунок 3.5 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і струму двигуна $I_a = f(t)$ (б) двомасової системи по задаючій дії

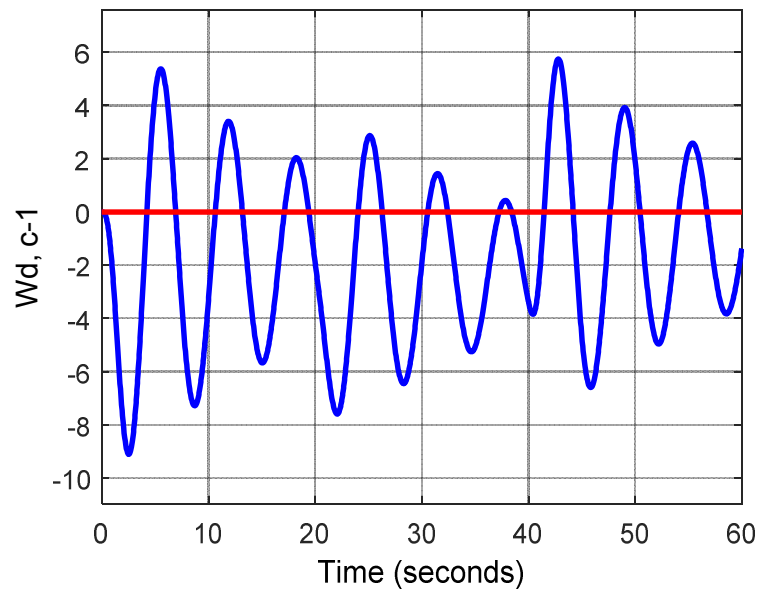


a)

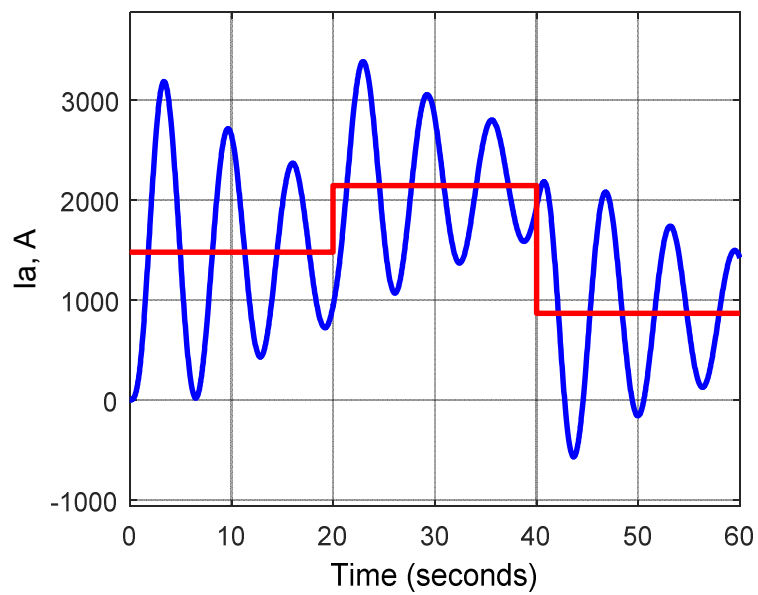


б)

Рисунок 3.6 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{пр} = f(t)$ (б) двомасової системи по збурюючій дії



a)



б)

Рисунок 3.7 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і струму двигуна $I_a = f(t)$ (б) двомасової системи по збурюючій дії

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Проведено аналіз роботи механізму обертання колеса роторного екскаватора за наявності пружних властивостей системи ротор-стріла- підвіска стріли, жорсткості породи і т.п. При несприятливих поєднаннях швидкостей роторного колеса і зазначених факторів можуть виникати резонансні коливання металоконструкцій, що несприятливо впливає на роботу механізму. Показано, що кінематична схема механічної частини системи управління механізмом обертання колеса роторного екскаватора з урахуванням пружності механічних зв'язків може розглядатися як двомасова.

2. Виконано розробку математичної моделі. Отримано рівняння стану двомасової системи і рівняння стану двомасової системи у векторному – матричній формі, визначені елементи вектора стану, тобто змінні стану системи; визначений вектор зовнішніх дій, а також матриці стану **A** і управління **B**. Розроблена алгоритмічна схема двомасової системи і спрощена алгоритмічна схема двохмасової системи з оптимізованим по модульному критерію контуром струму.

3. Проведено моделювання двомасової системи на ЕОМ з використанням пакету прокладних програм MATLAB. В режимі SIMULINK системи MATLAB розроблено схему моделі двомасової системи. Як тестовий сигнал на вхід системи подавався ступінчастий сигнал з випадковою амплітудою, який знаходиться в межах від +24В до -24В, що відповідає зміні швидкості в межах номінальних значень. Аналіз результатів моделювання показав, що перехідні процеси змінних стану системи мають незадовільний (коливальний) характер.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ СИСТЕМИ З FUZZY РЕГУЛЯТОРОМ

4.1 Процес нечіткого моделювання в середовищі MATLAB

Для реалізації нечіткої моделі в середовищі MATLAB використовується Fuzzy Logic Toolbox, спеціальний пакет розширення. Цей пакет надає користувачеві можливість працювати з нечіткими моделями у двох режимах:

1. **Інтерактивний режим** дозволяє користувачеві взаємодіяти з графічними інструментами, відображаючи та редагуючи всі компоненти системи нечіткого висновку.
2. **Режим команд** дозволяє користувачеві вводити імена відповідних функцій з аргументами безпосередньо в вікно команд MATLAB.

У інтерактивному режимі можна використовувати такі графічні засоби, що входять до складу Fuzzy Logic Toolbox:

- **FIS Editor (редактор FIS)** - редагує систему нечіткого виведення.
- **Membership Function Editor (редактор функцій приналежності)** - редагує функції приналежності.
- **Rule Editor (редактор правил)** - редагує правила.
- **Rule Viewer (переглядач правил висновку)** - дозволяє переглядати правила системи нечіткого висновку.
- **Surface Viewer (переглядач поверхні висновку)** - візуалізує поверхню висновку.

Пакет Fuzzy Logic Toolbox містить також спеціальні програми:

- **Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Editor (редактор ANFIS)** - редагує адаптивні нейро-нечіткі системи.
- **Fuzzy c-Means Clustering (нечітка кластеризація за методом нечітких c-середніх)** - проводить нечітку кластеризацію.

4.2 Побудова і дослідження багатомасової системи з Fuzzy регулятором

Побудуємо нечітку модель управління двомасовою електромеханічною системою в інтерактивному режимі за допомогою графічних засобів пакету Fuzzy Logic Toolbox.

Сутність задачі полягає в тому, щоб розробити модель, що дозволяє автоматично управляти двомасовою системою, забезпечуючи задовільні показники якості функціонування системи.

Будемо оцінювати якість регулювання системи по величині миттєвої помилки регулювання $\varepsilon(t)$, тобто різниці між заданим значенням швидкості обертання механізму $\omega_3(t)$ і реальною швидкістю обертання механізму $\omega_m(t)$.

Оскільки двомасова система є інерційною, то при регулюванні слід враховувати похідну від помилки регулювання, в якості якої можна використовувати момент пружності $M_{\text{пр}}(t)$ в кінематичному ланцюзі електроприводу.

Розробку системи управління двомасовою електромеханічною системою з Fuzzy регулятором виконуємо таким чином. На входи Fuzzy регулятора подаємо помилку регулювання $\varepsilon(t)$ між заданим значенням швидкості обертання $\omega_3(t)$ і швидкістю обертання механізму $\omega_m(t)$ і момент пружності $M_{\text{пр}}(t)$ (точніше – різницю між моментом пружності $M_{\text{пр}}(t)$ і моментом статичного навантаження $M_c(t)$ тобто $M_{\text{пр}}(t) - M_c(t)$) в кінематичному ланцюзі машини. За допомогою Fuzzy регулятора формуватимемо управляючу дію $U(t)$ на динамічну систему.

Схема системи, яку побудовано в середовищі MATLAB у режимі Simulink, показана на рисунку 4.1. На рисунку 4.2 наведена структура підсистеми Subsystem, що є моделлю керованого об'єкту Fuzzy регулятора. Ця модель відображається у відповідному вікні при подвійному клацанні лівою кнопкою миші на блоку Subsystem1.

Для створення бази правил системи нечіткого висновку потрібно заздалегідь визначити входні та вихідні лінгвістичні змінні. Явно виходить, що одну з входніх лінгвістичних змінних можна використовувати помилку регулювання $\varepsilon(t)$: ε – "помилка регулювання", а у якості другої входньої лінгвістичної змінної $M_{пр}$ – "момент пружності". Як вихідна лінгвістична змінна використовується напруга на виході регулятора $U(t)$, що алгебраїчно підсумовується з напругою завдання і діє на систему управління: U – "напруга регулятора".

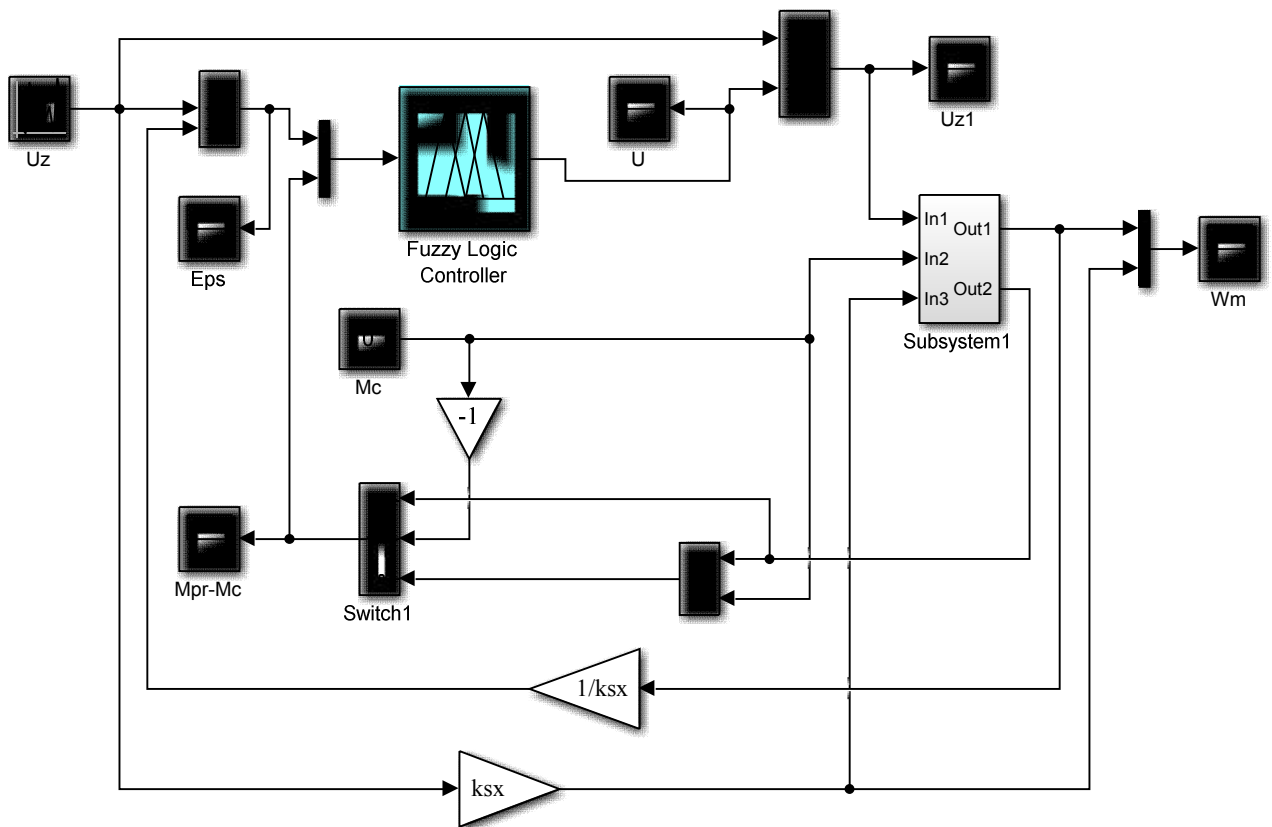


Рисунок 4.1 – Схема системи з Fuzzy регулятором

Як терм-множини всіх лінгвістичних змінних використовуватимемо множини $T_{1,2,3} = \{\text{"негативна велика"}, \text{"негативна мала"}, \text{"близька до нуля"}, \text{"позитивна мала"}, \text{"позитивна велика"}\}$. Функції належності для кожного терму кожної множини будуть подані нижче.

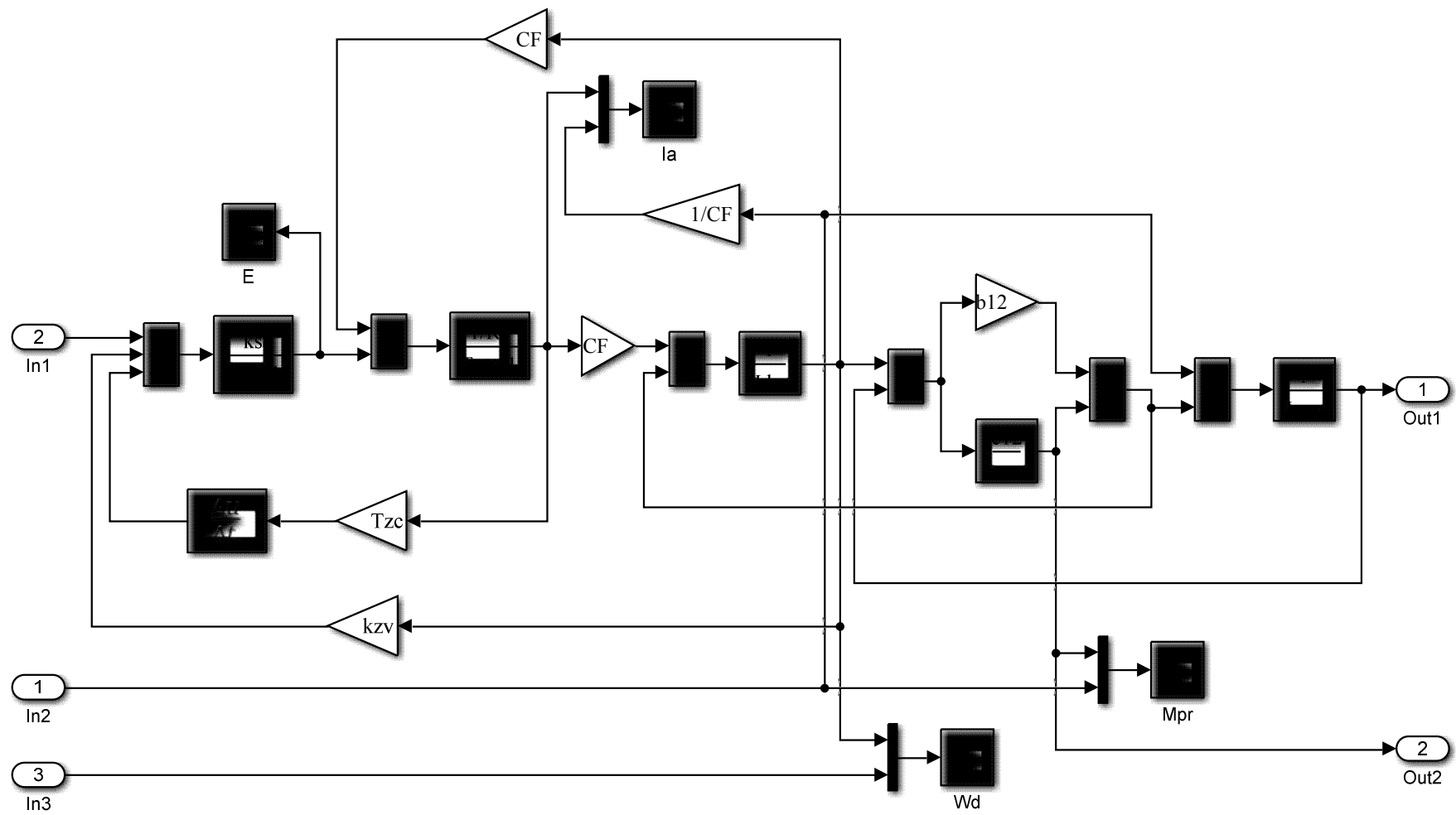


Рисунок 4.2 – Схема моделі об'єкту управління

Для спрощення запису правил ми будемо використовувати такі символічні позначення для назв окремих термів вхідних і вихідних лінгвістичних змінних: NG – негативна велика; NS – негативна мала; ZR – близька до нуля; PS – позитивна мала; PG – позитивна велика. Отже, всі лінгвістичні терм-множини можна коротко записати так: $T_{1,2,3} = \{NG, NS, ZR, PS, PG\}$.

Після аналізу експериментальних перехідних процесів під час запуску та навантаження ми сформуємо базу правил для нечітких продукцій. Оскільки ми розглядаємо дві вхідні лінгвістичні змінні, кожна з них має 5 термів, то система нечіткого висновку матиме 25 правил нечітких продукцій, описаних нижче:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПРАВИЛО_21: ЯКЩО " $\varepsilon \in PG$ " І " $M_{np} \in NG$ " ТО " $U \in PS$ "

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

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

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

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

Базу правил нечітких продукцій представимо для зручності у вигляді таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – База правил формування лінгвістичних змінних Fuzzy 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

Інформація, яка була подана, вистачить для створення нечіткої системи. Ця система матиме два входи, один вихід, двадцять п'ять правил типу "якщо... то" (відповідно до таблиці 4.2), а також по п'ять функцій приналежності для входів і виходу. Для створення цієї системи ми використаємо алгоритм виведення Mamdani.

Для запуску основного інтерфейсу програми Fuzzy Logic, яка входить до пакету Fuzzy Logic, можна скористатися командою (функцією) "Fuzzy" у командному рядку. Ця команда відкриє редактор нечіткої системи висновку (FIS-редактор). Інтерфейс редактора, який відкриється після цієї команди, зображений на рисунку 4.3.

У рядку меню редактора вміщені такі пункти:

- File – для роботи з файлами моделей (створення, збереження, читання та друк);
- Edit – для виконання операцій редагування (додавання і видалення вхідних і вихідних змінних);
- View – для доступу до додаткового інструментарію.

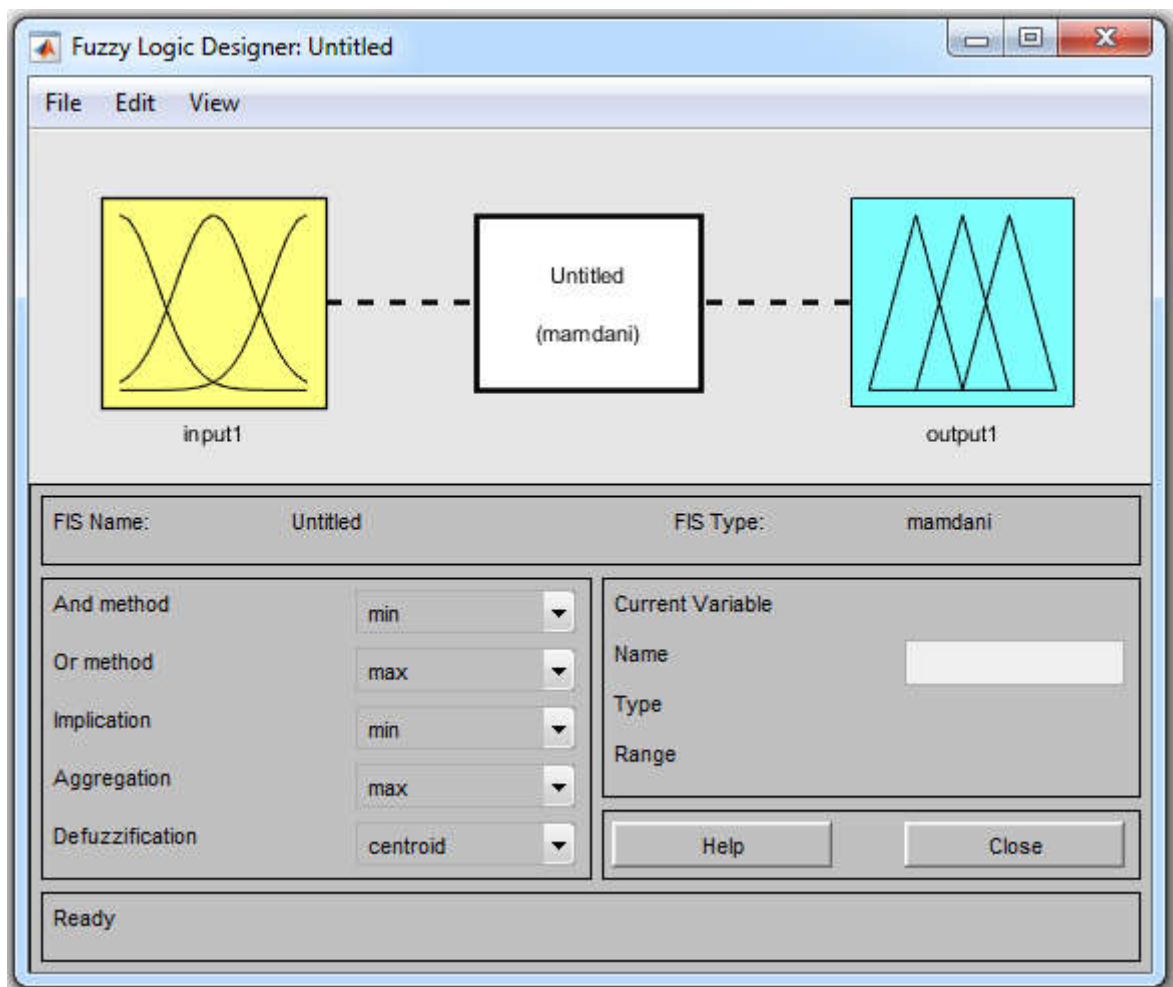


Рисунок 4.3 – Вид вікна FIS Editor

За замовчуванням, редактор пропонує використовувати алгоритм типу Mamdani (це вказано в центральному білому блоку), і в цьому випадку жодних змін не потрібно. Проте в системі мають бути два входи. Тому, через меню "Edit / Add Variable / Input", ми додаємо другий вхід (це призводить до появи другого жовтого блоку з назвою "input2" у вікні редактора). Подалі, клацнувши один раз на блоку "input1", ми змінюємо його назву на "Epsilon" (помилка регулювання $\varepsilon(t)$), завершуючи введення нової назви клавішею "Enter". Аналогічним чином, встановлюємо назву "Mpr" ($M_{np}(t)$) для блоку "input2" і "U" ($U(t)$) для вихідного блоку (праворуч зверху) "output1". Одразу ж ми також присвоюємо ім'я всій системі – "Strila" ("Стріла"), зберігаючи це через меню "File / Export / To Workspace" (Зберегти в робочому просторі). Після виконаних дій вигляд вікна редактора наведений на рис. 4.4.

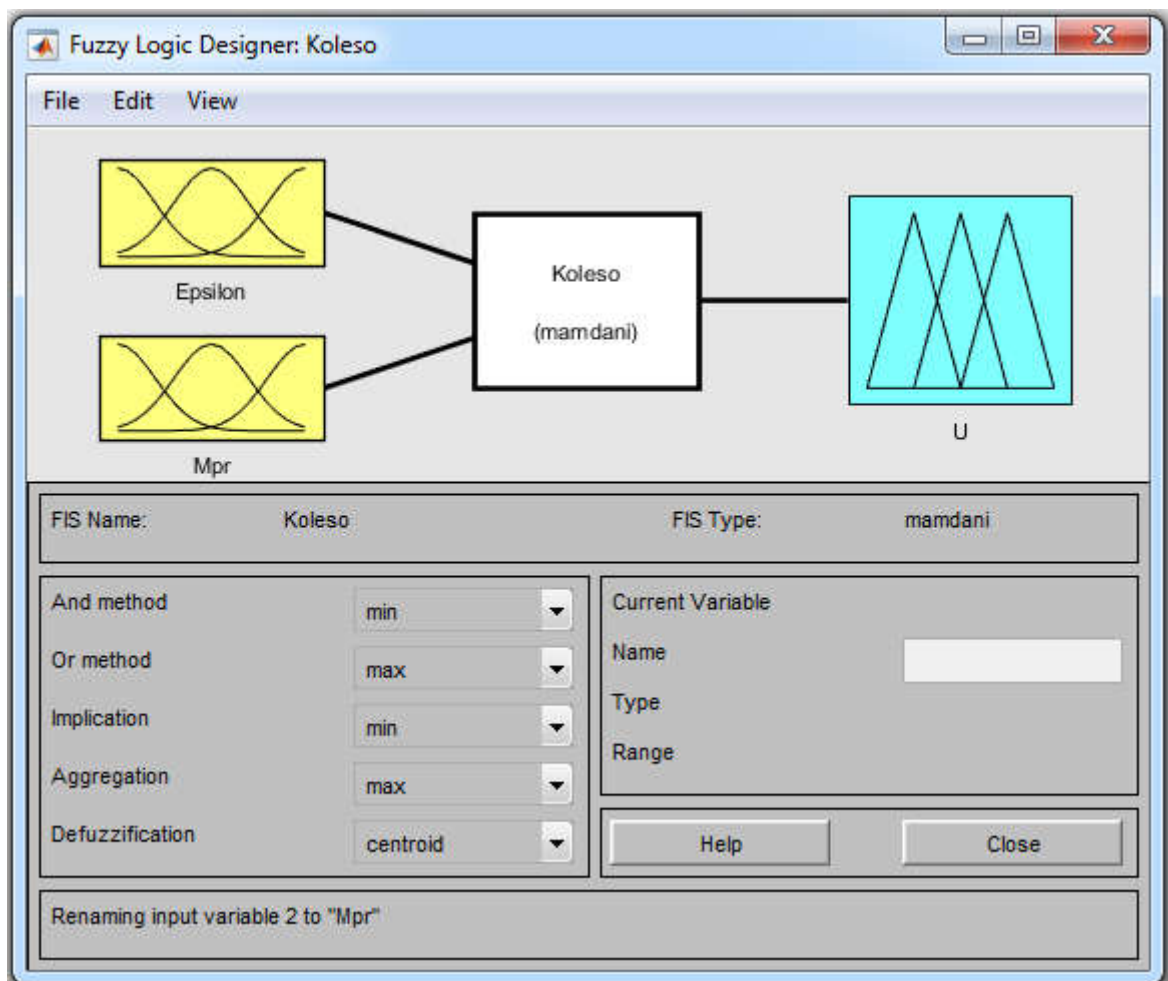


Рисунок 4.4 – Вид вікна FIS Editor після завдання структури системи

Тепер налаштуємо функції належності для змінних. Відкрити програму – редактор функцій приналежності можна одним з трьох способів:

1. Через меню Edit/Membership functions;
2. Подвійним клацанням на значку, який представляє відповідну змінну;
3. Натисненням комбінації клавіш Ctrl+2.

Обираючи будь-який з цих способів, переходимо до даної програми. Для початку налаштуємо та редагуємо функції належності для змінної "Epsilon" (рисунок 4.5).

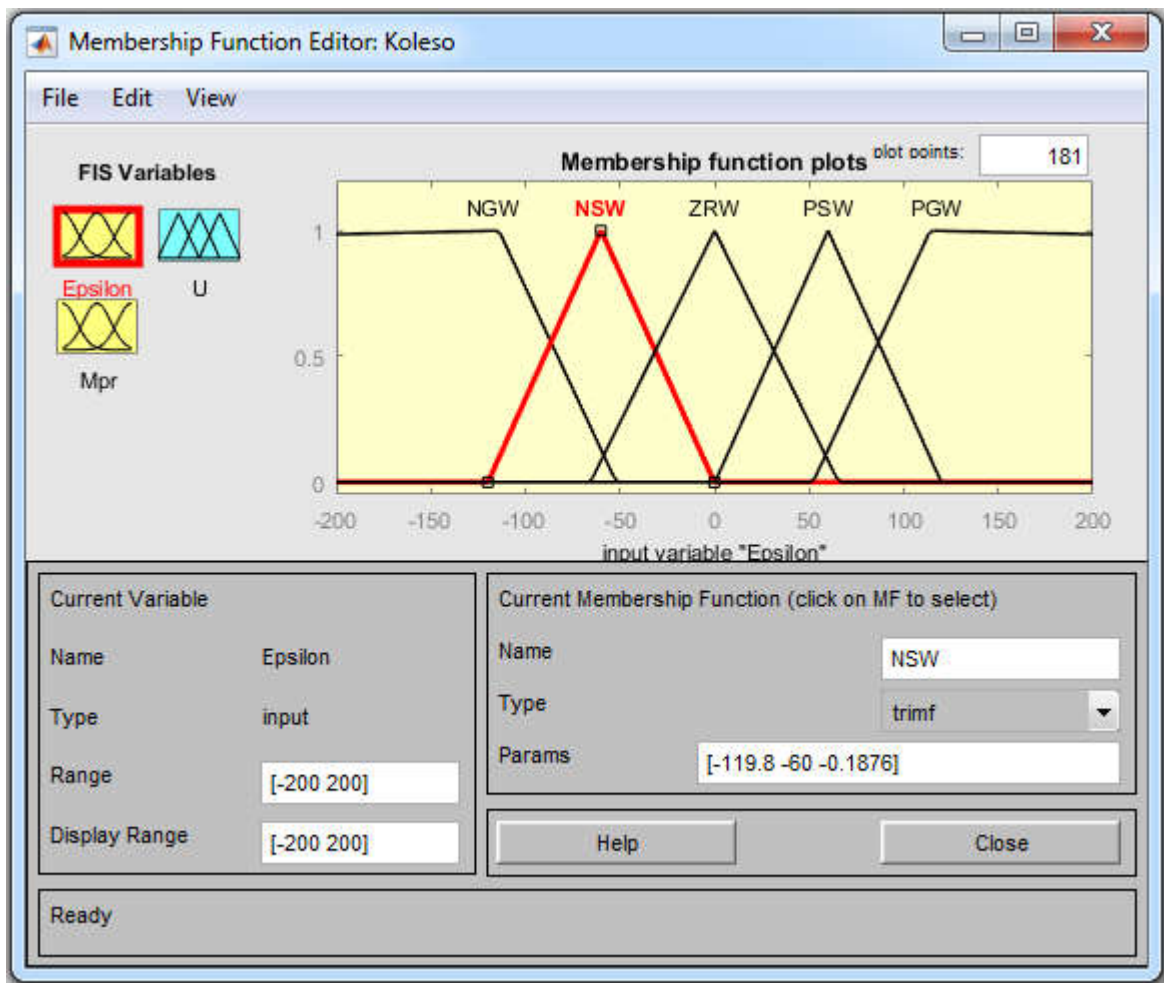


Рисунок 4.5 – Функції приналежності змінної «Epsilon»
(помилка регулювання $\varepsilon(t)$)

Спочатку встановимо діапазон зміни та відображення змінної у полях Range і Display Range від -200 до +200, підтвердивши введення клавішею Enter. Потім перейдемо до діалогового вікна через пункти меню Edit/Remove All MFs,

Edit/Add MFs (див. рис. 4.6), де визначимо п'ять функцій приналежності у формі трикутника (trimf) або гауссівської форми (gaussmf).

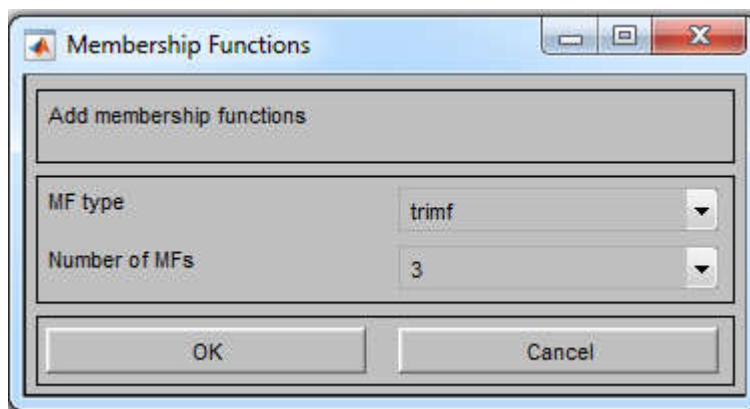


Рисунок 4.6 – Вид вікна завдання типа і кількості функцій приналежності

Після натискання кнопки "OK" повернемося до вікна редактора функцій належності. Змінимо імена заданих функцій, вибравши потрібну криву та клікнувши лівою кнопкою миші. Крива вибереться та забарвиться червоним кольором; можна рухати цю криву за допомогою миші (точніші налаштування можна здійснити, змінивши числові значення у полі "Params" - Параметри).

Кожній функції приналежності трикутної форми відповідають три параметри: перший і третій визначають розмах кривої (чисельні значення вказаних параметрів відповідають точкам перетину з віссю x), а другий - положення її центру. Якщо задаються функції приналежності гауссівської форми (gaussmf), то вони потребують два параметри: перший визначає розмах кривої, а другий - положення її центру.

У полі Name змінюємо ім'я для обраної кривої, завершуючи введення кожного імені клавішею Enter. Дамо нові імена всім п'яти кривим, наприклад: найлівіша - NGW (негативна велика для швидкості); наступна - NSW (негативна мала для швидкості); центральна - ZRW (дуже мала для швидкості); наступна справа - PSW (позитивна мала для швидкості); найправіша - PGW (позитивна велика для швидкості).

Під час налаштування Fuzzy регулятора проводиться вибір типу, діапазону та положення функцій через повторні розрахунки перехідних процесів у багатомасовій системі з різними типами та параметрами функцій приналежності для вибору оптимального варіанту.

Клацнувши значок "Mpr" ($M_{np}(t)$) увійдемо у вікно редагування функцій належності для цієї змінної (див. рис. 4.7). Спочатку встановимо діапазон зміни від -5000 до +5000, а потім, за аналогічною схемою, задамо п'ять функцій належності у формі трикутної (trimf) або гауссівської (gaussmf) форми. Назвемо їх відповідно: "NGM" (негативна велика для моменту), "NSM" (негативна мала для моменту), "ZRM" (дуже мала для моменту), "PSM" (позитивна мала для моменту) і "PGM" (позитивна велика для моменту).

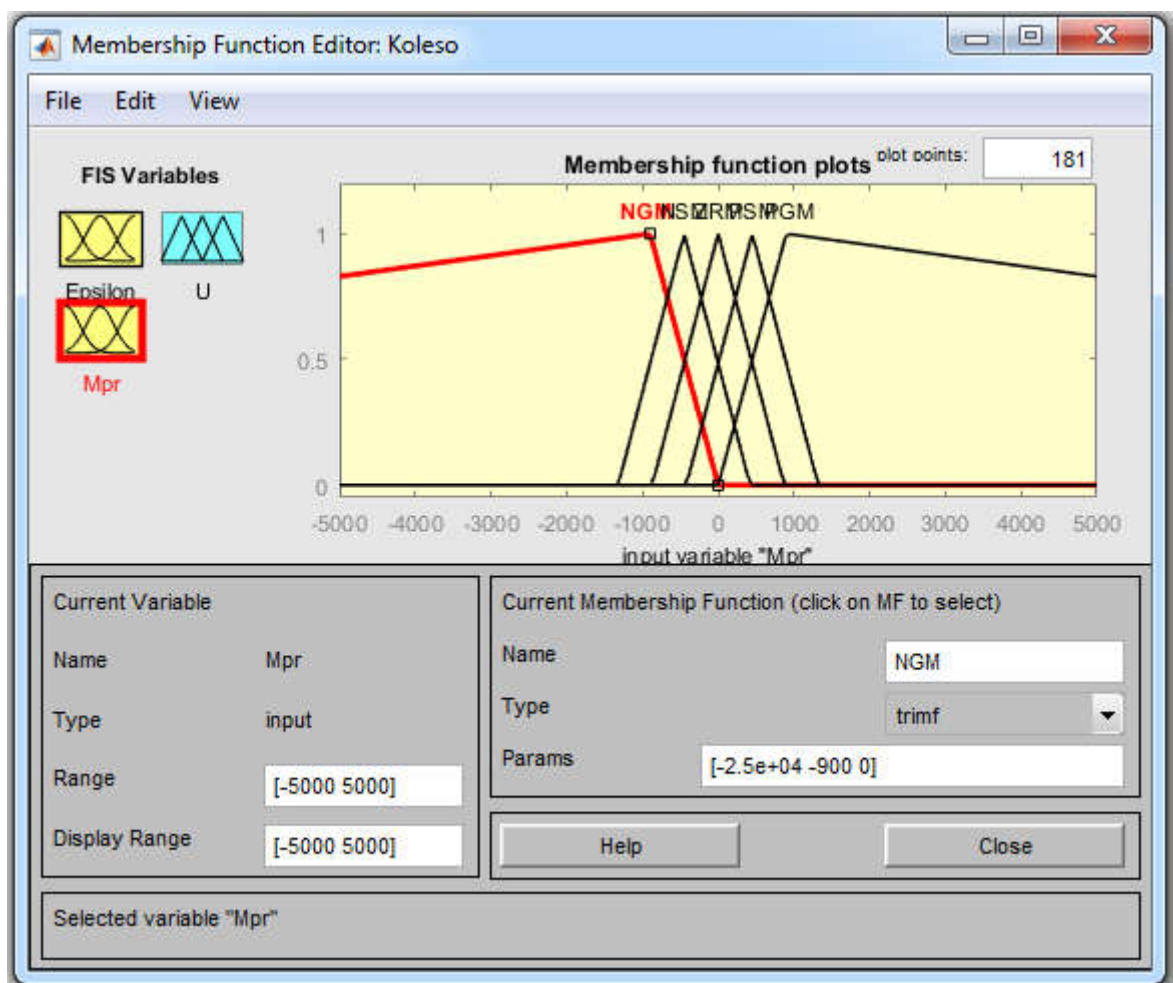


Рисунок 4.7 – Функції приналежності змінної «Mpr» ($M_{np}(t)$)

Для вихідної змінної U ($U(t)$) спочатку встановимо діапазон зміни (від -100 до +100), а потім вкажемо п'ять функцій належності гауссового типу: для центральної функції `gauss2mf`, а для інших - `gaussmf` з наступними назвами: «NGU» (негативна велика для вихідної змінної $U(t)$), «NSU» (негативна мала для вихідної змінної $U(t)$), «ZRU» (дуже мала для вихідної змінної $U(t)$), «PSU» (позитивна мала для вихідної змінної $U(t)$) і «PGU» (позитивна велика для вихідної змінної $U(t)$), як показано на рисунку 4.8. Тип і параметри функцій уточнюються в процесі налаштування Fuzzy регулятора, як було вказано раніше.

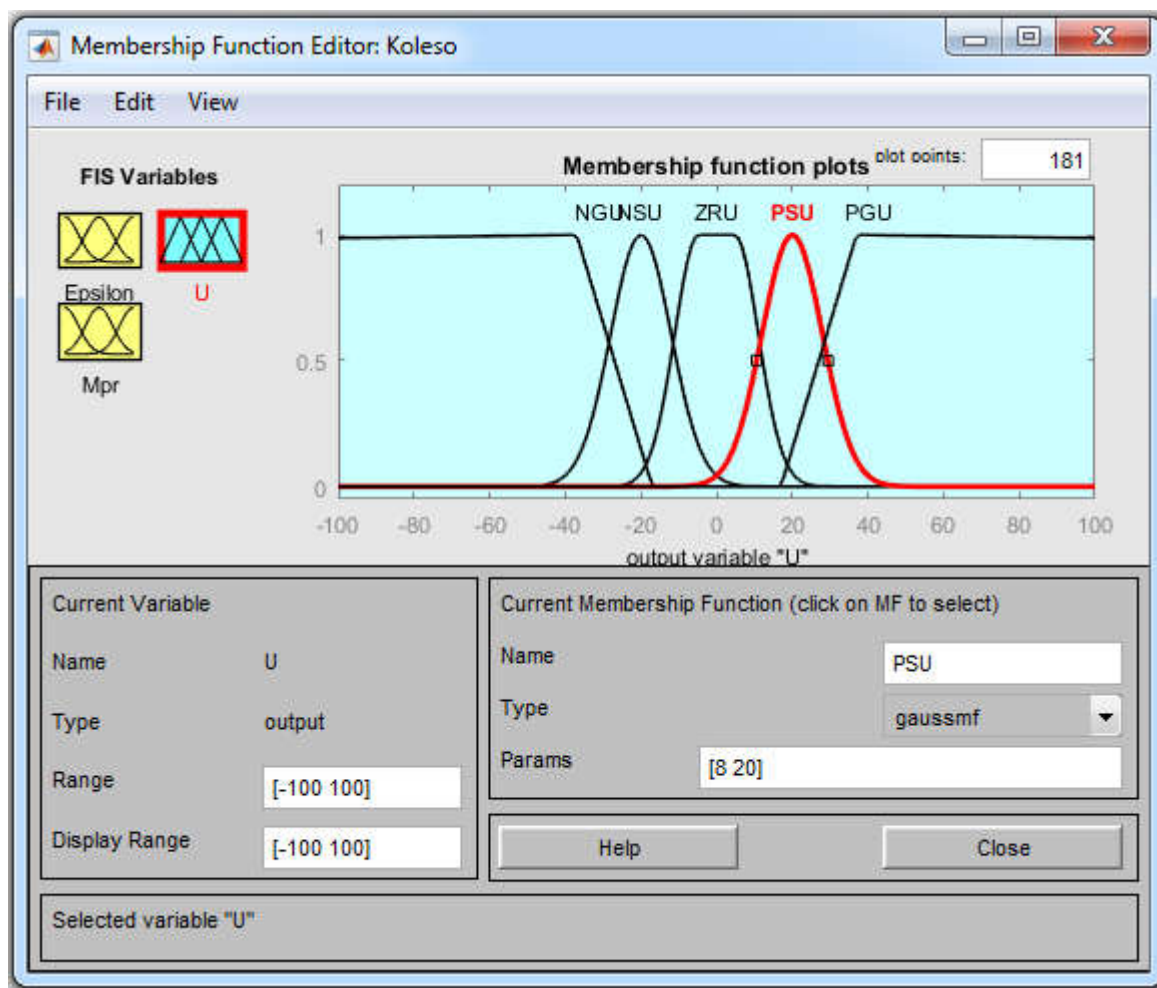


Рисунок 4.8 – Функції приналежності «U» (вихідної змінної $U(t)$)

Для створення правил оберемо пункт меню Edit/Rules. Потім будемо вводити правила відповідно до описаних завдань. Вікно редактора правил зображено на рисунку 4.9.

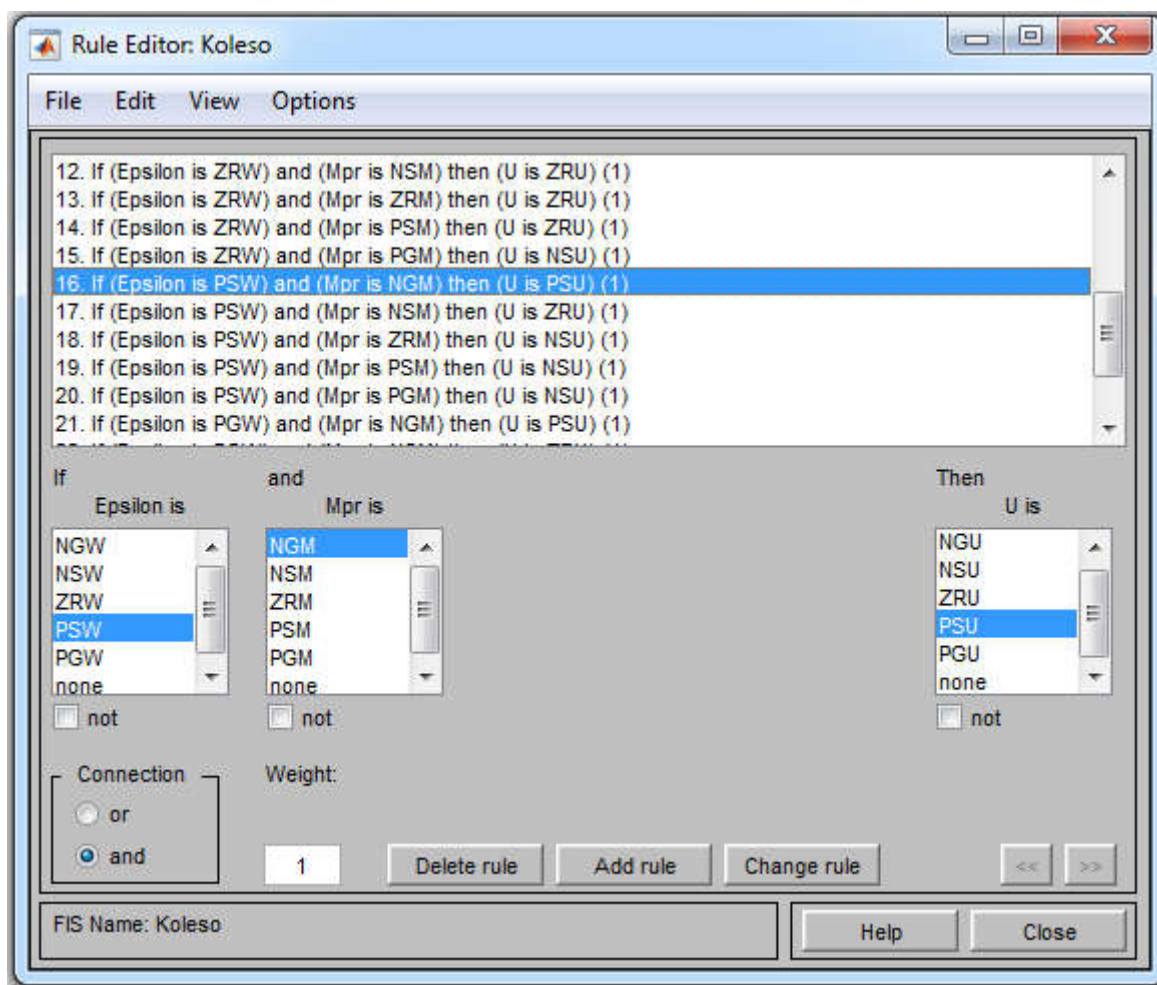


Рисунок 4.9 – Вікно редактора правил

Щоб перевірити систему у дії, перейдемо до меню View. Оберемо команду Rules, що призведе до відкриття вікна (рис. 4.10) іншої програми – перегляду правил (Rule Viewer). У правій частині вікна графічно представлені функції належності аргументів "Epsilon" (помилка регулювання $\varepsilon(t)$) та "Mpr" (момент пружності $M_{np}(t)$), а у лівій – функції належності змінної виходу "U" ($U(t)$) з поясненням механізму ухвалення рішення.

Червона вертикальна межа, яка перетинає графіки в правій частині вікна, може бути переміщена за допомогою миші. Це дозволяє змінювати значення змінних входу (аналогічно задаванню числових значень у полі Input), що приз-

водить до відповідних змін у "Epsilon" та "Mpr" у верхній правій частині вікна, а також у вихідному значенні змінної "U". Таким чином, використовуючи побудовану модель та вікно перегляду правил, можна розв'язувати задачу синтезу Fuzzy регулятора. Переміщення червоної вертикальної лінії наглядно демонструє, як система визначає значення виходу.

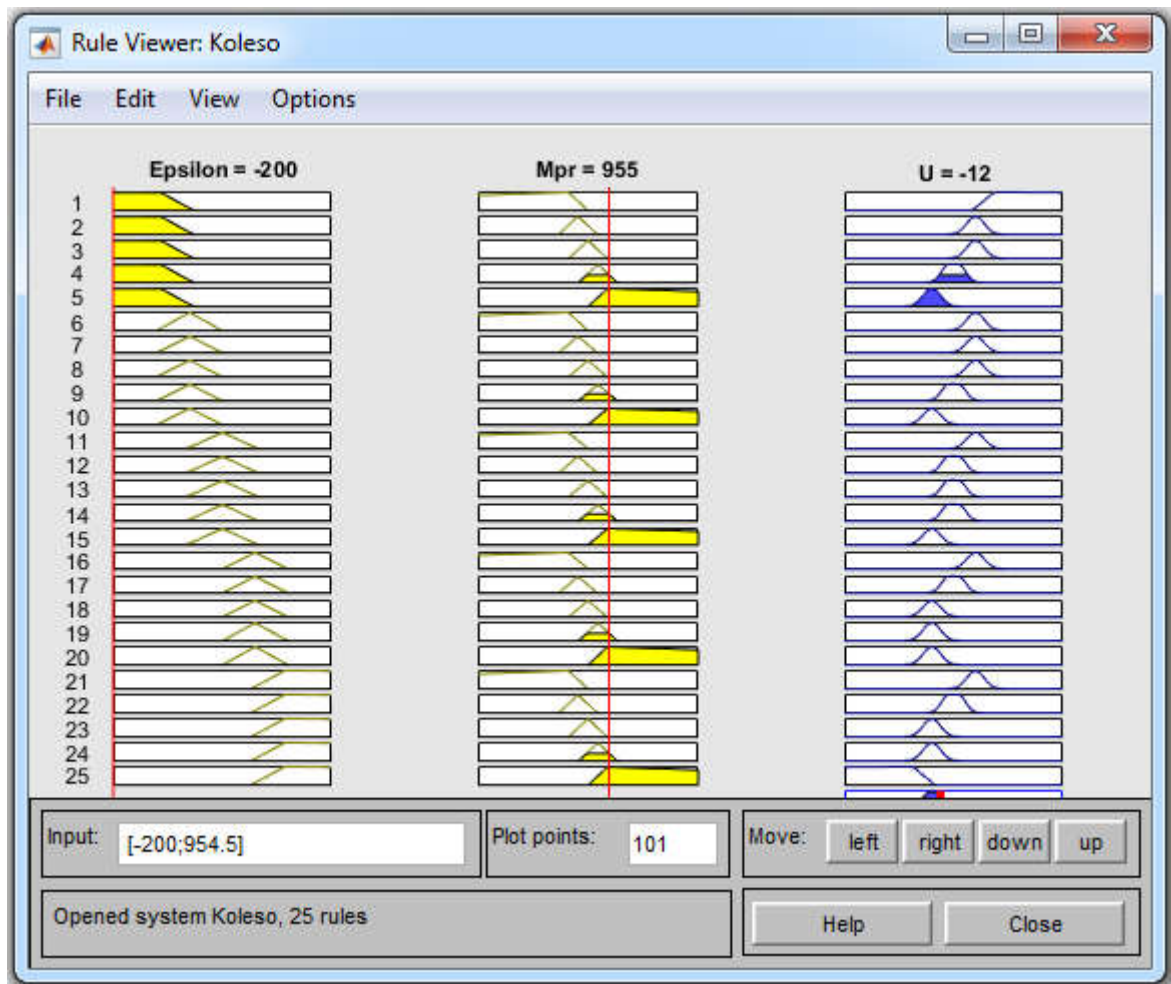


Рисунок 4.10 – Вікно перегляду правил

Після закриття вікна перегляду правил ми можемо перейти до вікна перегляду поверхні відгуку (виходу) (рис. 4.11), обравши команду View/Surface з меню. Графік можна обертати за допомогою миші у всіх напрямках.

У відкритому вікні, змінюючи назви змінних у полях введення (X (input) та Y (input)), можна налаштовувати і спостерігати одновимірні залежності, наприклад, $U(U(t))$ від помилки регулювання $\varepsilon(t)$.

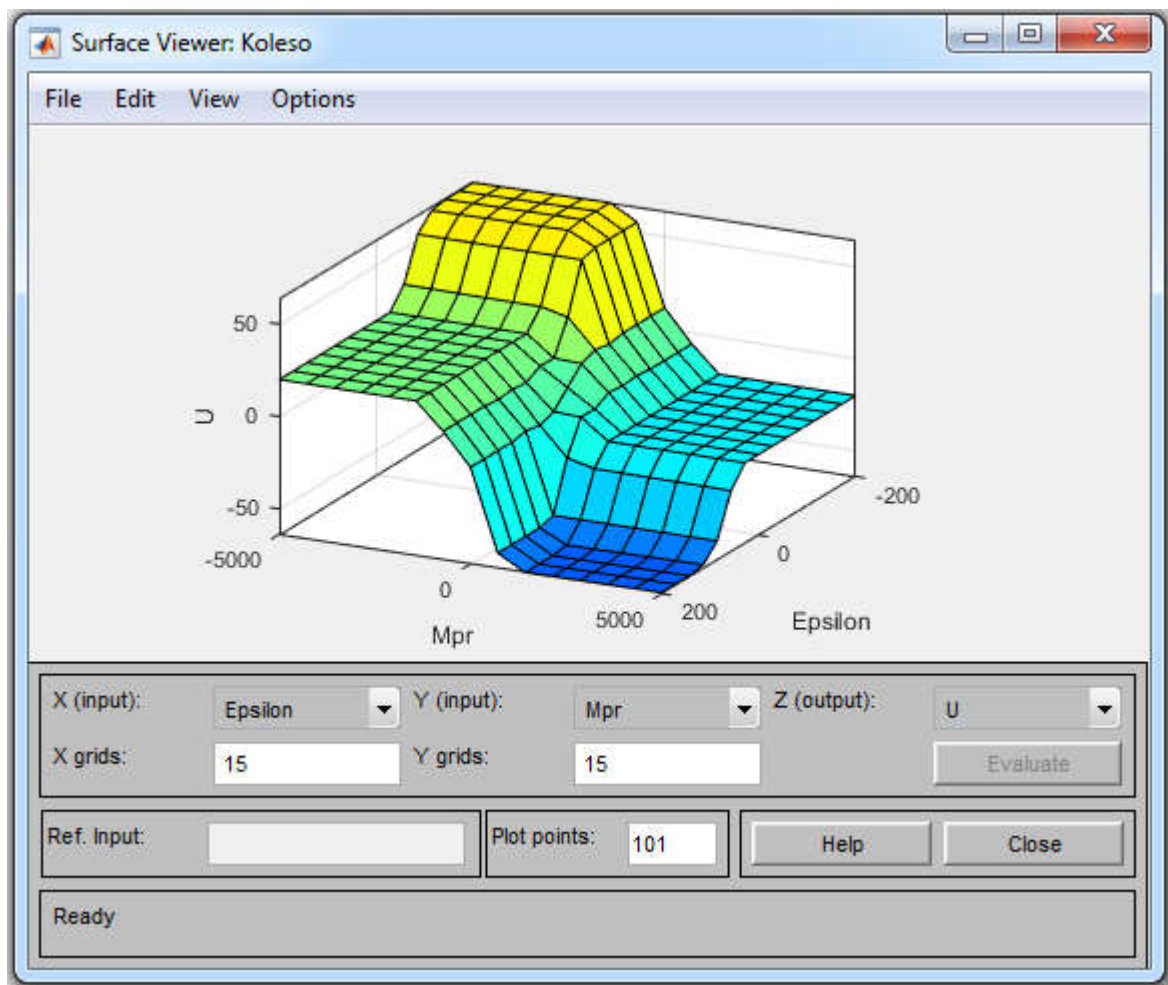


Рисунок 4.11 – Графічний вид залежності вихідної змінної від вхідних

Дослідження показали, що шляхом зміни типу та параметрів функцій належності в межах їхнього діапазону змін можна створити Fuzzy регулятор, який дозволяє знизити динамічні навантаження в багатомасовій системі. Для побудови графіків перехідних процесів системи з Fuzzy регулятором використовуються моделі SIMULINK, наведені на рисунках 4.1 або 4.13. На рисунках 4.14–4.17 представлені графіки перехідних процесів в замкнутій системі з використанням Fuzzy регулятора в режимі пуску та при наявності навантаження. Як видно з графіків, перехідні процеси мають задовільний характер, що суттєво зменшує динамічні навантаження в електромеханічній системі.

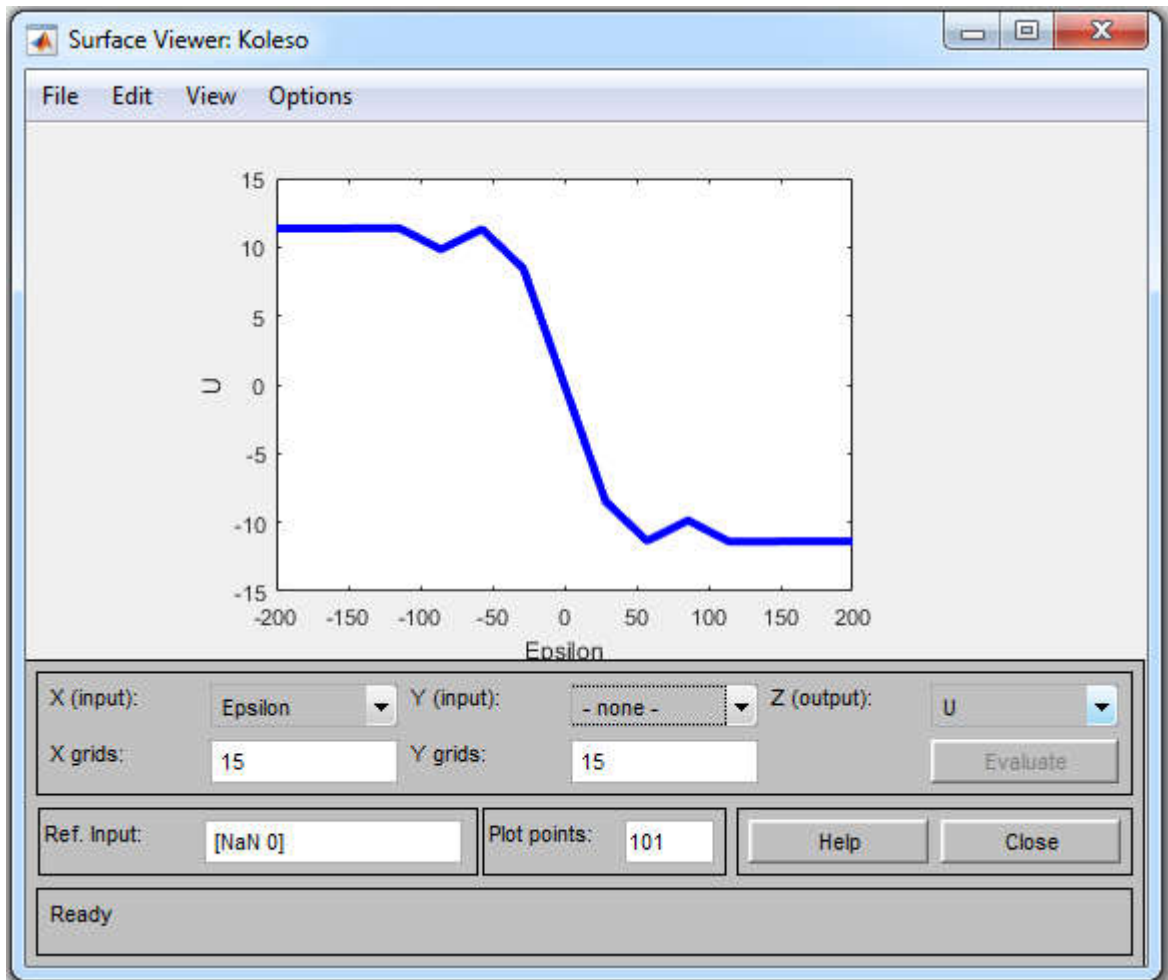


Рисунок 4.12 – Одновимірну залежність вихідної змінної U ($U(t)$) від вхідної – помилки регулювання "Epsilon" ($\varepsilon(t)$)

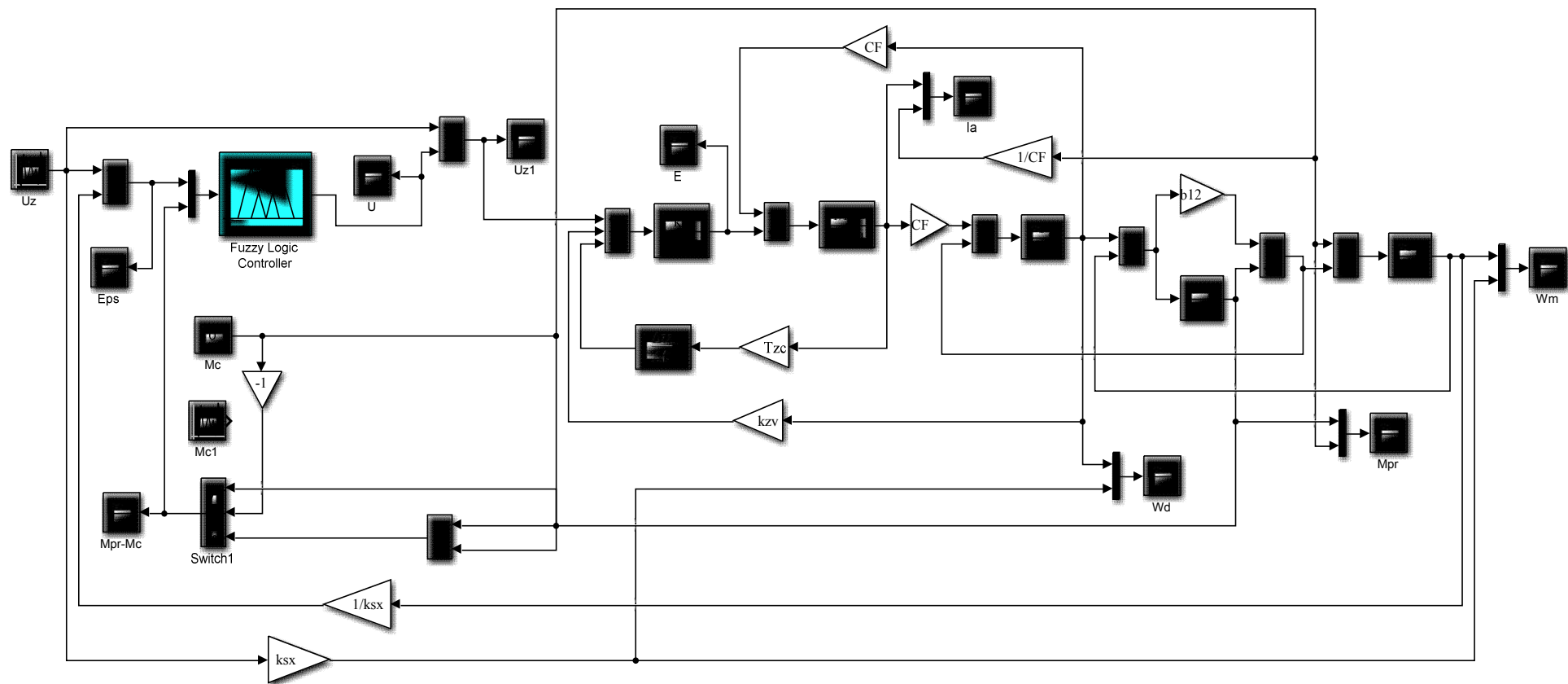


Рисунок 4.13 – Схема моделі двомасової системи з Fuzzy регулятором

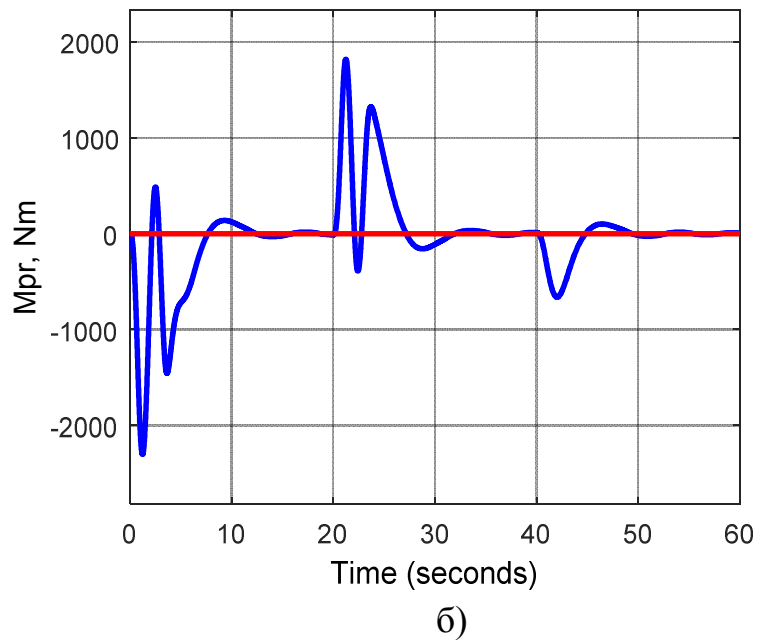
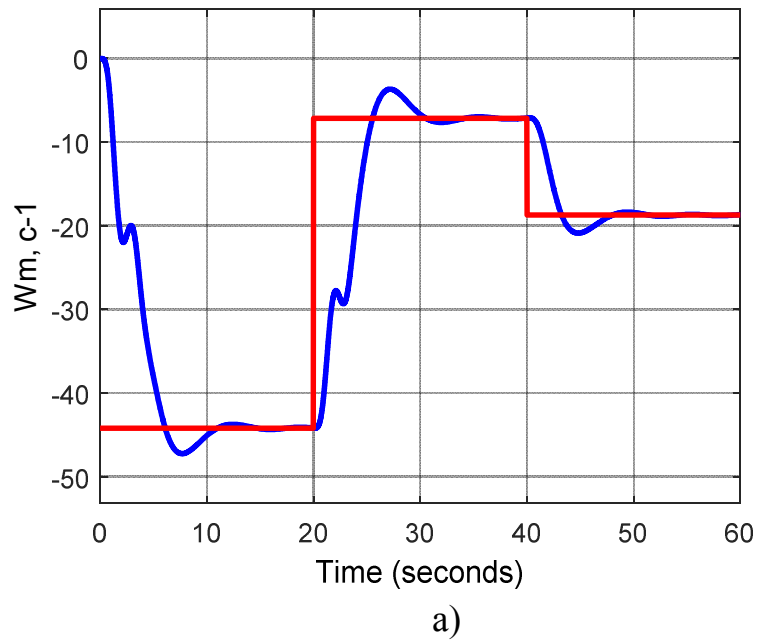
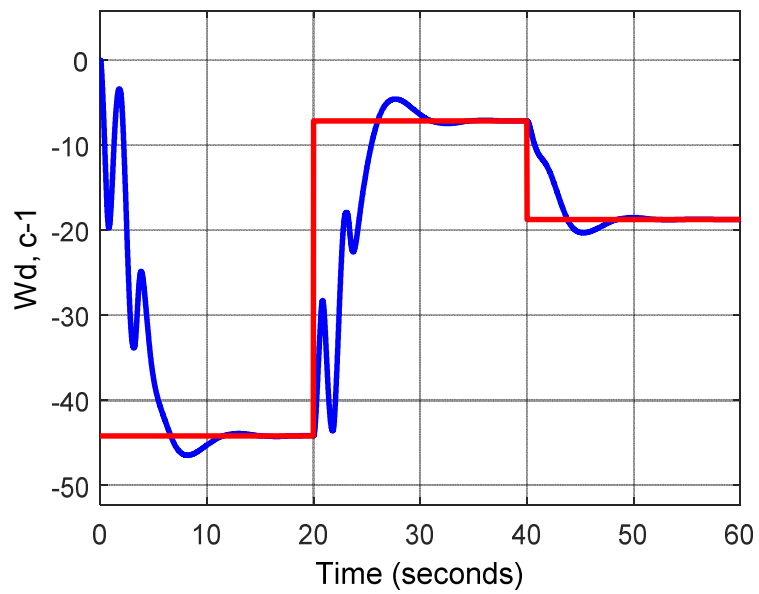
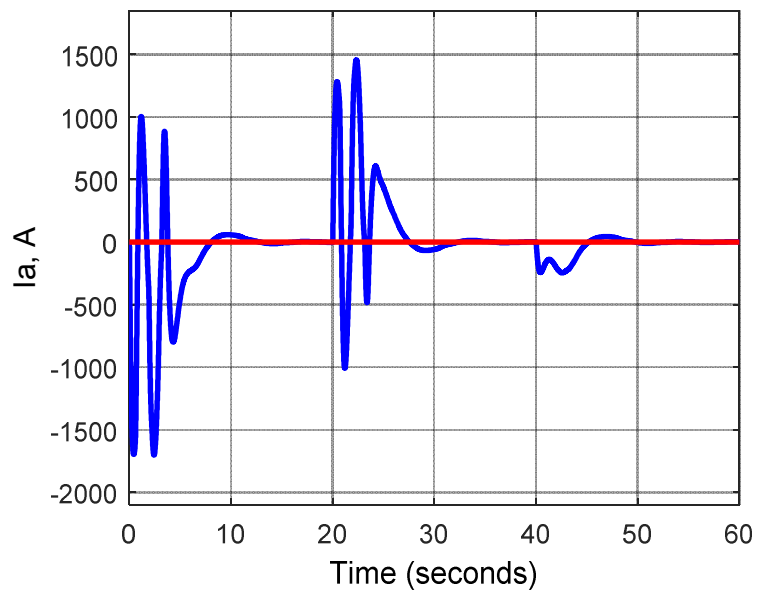


Рисунок 4.13 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{пр} = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по задаючій дії

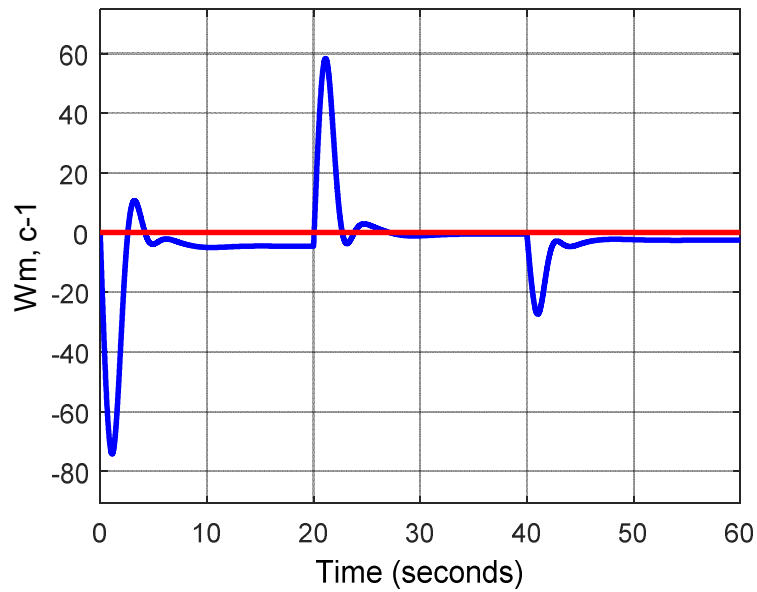


a)

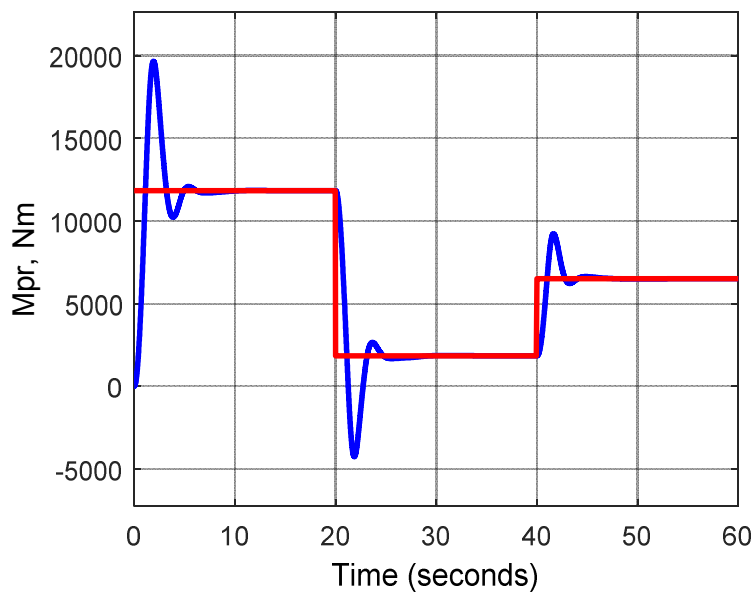


б)

Рисунок 4.14 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і струму двигуна $I_d = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по задаючій дії



a)



б)

Рисунок 4.15 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{пр} = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по збурюючій дії

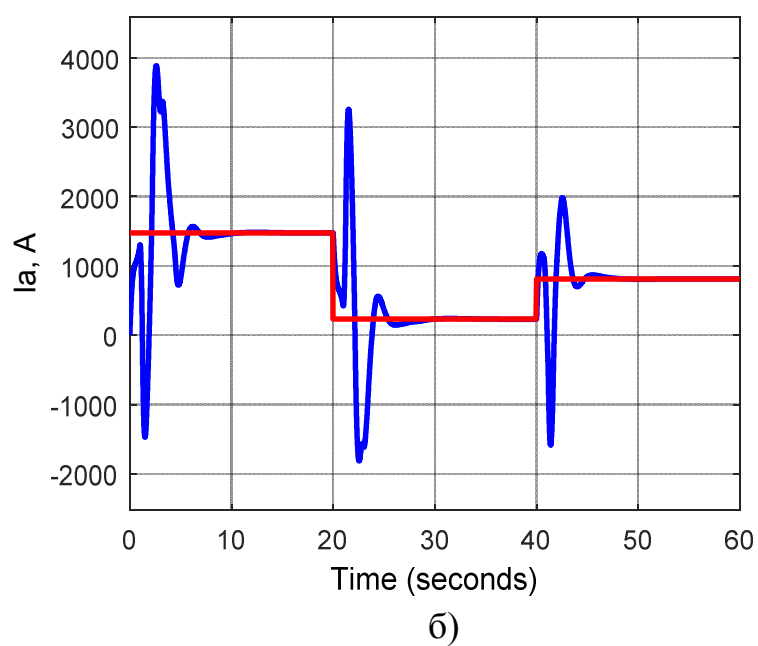
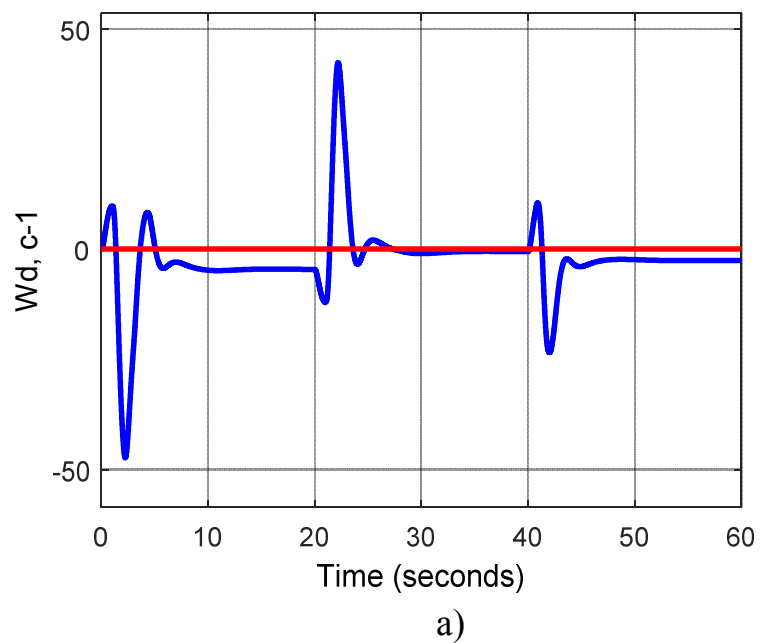


Рисунок 4.16 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і струму двигуна $I_d = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по збурюючій дії

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Розглянута програмна реалізація побудови нечітких апроксимуючих систем за допомогою інструментальних засобів математичної системи MATLAB 7 – пакету і Fuzzy Logic Toolbox (пакет нечіткої логіки), що відносяться до теорії розмитих або нечітких множин і дозволяє конструювати так звані нечіткі експертні і/або управляючі системи.

2. Розроблена схема системи з Fuzzy регулятором і схема моделі керованого об'єкту Fuzzy регулятора. Система системи має 2 входи, один вихід, На вхід системи подається величина миттєвої помилки регулювання $\varepsilon(t)$, тобто різниці між заданим значенням швидкості обертання механізму $\omega_3(t)$ і реальною швидкістю обертання механізму $\omega_m(t)$, а також момент пружності $M_{\text{пр}}(t)$ в кінематичному ланцюзі електроприводу, що зумовлено тим, що двомасова система є інерційною, і при регулювання слід враховувати похідну від помилки регулювання, в якості якої використовується момент пружності $M_{\text{пр}}(t)$. Вихідним сигналом системи є швидкість обертання механізму $\omega_m(t)$. За допомогою Fuzzy-регулятора формується управляюча дія $U(t)$ на динамічну систему.

3. Визначені вхідні і вихідні лінгвістичні змінні: першою з вхідних лінгвістичних змінних використано помилку регулювання $\varepsilon(t)$: ε – "помилка регулювання", а у якості другої вхідної лінгвістичної змінної момент пружності $M_{\text{пр}}(t)$: $M_{\text{пр}}$ – "момент пружності". Як вихідна лінгвістична змінна використовується напруга на виході регулятора $U(t)$, що алгебраїчно підсумовується с напругою завдання і діє на систему управління: U – "напруга регулятора".

Як терм-множини всіх лінгвістичних змінних використано множини $T_{1,2,3} = \{\text{"негативна велика"}, \text{"негативна мала"}, \text{"близька до нуля"}, \text{"позитивна мала"}, \text{"позитивна велика"}\}$. Функції приналежності кожного терма кожної множини визначаються в процесі синтезу Fuzzy регулятора.

4. На основі аналізу експериментальних перехідних процесів під час запуску та навантаження сформовано набір правил нечіткої логіки. Оскільки розглядаються дві вхідні лінгвістичні змінні, кожна з яких складається з 5 термів, отже система нечіткого висновку складається з 25 правил нечітких продукцій у формі "якщо...то".

5. За допомогою головного інтерфейсу програми Fuzzy Logic - редактора нечіткої системи висновку (FIS-редактор) здійснений синтез Fuzzy регулятора, використовуючи алгоритм Mamdani. Дослідження показало, що шляхом зміни типу і параметрів функцій належності в межах їхнього змінного діапазону можна створити Fuzzy-регулятор, що знижує динамічні навантаження в багатоканальній системі.

6. Проведено моделювання нечіткої системи з синтезованим Fuzzy регулятором. Аналіз результатів моделювання підтвердив, що перехідні процеси зміни стану системи у замкнутій системі з Fuzzy регулятором під час запуску та накиді навантаженні мають задовільну динаміку. Перерегулювання не перевищує 10%, час регулювання складає 10 с, що відповідає завданню.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача розробки нечіткої системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму обертання колеса роторного екскаватора, що забезпечують високу якість регулювання.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. В результаті аналізу систем управління основних механізмів роторних екскаваторів, що забезпечують високу якість регулювання і з урахуванням вимог, що пред'являються до сучасних систем управління, науково обґрунтовано перспективність застосування нечітких апроксимуючих систем для управління багатомасовою електромеханічною системою механізму обертання колеса роторного екскаватора.

2. На підставі аналізу вимог до систем електроприводів основних механізмів роторних екскаваторів для електроприводу механізму обертання колеса вибраний електропривод постійного струму, виконаний за системою Г–Д. Виконано вибір електродвигуна і основного електроустаткування силового ланцюга електроприводу.

3. Проведений вибір і розрахунок системи автоматичного управління параметрами електроприводу. Для забезпечення необхідної жорсткості робочої частини механічної характеристики і обмеження максимального значення моменту, що розвивається вибрано систему із зворотним зв'язком за швидкістю, гнучким зворотним зв'язком по струму і зворотним зв'язком по струму з відсіченням. Проведено розрахунок статичних характеристик розімкненої і замкненої системи. Складено алгоритмічну схему системи та визначені передавальні функції системи по задаючій і збурюючій діях. Проведено моделювання системи на ЕОМ з використанням пакету прокладних програм MATLAB.

4. Розроблена математична модель двомасової системи з урахуванням пружності механічних зв'язків. Проведено моделювання системи на ЕОМ. Дос-

лідження показали, що в двомасовій системі перехідні процеси основних координат мають значні коливання.

5. Для додання системі бажаних динамічних характеристик в роботі виконаний синтез системи управління з Fuzzy регулятором. Розглянутий принцип побудови і функціонування Fuzzy регулятора, приведений порядок синтезу Fuzzy регулятора, побудовані процеси в двомасовій системі з Fuzzy регулятором. Аналіз результатів моделювання підтвердив, що перехідні процеси зміни стану системи у замкнутій системі з Fuzzy регулятором під час запуску та накиді навантаження мають задовільну динаміку. Перерегулювання не перевищує 10%, час регулювання складає 10 с, що відповідає завданню.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технології нейронних мереж і нечіткого моделювання в системах управління: підруч. для здобувачів вищої освіти спец. 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Г.І. Канюк, Б.І. Кузнецов, Т.Ю. Василець, А.Ю. Мезеря, О.О. Варфоломієв. – Харків : Друкарня Мадрид, 2020. – 306 с.
2. Кирик В. В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. – 224 с.
3. 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.
4. 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.
5. Глибовець М.М., Отецький О.В. Штучний інтелект. – К.: Вид. дім «КМ Академія», 2002. – 366 с.
6. 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. Лісови-ченко. — К. : ДП «Вид. дім «Персонал», 2011. — 544 с.
7. Методи та системи штучного інтелекту: Навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050101 «Комп'ютерні науки» / Уклад. : А.С. Савченко, О. О. Синельников. – К. : НАУ, 2017. – 190 с.
8. Круглов В.В., Дли М.И., Галунов Р.Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 201 с.
9. Герасимов Б.М., Грабовский Г.Г., Рюмшин Н.А. Нечеткие множества в задачах проектирования, управления и обработки информации. – К.: Техника, 2002. -140 с.

10. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. Пер. с англ. . – М.: БИНОМ, 2009. –798 с.
11. Zadeh L. A. Fuzzy sets. – Information and Control, vol. 8, 1965, pp. 338–353.
12. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. – Information Sciences, vol. 8, 1975, pp. 43–80.
13. Zadeh L. A. Fuzzy logic. — IEEE Transactions on Computers, vol. 21, no. 4, 1988, pp.
14. D. Dubois, H.Prade. – Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, vol. 144, 1980, 385. p.
15. 62. Dubois D. and H. Pride, Unfair coins and necessity measures: Towards a possibilistic interpretation of histograms. Fuzzy Sets and Systems, 10, No. 1, 1983.
16. Dubois D., Prade H. Fuzzy Numbers, on Overview // Analysis of Fuzzy Information (Mathematics). GRC Press, 1988. P. 3–39.
17. M. Sugeno. Theory of fuzzy integrals and its applications. PhD thesis, Tokyo Institute of Technology, 1974.
18. M. Sugeno. Fuzzy measures and fuzzy integrals: a survey. In M.M Gupta, G.N Saridis, and B.R Gains, editors,Fuzzy automata and decision processes, pages 89-102. North Holland, Amsterdam, 1977.
19. M. Sugeno. An introductory survey on fuzzy control. Information Sciences, 36:59-83, 1985.
20. Bezdek J. C. A convergence theorem for the fuzzy ISODATA clustering algorithm. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Mashine Intelligence, vol. 2, No.1, 1980, pp. 1–8.
21. Bezdek J.C. Some recent applications of fuzzy c-means in pattern recognition and image processing. – IEEE Workshop Lang. Autom, 1983, pp. 247–252.
22. Р. Р. Ягера. Нечёткие множества и теория возможностей. – М., Радио и связь, 1986. - 408 с.
- 23.Mamdani E. H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. – IEEE Transactions on Computers, vol. 26, no. 12, 1977, pp. N82–1191.

24. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic yn thesis with a fuzzy logic controller. – International Journal of Man-Machine Studies, vol. 7, no. 1, 1975, pp. 1–13.
25. Mamdani E. H. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. – International Journal of Man-Machine Studies, vol. 8, 1976. pp. 669–678.
26. Mamdani E. H. Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. – IEEE Transactions on Computers, vol. 26, no. 12, 1977, pp. 1182–1191.
27. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. – IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 15, no. 1, 1985, pp. 116–132.
28. Windham M. P. Cluster validity for the fuzzy c-means clustering algorithm. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Mashine Intelligence, vol. 4, no. 4, 1982, pp. 357–363.
29. Windham M. P. Cluster validity for the fuzzy c-means clustering algorithm. Fuzzy Sets and Systems, vol. 10, no. 3, 1983, pp. 271–279.
30. Fukami S., Mizumoto M., Tanaka, K. Some considerations of fuzzy conditional inference. – Fuzzy Sets and Systems, vol. 4, 1980, pp. 243–273.
31. Kiszka J. B., Kochanska M. E., Sliwinska D. S. The influence of some fuzzy implication operators on the accuracy of a fuzzy model. – Fuzzy Sets and Systems vol. 15, 1985, pp. Ill – 128; 223 – 240.
32. Mamdani E. H. Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant. Porc. IEE. vol. 121, n. 12, pp. 1585-1588, 1974.
33. . Smidth F. L. Computing with a human face. New Scientist, 6 may, 1982.
34. Yagashita O., Itoh O., and Sugeno M. Application of fuzzy reasoning to the water purification process, in Industrial Applications of Fuzzy Control, Sugeno M, Ed. Amsterdam: North-Holand 1985, pp.19-40.
35. Yasunobu S., Miyamoto S., and Ihara H. Fuzzy control for automatic train operation system, in Proc. 4th. IFAC/IFIP/IFORS Int. Congress on Control in Transportation Systems, Baden-Baden, April, 1983.

36. Yasunobu S., and Hasegawa T. Predictive fuzzy control and its applications for automatic container crane operation system, in Proc. 2nd. IFSA Congress, Tokyo, Japan, Julie 1987.
37. F. Fujitec, FLEX-8800 series elevator group control system, Fujitec Co., Ltd., Osaka, Japan, 1988.
38. Watanabe H., and Dettloff. Reconfigurable fuzzy logic processor: A full custom digital VLCI, in Int. Workshop on Fuzzy Systems Applications, Iiruka, Japan, Aug. 1988, pp. 49-50.
39. Sangalli A., and Klir G.R. Fuzzy logic goes to market, New Scientist, 8 Feb., 1992.
40. Wang L.-X. Fuzzy Systems Are Universal Approximators // Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 1992. C. 1163–1170.
41. Castro, J. L. Fuzzy logic controllers are universal approximators // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1995. T. 25, № 4. C. 629–635.
42. Системи електропривода і електрооборудовання роторних екскаваторів. / Ю.Т. Калашников, А.О. Горнов, В.Н. Остриров и др. – М.; Энергоатомиздат, 1988 – 312 с.
43. Подерни Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ в 2 томах - М.; МГГУ, Издание 4, 2001 – 754 с.
44. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К. : Либідь, 2007. – 656 с.
45. Голюк П.Ф., Гречин Т.М. Теорія автоматичного керування: Навчальний посібник. – Л: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 280 с.
46. Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Лисенко В.П. Теорія автоматичного управління: навч. посіб. – К.: Вид. Центр НУБіП України, 2012. – 240 с.
47. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами : навч. посіб. / Ладанюк А.П., Архангельська К.С., Власенко Л.О. – К.: НУХТ, 2014 – 274 с.

48. Сорока К.О. Теорія автоматичного керування і комп'ютерне моделювання (неперервні лінійні системи). Частина перша. Основи теорії систем автоматичного керування. : навч. посібник. – Харків : ФОП Тімченко, 2010. – 218 с.
49. Сорока К.О. Теорія автоматичного керування і комп'ютерне моделювання (неперервні лінійні системи). Частина друга. Аналіз систем автоматичного керування засобами комп'ютерного моделювання : навч. посібник. – Харків : ФОП Тімченко, 2010. – 156 с.
50. Євстіфєєв В. О. Теорія автоматичного керування. Частина 1. Безперервні лінійні та нелінійні системи. Навчальний посібник. – Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2006. – 288 с.
51. Євстіфєєв В. О. Теорія автоматичного керування. Частина 2. Спеціальні системи автоматичного керування. Навчальний посібник. – Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2007. – 224 с.
52. І.Г. Абраменко, Д. І. Абраменко Теорія автоматичного керування. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 178 с.
53. Автоматизований електропривод ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.– 204 с
54. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інші. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г.Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інші. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1.
55. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інші. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інші. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч2.
56. Системи керування електроприводами. Видання 2: Навч. посібник з дисципліни «Системи керування електроприводами» (для студентів спеціальності

- 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної і заочної форми навчання)/ – Краматорськ: ДДМА, 2018. – 225 с.
57. Гурко О.Г. Аналіз та синтез систем автоматичного управління у MATLAB: Навчальний посібник / О.Г. Гурко, І.Ф. Єрьоменко. Харків, ХНАДУ, 2012. – 284 с.
58. В.П.Дьяконов, В.В.Круглов MATLAB 6.5 SP1/SP2 + Simulink 5/6 инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006.- 456 с.
59. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. –СПб: Питер, 2001. –488 с.
60. Круглов В.В., Дли М.И. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечёткой логики и нечёткого вывода. – М.: Физматлит, 2002. – 252 с.
61. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде МАТЛАБ и fuzzyTECH.- СП.:БХБ-Петербург, 2003.-736с.
62. ШтовбаС.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба – М.: "Горячаяли-ния - Телеком", 2007. – 288 с.
63. 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

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

А.1 Визначення і способи завдання нечіткої множини

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

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

$$\mu_A(x): E \rightarrow [0,1]. \quad (\text{A.1})$$

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

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

$$A = \{\mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n\}, \quad (\text{A.2})$$

або у вигляді

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \right\}, \quad (\text{A.3})$$

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

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

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

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

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

Тоді A можна представити, наприклад, у вигляді

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

або у вигляді:

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

Приклади нечітких множин.

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

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

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

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

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

4. Нехай E – множина цілих чисел:

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

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

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

Використовуються наступні поняття.

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

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

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

Терм-множиною називається множина всіх можливих значень лінгвістичної змінної.

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

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

A.2 Функції приналежності нечіткої логіки

Вищенаведене формальне визначення нечіткої множини не накладає ніяких обмежень на вибір конкретної функції приналежності для його представ-

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

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

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

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

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

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

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

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

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

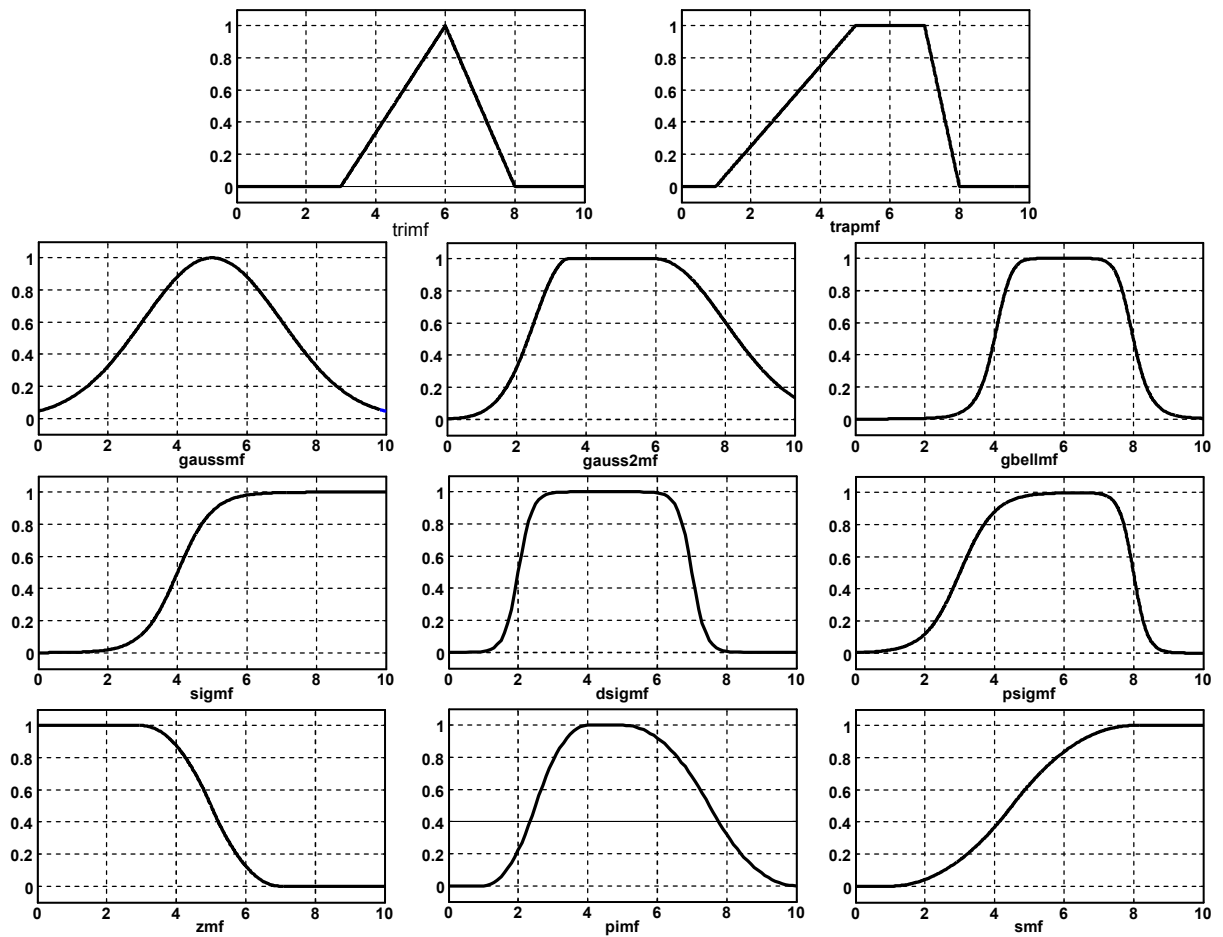


Рисунок А.1 – Типові функції приналежності нечітких множин

ДОДАТОК Б

ОПЕРАЦІЇ НАД НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ

Б.1 Логічні операції

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

Включення. Хай A і B – нечіткі множини на універсальній множині E . Говорять, що A міститься в B , якщо $\forall x \in E \quad \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$

Позначення: $A \subset B$.

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

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

Позначення: $A = B$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Приклади. Нехай

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

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

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

Тут:

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

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

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

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

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

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

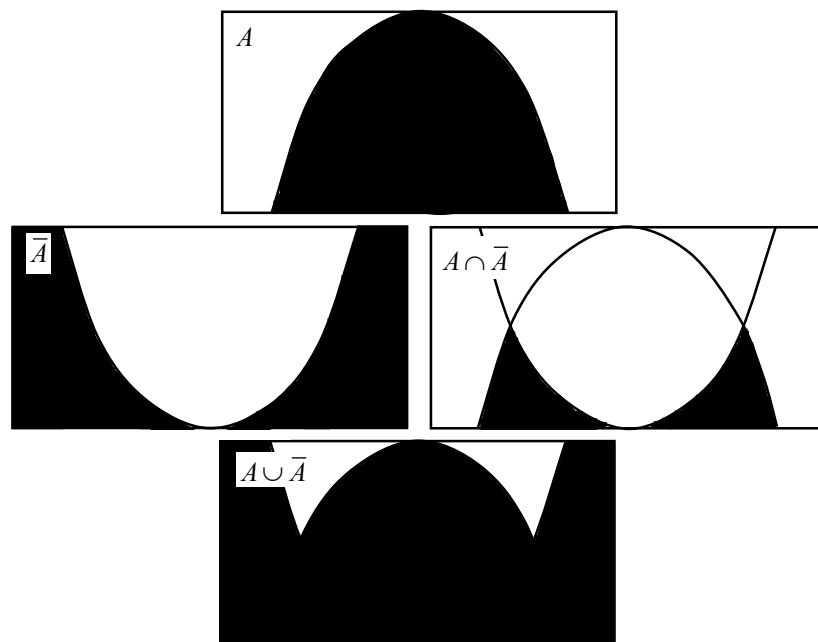


Рисунок Б.1 – Графічна інтерпретація логічних операцій

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

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

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

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

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

Простим випадком трикутних норм є:

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

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

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

Приклади *T* - конорм:

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

Б.2 Алгебраїчні операції з нечіткими множинами

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

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

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

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

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

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

Не виконуються:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

які використовуються при роботі з лінгвістичними невизначеностями.

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

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

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

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

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

Декартовий (прямий) добуток нечітких множин. Хай $A_1, A_2, \dots, A_n$ – нечіткі підмножини універсальних множин $E_1, E_2, \dots, E_n$ відповідно. Декартовий, або

прямий добуток $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$ є нечіткою підмножиною множини $E = E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$ з функцією приналежності:

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

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

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

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

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

Приклад. Нехай

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

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

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

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

Тоді

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

Чітка множина α – рівня (або рівня α). Множиною α -рівня нечіткої множини A універсальної множини E називається чітка підмножина A_α універсальної множини E , визначуваної у вигляді

$$A_\alpha = \{x / \mu_A(x) \geq \alpha\},$$

де $\alpha \leq 1$.

ДОДАТОК В

НЕЧІТКІ ВІДНОШЕННЯ

В.1 Способи завдання нечітких відношень

Нехай $E = E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$ – прямий добуток універсальних множин і M – деяка множина приналежностей (наприклад $M = [0, 1]$). Нечітке n -арне відношення визначається як нечітка підмножина R на E , що приймає свої значення в M . У випадку $n = 2$ і $M = [0, 1]$ нечітким відношенням R між множинами $X = E_1$ і $Y = E_2$ називатиметься функція $R: (X, Y) \rightarrow [0, 1]$, яка ставить у відповідність кожній парі елементів $(x, y) \in X \times Y$ величину $\mu_R(x, y) \in [0, 1]$.

Позначення: нечітке відношення на $X \times Y$ запишеться у вигляді

$$x \in X, y \in Y: xRy.$$

У разі, коли $X = Y$, тобто X і Y співпадають, нечітке відношення $R: X \times X \rightarrow [0, 1]$ називається нечітким відношенням на множині X .

Приклади.

1) Хай $X = \{x_1, x_2, x_3\}$, $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$, $M = [0, 1]$. Нечітке відношення $R = XRY$ може бути задане, наприклад, табл. В.1.

Таблиця В.1 – Завдання нечіткого відношення

	y_1	y_2	y_3	y_4
x_1	0	0	0,1	0,3
x_2	0	0,8	1	0,7
x_3	1	0,5	0,6	1

2) Хай $X = Y = (-\infty, \infty)$ тобто множина всіх дійсних чисел. Відношення $x \gg y$ (x багато більше y) можна задати функцією приналежності:

$$\mu_A = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x \leq y, \\ \frac{1}{1 + (1 / (x - y)^2)} & \text{якщо } x > y. \end{cases}$$

3) Відношення R , для якого $\mu_R(x, y) = e^{-k(x-y)^2}$, при достатньо великих k можна інтерпретувати так: « x і y близькі один до одного числа».

В.2 Операції над нечіткими відношеннями

Об'єднання двох відношень R_1 і R_2 . Об'єднання двох відношень позначається $R_1 \cup R_2$ і визначається виразом

$$\mu_{R_1 \cup R_2}(x, y) = \mu_{R_1}(x, y) \vee \mu_{R_2}(x, y).$$

Перетин двох відношень. Перетин двох відношень R_1 і R_2 позначається $R_1 \cap R_2$ і визначається виразом

$$\mu_{R_1 \cap R_2}(x, y) = \mu_{R_1}(x, y) \wedge \mu_{R_2}(x, y).$$

Алгебраїчний добуток двох відношень. Алгебраїчний добуток двох відношень R_1 і R_2 позначається $R_1 \cdot R_2$ і визначається виразом

$$\mu_{R_1 \cdot R_2}(x, y) = \mu_{R_1}(x, y) \cdot \mu_{R_2}(x, y).$$

Алгебраїчна сума двох відношень. Алгебраїчна сума двох відношень R_1 і R_2 позначається $R_1 + R_2$ і визначається виразом

$$\mu_{R_1 + R_2}(x, y) = \mu_{R_1}(x, y) + \mu_{R_2}(x, y) - \mu_{R_1}(x, y) \cdot \mu_{R_2}(x, y).$$

Для введених операцій справедливі наступні властивості дистрибутивності:

$$R_1 \cap (R_2 \cup R_3) = (R_1 \cap R_2) \cup (R_1 \cap R_3),$$

$$R_1 \cup ((R_2 \cap R_3)) = (R_1 \cup R_2) \cap (R_1 \cup R_3),$$

$$R_1 \cdot (R_2 \cup R_3) = (R_1 \cdot R_2) \cup (R_1 \cdot R_3),$$

$$R_1 \cdot (R_2 \cap R_3) = (R_1 \cdot R_2) \cap (R_1 \cdot R_3),$$

$$R_1 + (R_2 \cup R_3) = (R_1 + R_2) \cup (R_1 + R_3),$$

$$R_1 + (R_2 \cap R_3) = (R_1 + R_2) \cap (R_1 + R_3).$$

Доповнення відношення. Доповнення відношення R позначається $\bar{R}$ і визначається функцією приналежності:

$$\mu_{\bar{R}}(x, y) = 1 - \mu_R(x, y).$$

Диз'юнктивна сума двох відношень. Диз'юнктивна сума двох відношень R_1 і R_2 позначається $R_1 \oplus R_2$ і визначається виразом

$$R_1 \oplus R_2 = (R_1 \cap \bar{R}_2) \cup (\bar{R}_1 \cap R_2).$$

Звичайне відношення, найближче до нечіткого. Хай R – нечітке відношення з функцією приналежності $\mu_R(x, y)$. Звичайне відношення, найближче до нечіткого, позначається $\underline{R}$ і визначається виразом

$$\mu_{\underline{R}}(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \mu_R(x, y) < 0,5, \\ 1, & \text{якщо } \mu_R(x, y) > 0,5, \\ 0 \text{ або } 1, & \text{якщо } \mu_R(x, y) = 0,5 \end{cases}$$

За домовленістю приймають $\mu_{\underline{R}}(x, y) = 0$ при $\mu_R(x, y) = 0,5$.

Композиція (згортка) двох нечітких відношень. Хай R_1 – нечітке відношення $R_1: (X \times Y) \rightarrow [0, 1]$ між X і Y , і R_2 – нечітке відношення $R_2: (Y \times Z) \rightarrow [0, 1]$ між Y і Z . Нечітке відношення між X і Z , що позначається $R_2 \circ R_1$, визначене через R_2 і R_1 , виразом

$$\mu(x, z) = V_y(\mu_{R_2}(x, y) \wedge \mu_{R_1}(y, z)),$$

називається (max-min) – композицією ((max-min)-згорткою) відношень R_1 і R_2 .

Приклад. Хай

R_1	y_1	y_2	y_3
x_1	0,1	0,7	0,4
x_2	1	0,5	0

R_2	z_1	z_2	z_3	z_4
y_1	0,9	0	1	0,2
y_2	0,3	0,6	0	0,9
y_3	0,1	1	0	0,5

Тоді

$R_2 \circ R_1,$	z_1	z_2	z_3	z_4
x_1	0,3	0,6	0,1	0,7
x_2	0,9	0,5	1	0,5

При цьому

$$\begin{aligned}\mu_{R_1 \circ R_2}(x_1 \cdot z_1) &= (\mu_{R_1}(x_1 \cdot y_1) \wedge \mu_{R_2}(y_1 \cdot z_1)) \vee \\ &\vee (\mu_{R_1}(z_1, y_2) \wedge \mu_{R_2}(y_2, z_1)) \vee (\mu_{R_1}(x_1, y_3) \wedge \mu_{R_2}(y_3, z_1)) = \\ &= (0,1 \wedge 0,9) \vee (0,7 \wedge 0,3) \vee (0,4 \wedge 0,1) = 0,1 \vee 0,3 \vee 0,1 = 0,3\end{aligned}$$

Зауваження. У даному прикладі спочатку використаний «аналітичний» спосіб композиції відношень R_1 і R_2 , тобто i -й рядок R_1 «умножається» на j -й стовпець R_2 з використанням операції $\wedge$, отриманий результат «згортається» з використанням операції $\vee$ в $\mu(x_i, z_j)$.

Властивості (max-min)-композиції. Операція (max-min) – композиції асоціативна, тобто

$$R_3 \circ (R_2 \circ R_1) = (R_3 \circ R_2) \circ R_1,$$

дистрибутивна щодо об'єднання, але недистрибутивна щодо перетину:

$$R_3 \circ (R_2 \cup R_1) = (R_3 \circ R_2) \cup (R_3 \circ R_1),$$

$$R_3 \circ (R_2 \cap R_1) \neq (R_3 \circ R_2) \cap (R_3 \circ R_1).$$

Крім того, для (max-min) – композиції виконується наступна важлива властивість: якщо, то $R \circ R_1 \subset R \circ R_2$. max-композиція. У виразі

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = V_y(\mu_{R_1}(x, y) \wedge \mu_{R_2}(y, z))$$

для (max-min)-композиції відношень R_1 і R_2 операцію $\wedge$ можна замінити будь-якою іншою, для якої виконуються ті ж обмеження, що і для $\wedge$: асоціативність і монотонність (у сенсі неубування) по кожному аргументу. Тоді

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = V_y(\mu_{R_1}(x, y) * \mu_{R_2}(y, z)).$$

Зокрема, операція $\wedge$ може бути замінена алгебраїчним добутком, тоді говорять про (max-prod)-композицію.

ДОДАТОК Г

СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ

Г.1 Порядок формування нечітких висновків

Використовуваний в різного роду експертних управляючих системах механізм нечітких висновків в своїй основі має базу знань, що формується фахівцями предметної області у вигляді сукупності нечітких предикативних правил вигляду:

P_1 : якщо $x \in A_1$, тоді $y \in B_1$

P_2 : якщо $x \in A_2$, тоді $y \in B_2$

.....

P_n : якщо $x \in A_n$, тоді $y \in B_n$

де x – вхідна змінна (ім'я для відомих значень даних), y – змінна висновку (ім'я для значення даних, яке буде обчислено); A_i і B_i – нечіткі множини, визначені відповідно на X і Y .

Приклад подібного правила.

Якщо x – «низьке», то y – «високе».

Приведемо детальніше пояснення. Знання експерта $A \rightarrow B$ відображає нечітке причинне відношення передумови і висновку, тому його можна назвати нечітким відношенням і позначити через R :

$$R = A \rightarrow B,$$

де « $\rightarrow$ » називається нечіткою імплікацією.

Відношення R можна розглядати як нечітка підмножина прямого добутку $X \times Y$ повної множини передумов X і висновків Y . Таким чином, процес

отримання (нечіткого) результату висновку B' з використанням даного спостереження A' і знання $A \rightarrow B$ можна представити у вигляді формули

$$B' = A' \bullet R = A' \bullet (A \rightarrow B),$$

де « $\bullet$ » – введена вище операція згортки.

Як операцію композиції, так і операцію імплікації в алгебрі нечітких множин можна реалізовувати по-різному (при цьому, природно, різнитиметься і підсумковий отримуваний результат), але у будь-якому випадку загальний логічний висновок здійснюється за наступні чотири етапи.

1. *Нечіткість* (введення нечіткості, фазифікація, *fuzzification*). Функції приналежності, визначені на вхідних змінних застосовуються до їх фактичних значень для визначення ступеня істинності кожної передумови кожного правила.

2. *Логічний висновок*. Обчислене значення істинності для передумов кожного правила застосовується до висновків кожного правила. Це приводить до однієї нечіткої підмножини, яка буде призначена кожній змінній висновку для кожного правила. Як правила логічного висновку зазвичай використовуються тільки операції *min* (МІНІМУМ) або *prod* (МНОЖЕННЯ). У логічному виведенні МІНІМУМУ функція приналежності висновку «відсікається» по висоті, відповідному обчисленому ступеню істинності передумови правила (нечітка логіка «І»). У логічному виведенні МНОЖЕННЯ функція приналежності висновку масштабується за допомогою обчисленого ступеня істинності передумови правила.

3. *Композиція*. Всі нечіткі підмножини, призначені до кожної змінної висновку (у всіх правилах), об'єднуються разом, щоб формувати одну нечітку підмножину для кожної змінної висновку. При подібному об'єднанні зазвичай використовуються операції *max* (МАКСИМУМ) або *sum* (СУМА). При композиції МАКСИМУМУ комбіноване виведення нечіткої підмножини конструюється як поточечний максимум по всіх нечітких підмножинах (нечітка логіка «АБО»). При композиції СУМИ комбіноване виведення нечіткої підмножини

конструюється як поточечна сума по всіх нечітких підмножинах, призначених змінною висновку правилами логічного висновку.

4. На закінчення (додатково) – *приведення до чіткості (дефазифікація, defuzzification)*, яке використовується, коли необхідно перетворити нечіткий набір висновків в чітке число. Є велика кількість методів приведення до чіткості, деякі з яких розглянуті нижче.

Структурна схема нечіткої системи представлена на рис.Г.1.

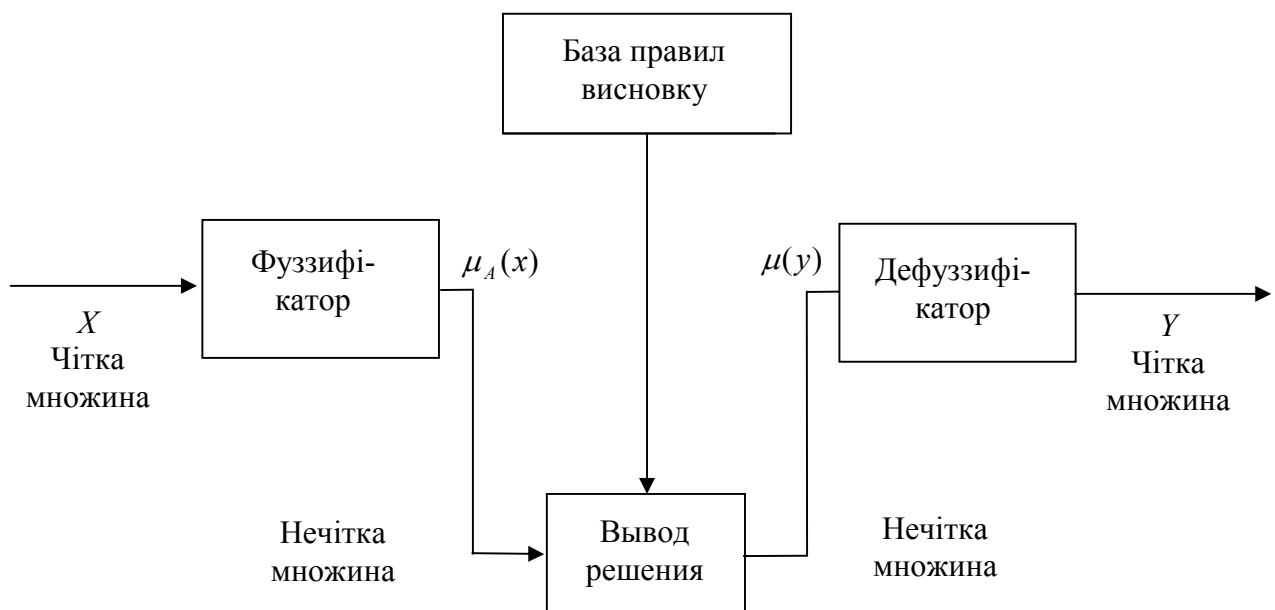


Рисунок Г.1 – Структура нечіткої системи з фузифікатором і дефузифікатором

Узагальнена функціональна структура системи, приведена на рис.Г.1, може бути представлена в розширеній формі, яка явному вигляді демонструє правила нечіткого висновку так, як це зображено на рис. Г.2. Оскільки допускається застосування множини нечіткі правил, в ній також передбачений блок агрегації, що найчастіше реалізовується у вигляді логічного суматора (оператор Мах). Описувана система висновку називається системою Мамдані-Заді. Вона дуже популярна в звичайних (неадаптивних) нечітких системах.

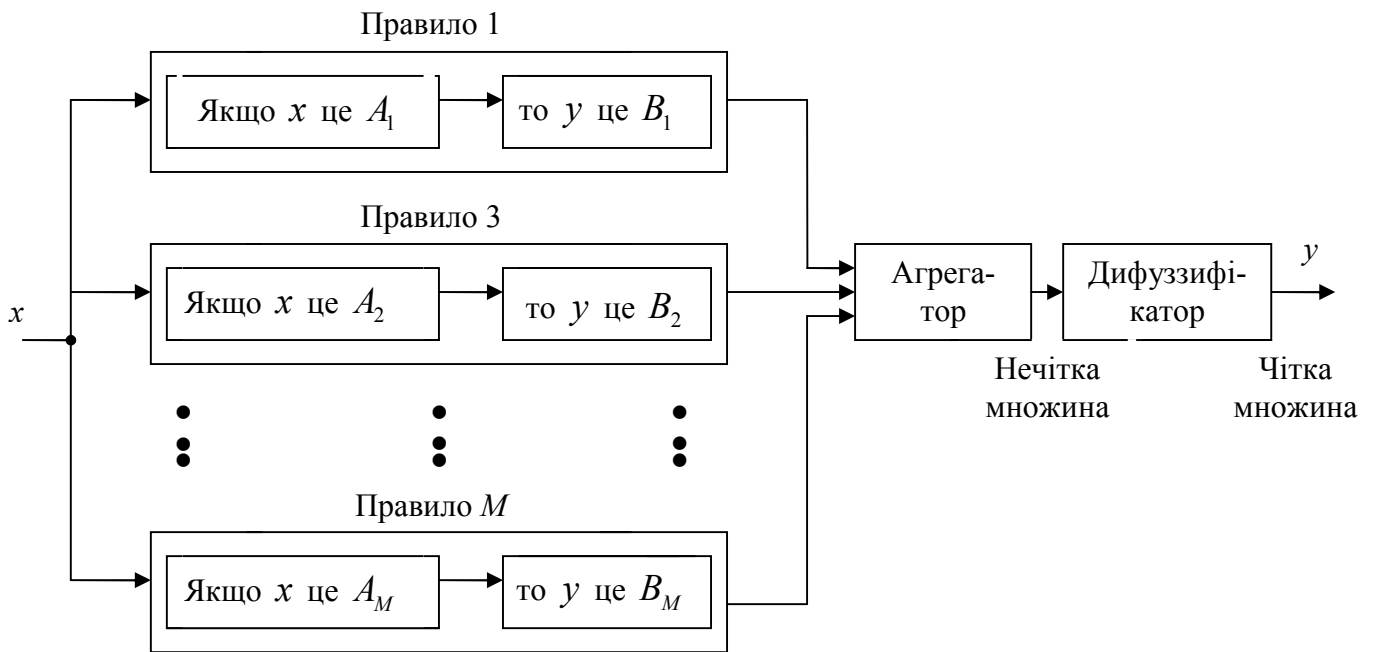


Рисунок Г.2 – Організація висновку в нечіткій системі
за наявності M правил висновку

Приклад. Нехай деяка система описується наступними нечіткими правилами:

P_1 : якщо $x \in A$, тоді $w \in D$,

P_2 : якщо $y \in B$, тоді $w \in E$,

P_3 : якщо $z \in C$, тоді $w \in F$,

де x , y і z – імена вхідних змінних, w – ім'я змінної висновку, а A , B , C , D , E , F – деякі нечіткі числа (нечіткі множини, визначені на множині дійсних чисел) з функціями приналежності відповідно μ_A , μ_B , μ_C , μ_D , μ_E , μ_F .

Процедура отримання логічного висновку ілюструється рис. Г.3.

Передбачається, що вхідні змінні прийняли деякі конкретні (чіткі) значення – x_0 , y_0 і z_0

Відповідно до приведених етапів, на етапі 1 для даних значень і виходячи з функцій приналежності A , B і C , знаходяться ступені істинності $\alpha(x_0)$, $\alpha(y_0)$ і $\alpha(z_0)$ для передумов кожного з трьох приведених правил (див. рис.Г.3).

На етапі 2 відбувається «відсікання» функцій приналежності висновків правив (тобто μ_D , μ_E , μ_F) на рівнях $\alpha(x_0)$, $\alpha(y_0)$ і $\alpha(z_0)$.

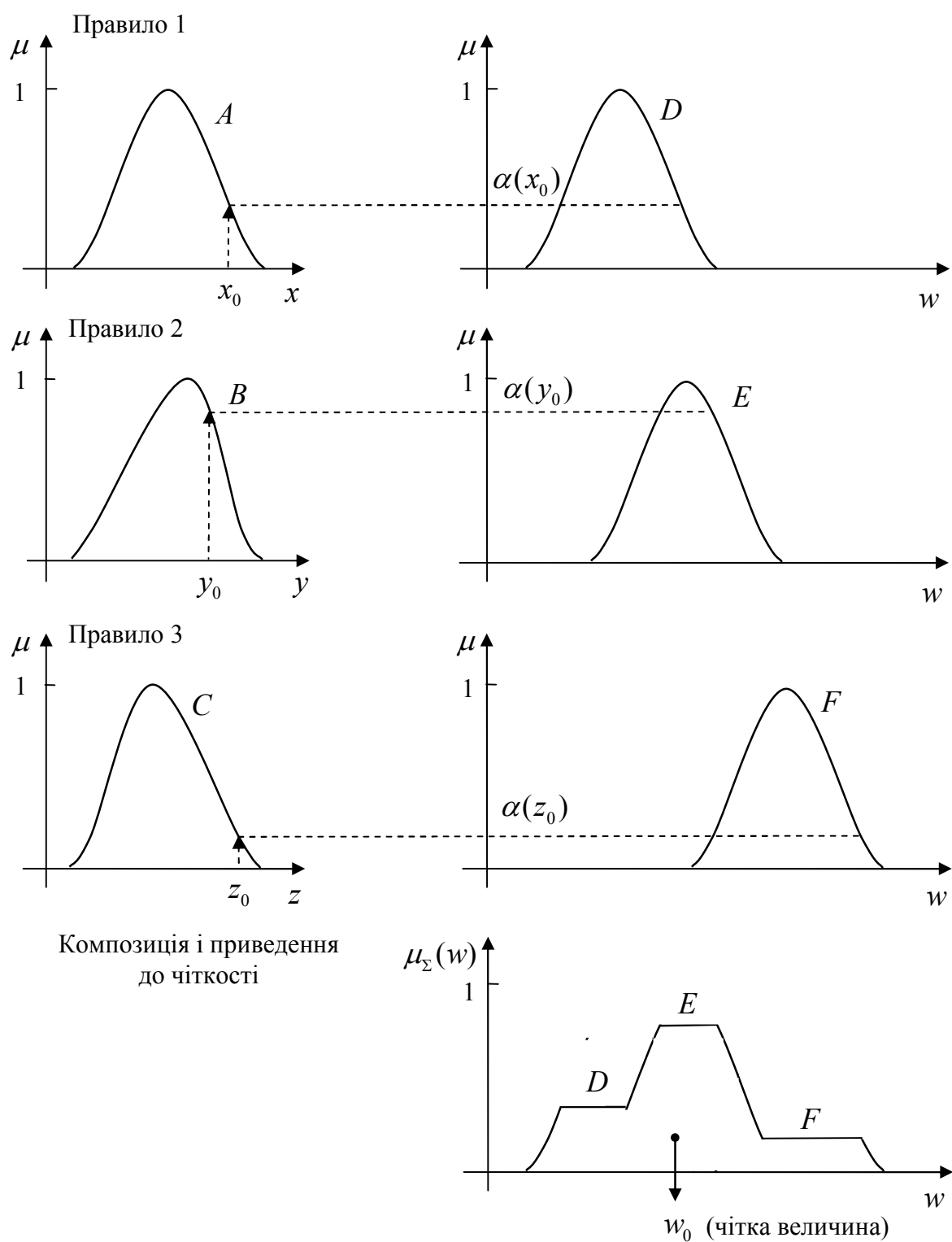


Рисунок Г.3 – Ілюстрація до процедури логічного висновку

На етапі 3 розглядаються усічені на другому етапі функції приналежності і проводиться їх об'єднання з використанням операції $\max$, внаслідок чого виходить комбінована нечітка підмножина, що описується функцією приналежності $\mu_{\Sigma}(w)$ і відповідна логічному висновку для вихідний змінної w .

Нарешті, на 4-му етапі (при необхідності) знаходиться чітке значення вихідний змінної, наприклад, із застосуванням центроїдного методу: чітке значення вихідний змінної визначається як центр тяжіння для кривої $\mu_{\Sigma}(w)$, тобто

$$w_0 = \frac{\int_{\Omega} w \mu_{\Sigma}(w) dw}{\int_{\Omega} \mu_{\Sigma}(w) dw}. \quad (\Gamma.1)$$

Тут Ω – область визначення $\mu_{\Sigma}(w)$.

Розглянемо наступні найбільш часто використовувані модифікації алгоритму нечіткого висновку, вважаючи, для простоти, що базу знань організовують два нечітких правила вигляду:

P_1 : якщо $x \in A_1$ і $y \in B_1$, тоді $z \in C_1$,

P_2 : якщо $x \in A_2$ і $y \in B_2$, тоді $z \in C_2$,

де x і y – імена вхідних змінних;

z – ім'я змінної висновку;

$A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ – деякі нечіткі множини, задані функціями приналежності $\mu_{A_1}, \mu_{A_2}, \mu_{B_1}, \mu_{B_2}, \mu_{C_1}, \mu_{C_2}$, при цьому чітке значення z_0 необхідно визначити на основі приведеної інформації і чітких значень x_0 і y_0 .

Г.2 Алгоритм Mamdani

Одним з найбільш поширених алгоритмів нечіткого висновку є *алгоритм Мамдані* (Mamdani.). Даний алгоритм відповідає розглянутому прикладу і рис.Г.3. У даній ситуації він математично може бути описаний таким чином.

1. Нечіткість: знаходяться ступені істинності для передумов кожного правила: $\mu_{A_1}(x_0)$, $\mu_{A_2}(x_0)$, $\mu_{B_1}(y_0)$, $\mu_{B_2}(y_0)$.

2. Нечіткий висновок: знаходяться рівні «відсічення» для передумов кожного з правил (з використанням операції МІНІМУМ)

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0),$$

$$\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0),$$

де через « $\wedge$ » позначена операція логічного мінімуму (min), потім знаходяться «усічені» функції приналежності

$$\mu_{C_1}(z) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(z)),$$

$$\mu_{C_2}(z) = (\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(z)),$$

3. Композиція: з використання операції МАКСИМУМ (max, що далі позначається як « $\vee$ ») проводиться об'єднання знайдених усічених функцій, що приводить до отримання підсумкової нечіткої підмножини для змінній виходу з функцією приналежності

$$\mu_{\Sigma}(z) = \mu_C(z) = \mu_{C_1}(z) \vee \mu_{C_2}(z) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(z)) \vee (\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(z)).$$

4. Нарешті, приведення до чіткості (для знаходження z_0) проводиться, наприклад, центроїдним методом.

Г.3 Алгоритм Tsukamoto

Початкові посилки – як у попереднього алгоритму, але в даному випадку передбачається, що функції $\mu_{C_1}(z)$, $\mu_{C_2}(z)$ є монотонними.

1. Перший етап – такий же, як в алгоритмі Mamdani.

2. На другому етапі спочатку знаходяться (як в алгоритмі Mamdani) рівні «відсікання» z_1 і z_2 , а потім – за допомогою рішення рівнянь

$$\alpha_1 = \mu_{C_1}(z_1), \quad \alpha_2 = \mu_{C_2}(z_2)$$

чіткі значення (z_1 і z_2) для кожного з вихідних правил.

3. Визначається чітке значення змінної висновку (як зважене середнє z_1 і z_2):

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2}{\alpha_1 + \alpha_2}; \quad (\Gamma.2)$$

у загальному випадку (дискретний варіант центроїдного методу)

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}. \quad (\Gamma.3)$$

Приклад. Нехай маємо $\mu_{A_1}(x_0) = 0,7$, $\mu_{A_2}(x_0) = 0,6$, $\mu_{B_1}(y_0) = 0,3$, $\mu_{B_2}(y_0) = 0,8$, відповідні рівні відсікання

$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)) = \min(0,7; 0,3) = 0,3,$$

$$\alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0)) = \min(0,6; 0,8) = 0,6$$

і значення $z_1 = 8$ і $z_2 = 4$, знайдені в результаті рішення рівнянь

$$\mu_{C_1}(z_1) = 0,3, \quad \mu_{C_2}(z_2) = 0,6,$$

При цьому чітке значення змінної висновку (див. рис. Г.4)

$$z_0 = (8 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,6) / (0,3 + 0,6) = 6.$$

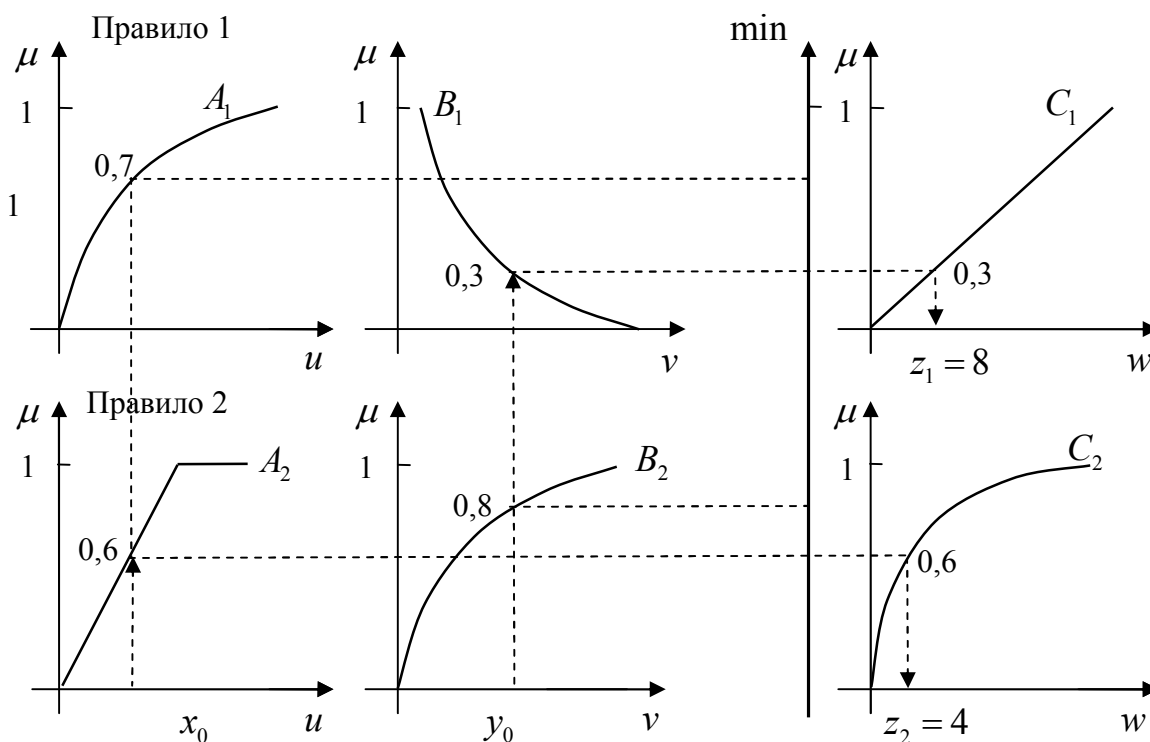


Рисунок Г.4 – Ілюстрації до алгоритму Tsukamoto

Г.4 Алгоритм Sugeno

Sugeno і Takagi використовували набір правил в наступній формі (як і раніше, приводиться приклад двох правил):

P_1 : якщо $x \in A_1$ і $y \in B_1$, тоді $z_1 = \alpha_1 x + b_1 y$,

P_2 : якщо $x \in A_2$ і $y \in B_2$, тоді $z_2 = \alpha_2 x + b_2 y$.

Представлення алгоритму.

1. Перший етап – як в алгоритмі Mamdani.
2. На другому етапі знаходяться, $\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$ і індивідуальні виходи правил:

$$z_1^* = \alpha_1 x_0 + b_1 y_0,$$

$$z_2^* = \alpha_2 x_0 + b_2 y_0.$$

3. На третьому етапі визначається чітке значення змінної висновку:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (\Gamma.4)$$

Ілюструє алгоритм рис. Г.5.

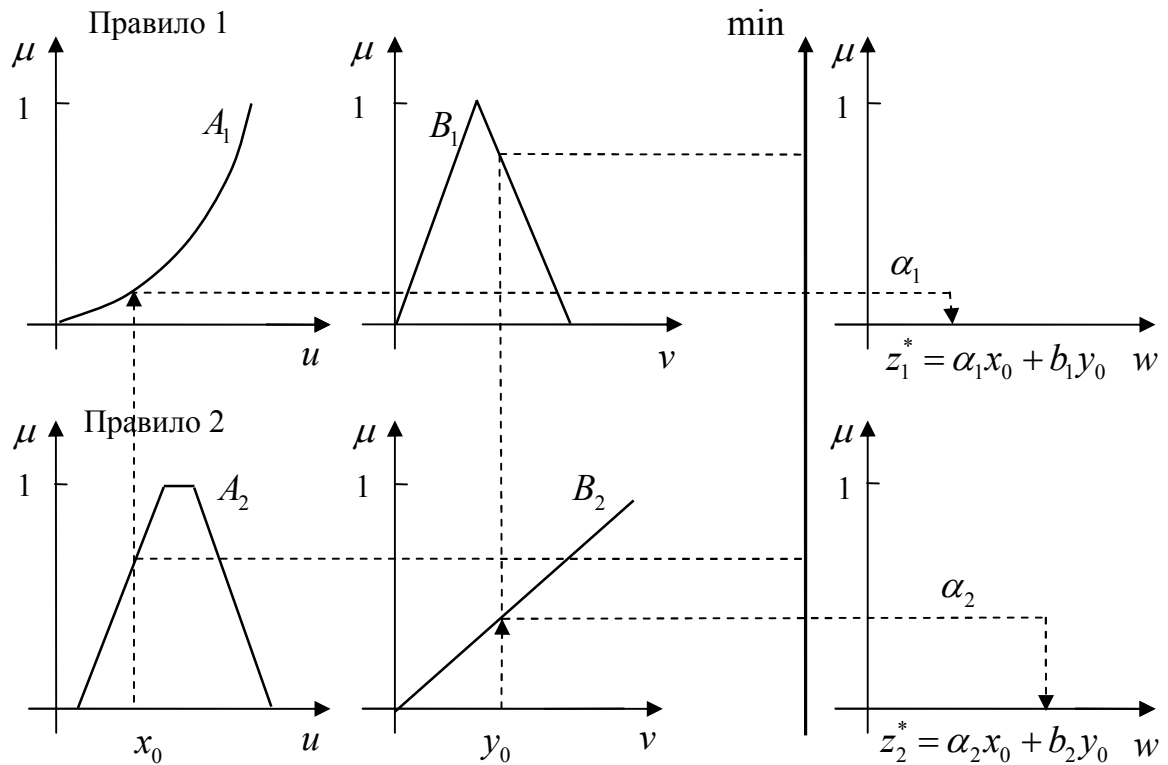


Рисунок Г.5 – Ілюстрація до алгоритму Sugeno

Г.5 Алгоритм Larsen

У алгоритмі Larsen нечітка імплікація моделюється з використанням оператора множення.

Опис алгоритму.

1. Перший етап – як в алгоритмі Mamdani.
2. На другому етапі, як в алгоритмі Mamdani спочатку знаходяться значення

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0),$$

$$\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0),$$

а потім – часткові нечіткі підмножини

$$\alpha_1 \mu_{C_1}(z), \quad \alpha_2 \mu_{C_2}(z)$$

3. Знаходиться підсумкова нечітка підмножина з функцією приналежності.

$$\mu_{\Sigma}(z) = \mu_C(z) = (\alpha_1 \mu_{C_1}(z)) \vee (\alpha_2 \mu_{C_2}(z))$$

(у загальному випадку n правил $\mu_{\Sigma}(z) = \mu_C(z) = \bigvee_{i=1}^n (\alpha_i \mu_{C_i}(z))$).

4. При необхідності проводиться приведення до чіткості (як в раніше розглянутих алгоритмах).

Алгоритм Larsen ілюструється рис. Г.6.

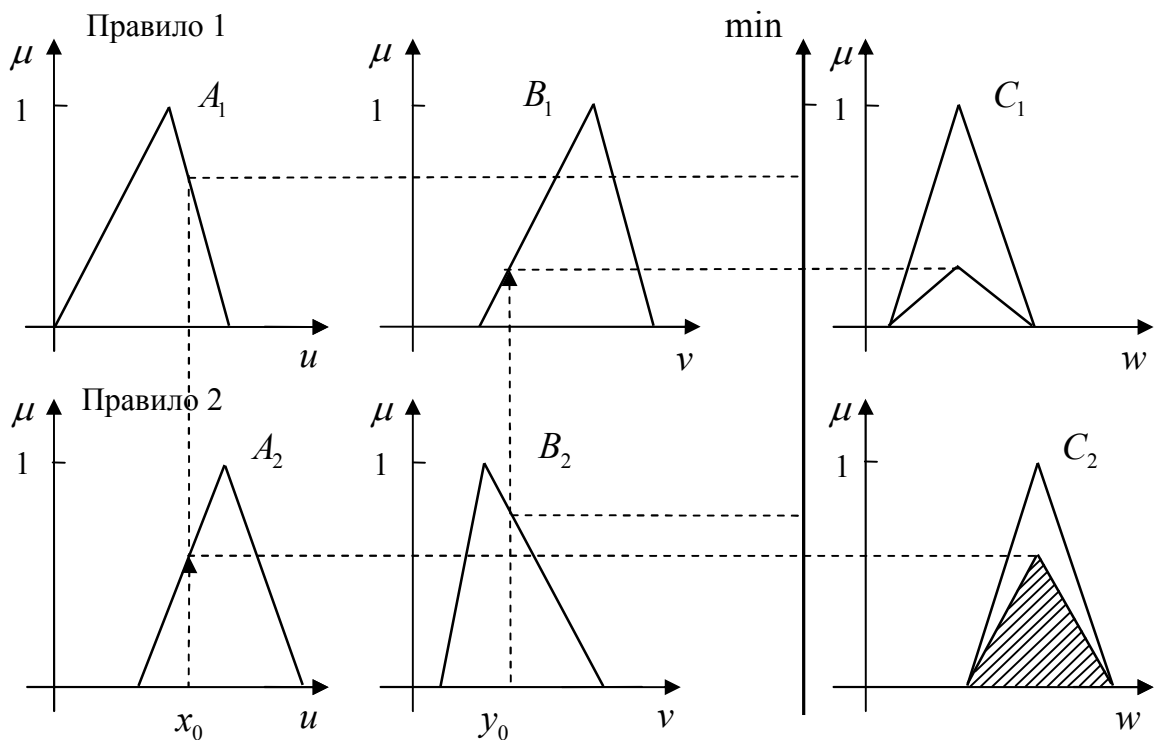


Рисунок Г.6 – Ілюстрація алгоритму Larsen

Г.6. Спрощений алгоритм нечіткого висновку

Початкові правила в даному випадку задаються у вигляді:

P_1 : якщо $x \in A_1$ і $y \in B_1$, тоді $z_1 = c_1$,

P_2 : якщо $x \in A_2$ і $y \in B_1$, тоді $z_2 = c_2$,

де c_1 і c_2 – деякі звичайні (чіткі) числа.

Опис алгоритму

1. Перший етап – як в алгоритмі Mamdani.
2. На другому етапі знаходяться числа $\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0)$,
 $\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$.
3. На третьому етапі знаходиться чітке значення вихідної змінної по формулі

$$z_0 = \frac{\alpha_1 c_1 + \alpha_2 c_2}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad (\Gamma.5)$$

або – в загальному випадку наявності n правил – по формулі

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i c_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}.$$

Ілюстрація алгоритму приведена на рис. Г.7.

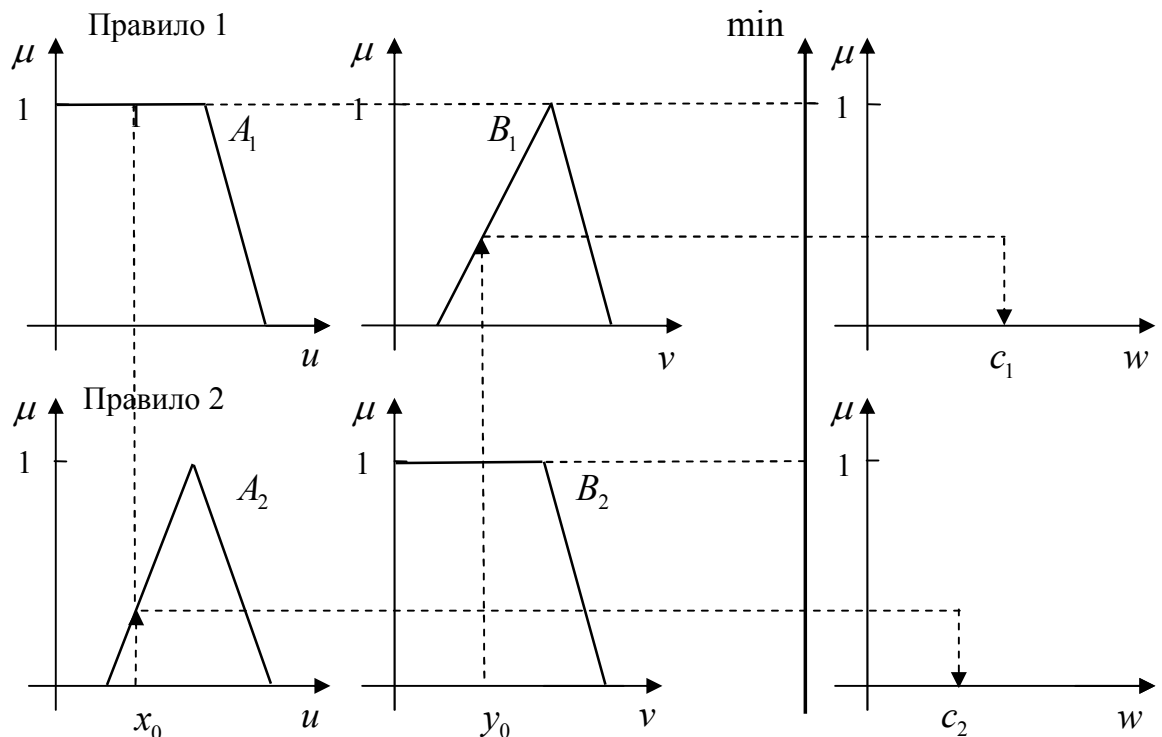


Рисунок Г.7 – Ілюстрація спрощеного алгоритму нечіткого висновку

Г.6. Спрощений алгоритм нечіткого висновку

1. Вище вже був розглянутий один з даних методів – центроїдний. Приведемо відповідні формули ще раз. Для безперервного варіанту:

$$z_0 = \frac{\int_{\Omega} z \mu_{\Sigma}(z) dz}{\int_{\Omega} \mu_{\Sigma}(z) dz}, \quad (\Gamma.6)$$

для дискретного варіанту:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{\Sigma}(z_i) z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{\Sigma}(z_i)}. \quad (\Gamma.7)$$

2. Перший максимум (First-of-Maxima). Чітка величина змінної висновку знаходиться як найменше значення, при якому досягається максимум підсумкової нечіткої множини, тобто (див. рис. Г.8 а)

$$z_0 = \min(z \mid \mu_{\Sigma}(z) = \max_z \mu_{\Sigma}(z)). \quad (\Gamma.8)$$

3. Середній максимум (Middle-of-Maxima). Чітке значення знаходиться по формулі

$$z_0 = \frac{\int_G z dz}{\int_G dz}, \quad (\Gamma.9)$$

де G – підмножина елементів, що максимізували μ_{Σ} (див. рис. Г.8,б).

Дискретний варіант (якщо μ_{Σ} – дискретне):

$$z_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_j. \quad (\Gamma.10)$$

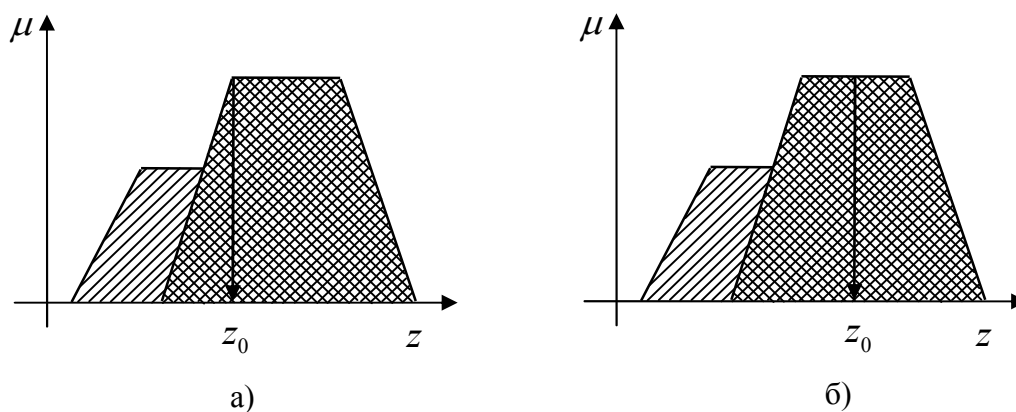


Рисунок Г.8 – Ілюстрація до методів приведення до чіткості:

а) – перший максимум; б) – середній максимум

4. Критерій максимуму (Max-Criterion). Чітке значення вибирається довільно серед безлічі елементів, що доставляють максимум, тобто

$$z_0 \in \{z \mid \mu_{\Sigma}(z) = \max_z \mu_{\Sigma}(z)\}. \quad (\text{Г.11})$$

5. Висотна дефазифікація (Height defuzzification). Елементи області визначення, для яких значення функції приналежності менше, ніж деякий рівень α в розрахунок не приймаються, і чітке значення розраховується по формулі

$$z_0 = \frac{\int_{C_{\alpha}} z \mu_{\Sigma}(z) dz}{\int_{C_{\alpha}} \mu_{\Sigma}(z) dz}, \quad (\text{Г.12})$$

де C_{α} – нечітка множина α – рівня (див. вище).

ДОДАТОК В

ФАЙЛ ВИХІДНИХ ДАНИХ

```
clear;clc;echo on;
```

```
% Система управління електроприводом обертання  
% колеса роторного екскаватора  
% 2024 рік
```

```
% Вихідні дані
```

```
kzv=1.3;  
ks=7.82;  
Tg=1.002;  
Tzc=0.01;  
Te=0.084;  
Re=0.021;  
CF=10.5;  
In=2280;  
Mn=CF*In;  
Jd=775;  
Jm=233;  
b12=0;  
c12=250;  
Js=Jd+Jm;  
Uz=158.6;  
ksx=ks/(CF+ks*kzv);
```

```
% Матриці
```

```
A=[-b12/Jm 1/Jm b12/Jm 0 0;  
-c12 0 c12 0 0;  
b12/Jd -1/Jd -b12/Jd CF/Jd 0;  
0 0 -CF/(Te*Re) -1/Te 1/(Te*Re) ;  
0 0 (CF*ks*Tzc/(Te*Re*Tg)-kzv*ks/Tg) ks*Tzc/(Te*Tg) (-  
ks*Tzc/(Te*Re*Tg)-1/Tg)];  
B=[0 -1/Jm;  
zeros(3,2);  
ks/Tg 0];  
C=zeros(4,5);  
C(1,1)=1;C(2,2)=1; C(3,3)=1;C(4,4)=1;  
D=zeros(4,2);
```