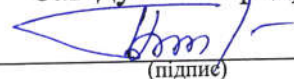


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

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 магістерського рівня вищої освіти

студенту (ці) Віталій ДРОБОТУН
(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 розвороту 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 $Q=4500 \text{ м}^3 \cdot \text{год}$; діаметр роторного колеса $D_p=13 \text{ м}$; бічне зусилля різання $F_b=11,2 \cdot 10^4 \text{ Н}$; питоме зусилля копання $k_f=0,8 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2$; радіус різання $R_0=66 \text{ м}$; кутова швидкість повороту платформи $\omega_{пл}=0,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; маса поворотної платформи $m_{пл}=2450 \cdot 10^3 \text{ кг}$; маса приймальної частини $m_{пч}=310 \cdot 10^3 \text{ кг}$; маса відвальної частини $m_{пч}=320 \cdot 10^3 \text{ кг}$; частота обертання ротора $\omega_p=4,5 \text{ рад/хв}$; момент інерції поворотної платформи $J_{пл}=100 \cdot 10^7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; діаметр роликів $d_{рк}=17 \text{ м}$; діаметр опорних роликів $d_{рк}=1,35 \text{ м}$. Перерегулювання не більше 10%, 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 розвороту 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 регулятором.
5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал) 1. Магістерська кваліфікаційна робота. Формальні ознаки. 2. Розворот екскаватора. Схема кінематична. 3. Нечіткі множини. Функції приналежності. 4. Нечіткі системи. Структурні схеми. 5. Нечіткі системи. Алгоритми нечіткого висновку. 6. Система управління. Перехідні процеси. 7. Двомасова система. Математична модель. 8. Двомасова система. Перехідні процеси. 9. Система з фаззи-регулятором. Структурна схема. 10. Система з фаззи-регулятором. Вікна завдання параметрів. 11. Система з фаззи-регулятором. Перехідні процеси. 12-13. 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


(підпис)

Віталій ДРОБОТУН
(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 розвороту 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)

Віталій ДРОБОТУН
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з: 156 сторінок, 57 рисунків, 2 таблиць, 65 використаних джерел, 4 додатки.

Мета роботи – розробка методів синтезу системи управління електроприводом механізму розвороту 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 нечітких апроксимуючих систем для управління багатомасовою електромеханічною системою механізму розвороту роторного екскаватора. Розроблена система управління координат електроприводу механізму розвороту роторного екскаватора. 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 «УПА» ХНУ ім. В.Н. Каразіна при читанні лекцій, проведенні практичних занять.

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

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

ABSTRACT

An explanatory message consists of: 156 pages, 57 figures, 2 tables, 65 used sources, 4 additions.

The purpose of work is to develop methods for the synthesis of electric drive control system of the turning mechanism of the 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 the unclear approximating systems to control multimass electromechanical system of the turning mechanism of the rotary excavator. The control system of coordinates of electric drive of the turning mechanism of the rotary excavator is worked out. The parameters of the 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 TURNING MECHANISM, 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 Історія виникнення методів нечіткої логіки.....	13
1.2 Фактори, що обумовлюють ефективність використання систем нечіткого висновку в задачах управління	16
1.3 Області застосування нечіткої логіки	17
1.4 Структура систем нечіткого управління	18
1.5 Загальні відомості про роторні екскаватори	21
1.6 Аналіз факторів, які обумовлюють вибір системи управління електроприводом механізму розвороту роторного екскаватора.....	24
1.6 Постановка задачі синтезу нечіткої системи управління електроприводом механізму повороту стріли роторного екскаватора	27
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	32
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ МЕХАНІЗМОМ РОЗВОРОТУ РОТОРНОГО ЕКСКАВАТОРА	32
2.1 Технічні характеристики роторного екскаватора. Вимоги до системи управління.....	30
2.2 Розрахунок потужності і вибір електродвигунів механізму розвороту екскаватора	34
2.3 Розрахунок швидкісної діаграми електроприводу	35
2.4 Побудова діаграми навантаження електроприводу	36
2.5 Перевірка двигунів по нагріву і перевантажувальній здатності.....	44
2.6 Вибір тиристорного перетворювача	45
2.7 Розрахунок статичних характеристик розімкненої і замкненої системи.....	48
2.8 Дослідження динамічних характеристик системи	59
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	75

РОЗДІЛ 3 ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	76
3.1 Математична модель двомасової системи	76
3.2 Розрахунок перехідних процесів двомасової системи	82
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	88
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ З FUZZY РЕГУЛЯТОРОМ.....	89
4.1 Процес нечіткого моделювання в середовищі MATLAB	89
4.2 Побудова і дослідження багатомасової системи з Fuzzy регулятором.....	90
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	110
ВИСНОВКИ	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	114
ДОДАТОК А. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	120
А.1 Визначення нечіткої множини.....	120
А.2 Нечіткість і вірогідність	123
А.3 Функції приналежності нечіткої логіки.....	125
ДОДАТОК Б. ОПЕРАЦІЇ НАД НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ.....	129
Б.1 Логічні операції.....	129
Б.2 Алгебраїчні операції з нечіткими множинами	133
Б.3 Нечіткі відношення.....	136
ДОДАТОК В. НЕЧІТКІ ВИСНОВКИ.....	141
В.1 Порядок формування нечітких висновків	141
В.2 Алгоритм Mamdani.....	147
В.3 Алгоритм Tsukamoto	148
В.4 Алгоритм Sugeno	149
В.5 Алгоритм Larsen	151
В.6 Спрощений алгоритм нечіткого висновку.....	152
В.7 Методи приведення до чіткості	154
ДОДАТОК Г. ФАЙЛ ВИХІДНИХ ДАНИХ.....	156

ВСТУП

Актуальність теми. Гірничодобувна промисловість є однією з ключових сфер економіки країни. Підвищенням продуктивності праці в гірничодобувній промисловості є одним з основних завдань розвитку економіки нашої країни. У зв'язку з цим на відкритих гірських роботах в даний час здійснюється широка програма по технічному переозброєнню і оснащенню виробництва більш довшеною технікою.

Рішення задачі автоматизації технологічного процесу зводиться до автоматизації комплексу механізмів, що забезпечують основний процес. Характерним прикладом може служити сучасний роторний екскаватор. Роторний екскаватор є основною машиною, що входить в технологічний комплекс розробки корисних копалини відкритим способом. Роторні екскаватори відрізняються високою продуктивністю. Робочий рух роторного екскаватора і транспортування виробленої породи або корисного іскопаємого забезпечує ряд механізмів: багатоковшове роторне колесо, що здійснює вироблення ґрунту, механізм підйому стріли з роторним колесом, поворотний пристрій, що дозволяє в процесі вироблення ґрунту повертати стрілу з роторним колесом, механізм ходу, що переміщає екскаватор уздовж забою, транспортує пристрій – система стрічкових конвейєрів, що доставляють породу від роторного колеса до головного конвейєра або на відвал і ін. Індивідуальний електропривод цих механізмів дозволяє успішно автоматизувати всі операції, здійснити автоматичний контроль за протіканням технологічного процесу, усунути можливість завалів, полегшити працю і підвищити його продуктивність.

В даний час накопичений великий досвід проектування, виробництва, експлуатації і модернізації електроприводів основних і допоміжних механізмів роторних екскаваторів. Проте комплексне рішення задачі підвищення ефективності роторних екскаваторів неможливе без вдосконалення систем управління електроприводами. Саме якість систем управління електроприводами визначає можливість реалізації оптимальних режимів роботи механічного устаткування,

забезпечення максимальної продуктивності і безперебійної роботи всіх механізмів. Розробка сучасних систем управління, що забезпечують високу продуктивність роторних екскаваторів, є актуальним завданням.

Сучасні методи синтезу систем автоматичного управління електроприводами дозволяють створювати системи з високими показниками регулювання, але їх реалізація стикається з низкою технічних труднощів. Серед них — необхідність вимірювання важковимірюваних координат, таких як пружний момент, а також обмеження, що не дозволяють реалізувати синтезовані параметри через специфічні умови реальних електроприводів. Вирішенням цієї проблеми може стати заміна лінійних регуляторів нелінійними, які, при меншій кількості вимірюваних координат, забезпечували б потрібну управляючу дію для об'єкта регулювання. Це можливо завдяки впровадженню нечітких систем управління.[1-10].

Математична теорія нечітких множин, розроблена Л. Заде, дозволяє узагальнювати нечіткі концепції і знання, працювати з ними і робити висновки, що мають неоднозначний характер. Методи побудови комп'ютерних нечітких систем, що базуються на цій теорії, значно розширюють сферу використання комп'ютерів. Останнім часом нечітке управління виявляється однією з найбільш активних і ефективних галузей досліджень застосування теорії нечітких множин. Це особливо корисно тоді, коли технологічні процеси стають занадто складними для аналізу за допомогою загальноприйнятих кількісних методів або коли доступна інформація інтерпретується якісно, нечітко або з певним ступенем невизначеності.

Експерименти показали переваги нечіткого управління порівняно з традиційними алгоритмами керування. Нечіткі методи допомагають керувати домашніми пристроями, транспортними засобами, розпізнавати мову та зображення, а також проектувати роботів з здатністю до дотику та зорового сприйняття. Фундамент нечіткої логіки, на якій ґрунтується нечітке управління, близький до людського мислення та природних мов, відрізняючись від традиційних логічних систем. Ця логіка відображає невизначеності й неточності реального

світу, надаючи ефективний спосіб їх відтворення математично. Це дозволяє побудувати модель, що точніше відтворює реальність.

Синтез системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму розвороту роторного екскаватора з високими показниками якості функціонування за допомогою теорії нечітких множин і нечіткої логіки є важливою науково-технічною проблемою, що робить тему дослідження актуальною.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка методів синтезу системи управління електроприводом механізму розвороту роторного екскаватора для підвищення показників якості функціонування системи на основі 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 розвороту 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 розвороту роторного екскаватора з урахуванням пружних елементів.

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

Методи досліджень. Всі теоретичні положення роботи базуються на фундаментальних положеннях теорії автоматичного управління. Методи матема-

тичного 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 магістерської роботи, полягає в наступному.

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

2. Вперше запропонована і синтезована нечітка система управління двомасовою електромеханічною системою механізму розвороту 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 розвороту роторного екскаватора, що має високі показники якості функціонування.

Основні положення магістерської роботи використановуються 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 роботи. 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 156 сторінок, серед них: 40 рисунків за текстом, 17 рисунків на 17 окремих сторінках, 2 таблиці, з яких 1 на 2 повних сторінках, 4 додатки на 37 сторінках, список літературних джерел з 65 найменувань на 6 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Історія виникнення методів нечіткої логіки

У 1965 році була представлена теорія нечітких множин, яка стала новою віхою в інформаційних технологіях. Автором цієї теорії є американський вчений математик, професор університету Каліфорнії Лотфі Заде [11]. Теорія була сприйнята не без децимі скептицизму як в США, так і в наукових колах в усьому іншому світі. Причиною цьому послужило протиріччя цієї теорії логіці самого Аристотеля, якої люди керувалися протягом багатьох століть.

Як відомо, основоположником класичної теорії логіки, що розвивається з давніх часів, є Аристотель. Логіка це дуже сувора, виключно теоретична наука, багато вчених (крім тих, що працюють над сучасними комп'ютерними системами) є прихильниками цієї ідеї. Однак, класична і булева логіка мають великий недолік-їх застосування марно в разі опису мислення людини. Проблема закладена в тому, що тут можливо оперувати лише двома змінними: істина і брехня – середнього немає. Булева логіка - двійкова логіка, яка, порівнюючи два числа, визначає стан системи - також визнає тільки одиниці і нулі. У випадку з обчислювальними машинами з цим не виникає проблем, але опис навколишнього світу виключно двома поняттями практично нерозв'язна задача. Нечітка логіка в силах впоратися з цим завданням.

Лінгвістична змінна - концепція теорії нечітких множин, в якій змінна здатна приймати значення фраз. Наприклад, лінгвістична змінна «тиск» - може мати наступні значення: «екстремальний», «звичайний», «знижений» і т.д. Так описуються фізичні величини, що вимагають більше позицій, ніж тільки 0 або 1. Використовуючи цей підхід, обчислювальні системи можуть працювати з нечіткими визначеннями, що властиво лише людині [11]. Таким чином, визначивши межі тиску для кожного розряду, можна обійти обмеження логіки Аристотеля.

У фундаментальній праці «Нечіткі множини» Лотфі Заде описує це поняття як «Континіум рівня приналежності». Класична теорія передбачає визначення приналежності елемента до даної множини через 0 і 1, де 1 - елемент належить, а 0 - не належить досліджуваного множині. Відповідно до теорії Лотфі Заде функція приналежності грабуються ступінь приналежності елементів множині нечітко. Так, значення 0 означає, що елемент не включений в нечітку множину, 1 описує повністю включений елемент. Значення між 0 і 1 нечітко характеризують включені елементи [12]. У роботі «Основи нового підходу до аналізу процесу складних систем та прийняття рішень» Лотфі Заде, вдаючись до лінгвістичних змінних і композиційним висновків, заснованим на матаппараті теорії нечітких множин, доводить, що такий метод дозволяє сформулювати приблизний, але ще адекватний спосіб опису функціонування нетривіальних нечітких систем, для опису яких неможливо використовувати суворі математичні методики.

Це особливо актуально в дослідженнях, які проводяться в соціогуманітарних областях, і пов'язані з вивченням складного суспільства. Даний термін увійшов в науковий обіг соціологічної науки завдяки Емілю Дюркгейму ще в середині 20 століття. Але, особливий інтерес дослідників до вивчення феномена «складного суспільства» виник на початку 21 століття, так як процеси структурної диференціації продукують значні негативні тенденції в сучасному глобальному суспільстві. Оскільки математичних методів для вимірювання поведінки такої складної системи, як суспільство немає, остільки застосування даного методу на сьогоднішній день є практично єдиним ефективним способом вивчення складної динамічної системи суспільства.

Так, наприклад, в інформатиці нечітка логіка - це набір деяких нежорстких принципів, які з метою досягнення поставлених завдань оперують різними поняттями, припущеннями на інтуїтивній основі або, наприклад, експертними думками в певній сфері знань. Нечіткі судження припускають відмову від жорстких правил. Штучний інтелект, нейронні мережі і експертні системи - найбільш поширені області застосування теорії Л. Заде. Замість стандартних

понять Істина і Брехня тут застосовується більш глобальний набір змінних, де можна знайти: Правда, Неправда, Ймовірно, Часом, Забув, Смутно, Давай спробуємо, Дай мені час, Утримаюся і т.д. Методи нечіткої логіки незамінні в ситуаціях, коли спостерігається чи досліджувана система не має чітких правил функціонування, і тому її поведінку неможливо передбачити стандартними методами.

Подальше формування теорії нечітких множин і нечіткої логіки пропливло завдяки таким публікаціям: «Нечітка логіка – розрахунок і словами» (1996), «Теорія грануляції нечіткої інформації» (1997) і «Від цифрового обчислення до розрахунків словами -маніпуляції розмірами і образами почуттів» (2001), де Л. Заде пише: «Основний внесок нечіткої логіки полягає в розробці методології для проведення розрахунків словами. Поки для цього немає ніякої іншої методології». Через рік після публікації першої роботи по теорії нечітких множин по всьому світу почали свою роботу наукові школи, засновані при істотній допомозі Лотфі Заде.

На завершення слід констатувати факт, що теорія нечіткої логіки професора Лотфі Заде стала важливим досягненням з точки зору розвитку точних наук. Описаний підхід застосовується практично у всіх сучасних ІТ-технологіях, від пральної машини до автоматизованого керування автомобілем. У багатьох європейських країнах методи нечіткої логіки застосовуються для управління технологічними процесами на великих промислових об'єктах. Компанія Matsushita Electric вже давно застосовує методи нечіткої логіки, пристрої під такими відомими брендами, як Panasonic, Technics, National. В наші дні теорія використовується в лінгвістиці, соціології, психології, філософії, економіці, політиці і в інших предметних областях. З розвитком технологій штучного інтелекту теорія знайшла ще більш широке застосування. Експертні системи, здатні частково або повністю замінити людину-фахівця у вирішенні проблемної ситуації, також засновані на методах нечіткої логіки. Побудова моделей наближених людських міркувань відкриває нові можливості в застосуванні технологій штучного інтелекту в робототехніці. У зв'язку з цим, вчені всього світу відзначають, що у методів нечіткої логіки велике майбутнє.

Таким чином, на основі аналізу вище приведених літературних джерел, а також [13-39] можна зробити висновок, що область застосування теорії нечітких множин і нечіткої логіки з кожним роком продовжує неухильно розширюватися. При цьому процес розробки і застосування нечітких моделей тісно взаємозв'язаний з концепцією системного моделювання як найбільш загальною методологією побудови і використання інформаційних моделей складних систем різної фізичної природи.

У додатках А-В 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 в задачах управління динамічними об'єктами і системами базується на наступних результатах.

1. У 1992 р. Wang довів теорему [40]: для кожної речової безперервної функції $G(x)$, заданої на компактi U , і для довільного $\varepsilon > 0$ існує нечітка експертна система, що формує вихідну функцію $F(x)$ таку, що

$$\sup_{x \in U} \|G(x) - F(x)\| \leq \varepsilon, \quad (1.1)$$

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

2. У 1995 р. Castro показав, що логічний контролер Mamdani при певних умовах також є універсальним апроксиматором.

3. Згідно знаменитої теореми FAT (Fuzzy Approximation Theorem), доведеної Б. Коско (B. Kosko) у 1993 році [42], будь яка математична система може бути апроксимована системою, заснованою на нечіткій логіці.

Системи з використанням нечіткої логіки раціонально застосовувати в таких випадках:

1. Для складних процесів, де відсутня проста математична модель.

2. Якщо експертні знання про об'єкт або процес можна виразити лише у лінгвістичній формі.

Слід зазначити, що основні недоліки систем з нечіткою логікою пов'язані з тим, що:

1. Початковий набір постулюючих нечітких правил формулюється експертом-людиною і може бути неповним або суперечливим.
2. Вигляд і параметри функцій належності, які описують вхідні і вихідні змінні системи, вибираються суб'єктивно і можуть не повністю відображати реальну дійсність.

1.3 Області 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 управління 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.

Класичним прикладом такого управління є PID-контролер (пропорційно-інтегрально-диференціальний контролер). Його алгоритм базується на порів-

нянні 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.



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

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

Архітектура або схема нечіткого управління базується на перетворенні традиційної системи управління в систему нечіткого управління, яка використовує системи нечіткого висновку. У цьому випадку модель нечіткого управління (див. Рис. 1.2) створюється з урахуванням усіх етапів нечіткого висновку, а сам процес висновку реалізується за допомогою одного з алгоритмів нечіткого висновку.

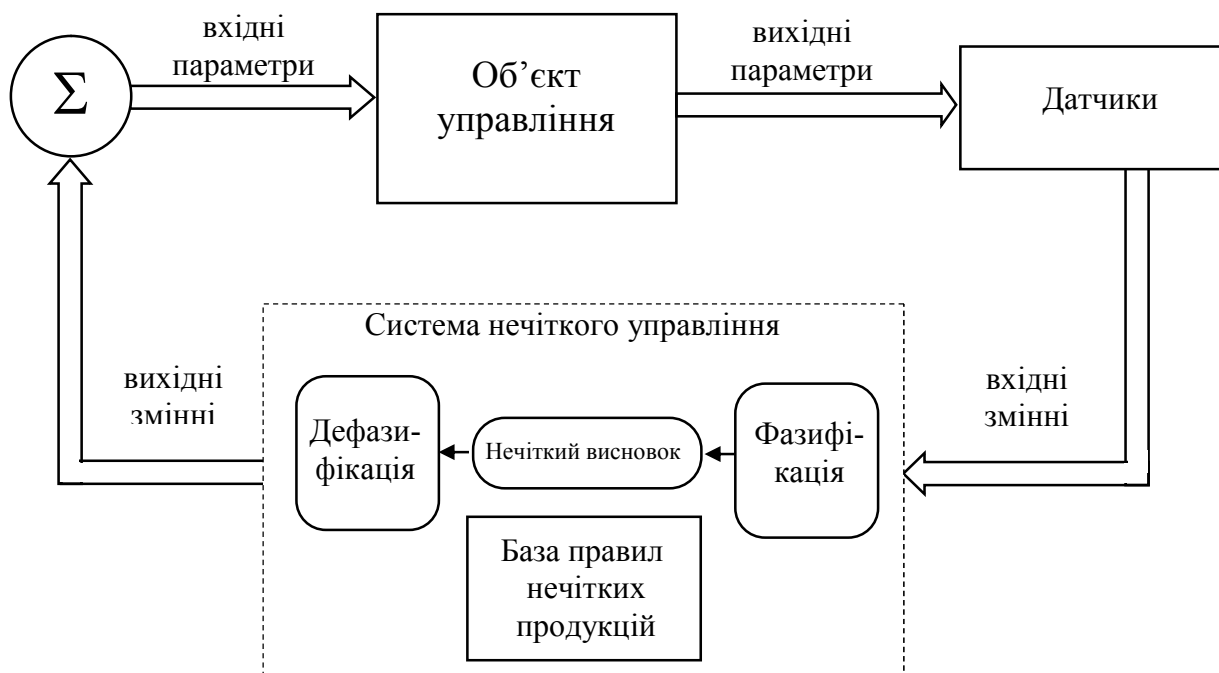


Рисунок 1.2 – Архітектура компонентів процесу нечіткого управління

1.5 Загальні відомості про роторні екскаватори

Основною машиною гірничодобувних комплексів є роторний екскаватор - складний технічний агрегат, який включає понад десять взаємопов'язаних силових механізмів. Він об'єднує робоче та допоміжне обладнання, яке забезпечує доставку розробленої породи до транспортних засобів гірничодобувного комплексу. На рис.1.3 приведена компоновальна схема 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 кромek ковшів і поворотному русі стріли відбувається відділення природи, що поступає на розташований усередині фермової конструкції стріли конвейєр 16.

Потім порода подається в центральну частину екскаватора, де встановлений додрібнюючий пристрій, перетинає площину опорно-поворотного пристрою 1, поступає на конвейєр нижньої частини машини, потім на конвейєр, ро-

зташований 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 підкошувальних, винесених убік, протилежну роторній стрілі, і встановлених на консольній частині будов 8, створюється протидія, компенсуюча перекидаючий момент стріли.

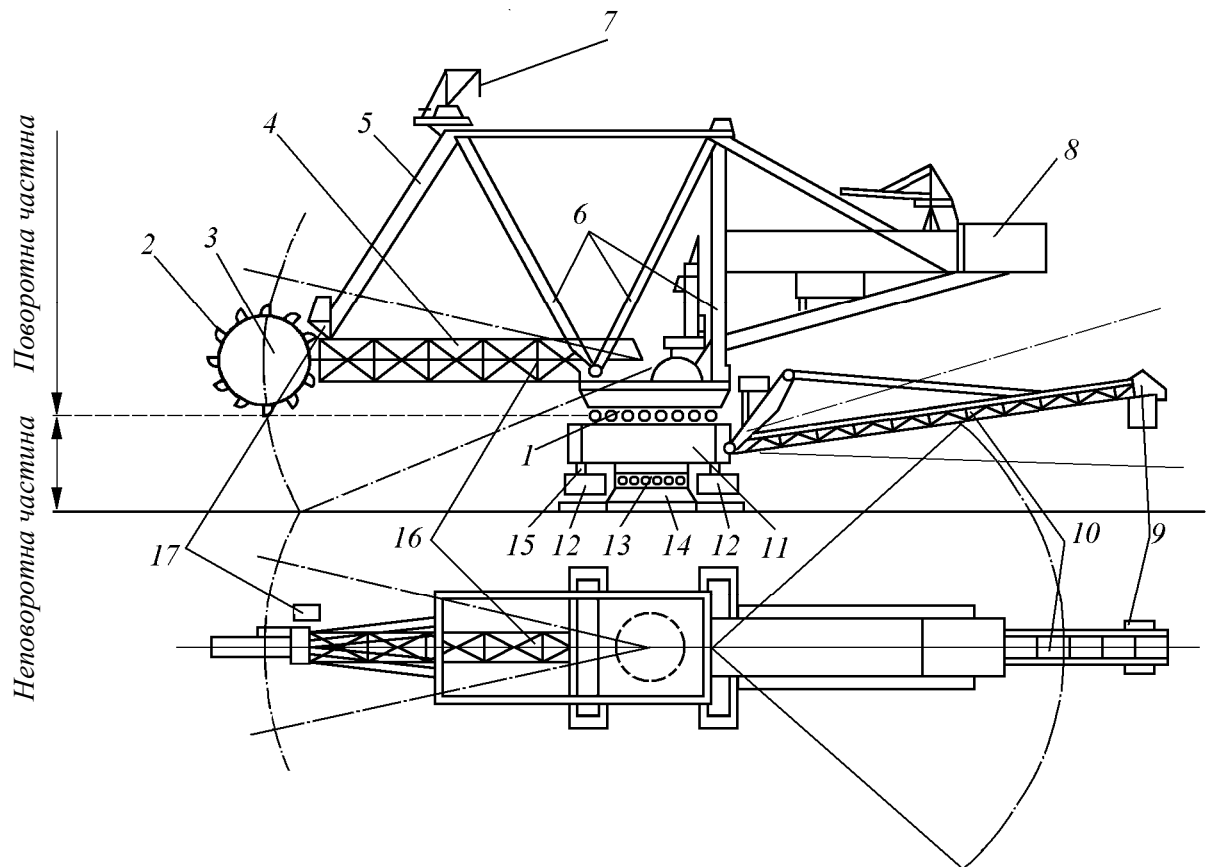


Рисунок 1.3 – Компонувальна схема роторного екскаватора

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 гідродомкрати 15, здатні встановлювати конструкцію з опорною на ґрунт через базу або через шагающе-рейкове устаткування (лижі) Розвантажувальна консоль 10 разом з конвейером може встано-

влюватися 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; механізм 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.

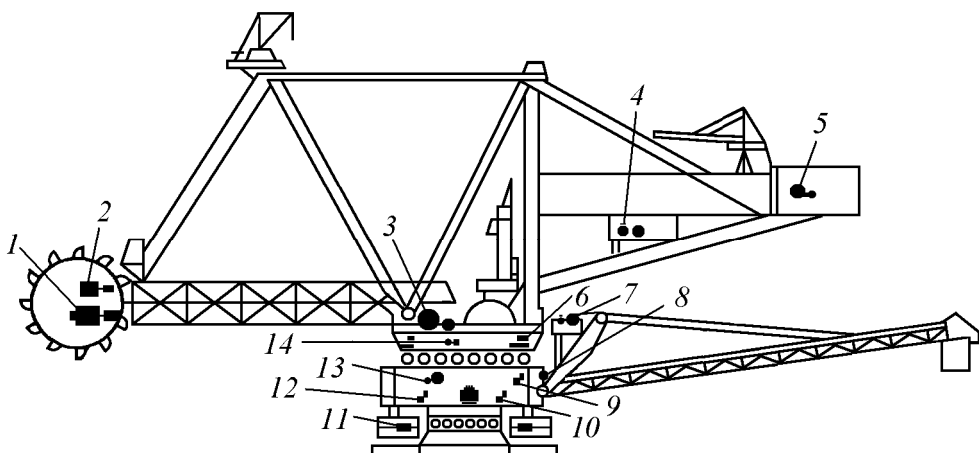


Рисунок 1.4 - Компоновка індивідуальних електроприводів роторного екскаватора

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.

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

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

Переміщення розвантажувальної консолі у вертикальній площині забезпечується електроприводами 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 Аналіз факторів, які обумовлюють вибір системи управління електроприводом механізму розвороту роторного екскаватора

Ефективне використання роторних екскаваторів можливе лише при безперебійному функціональному його механізмів. Відмова в будь-якому з основних електроприводів зв'язана з порушенням технології або повним припиненням розробки ґрунту і веде до простою екскаватора, збитки від якого тим більше, чим більше продуктивність комплексу, тому до електроприводів основних

механізмів роторного екскаватора пред'являються загальні вимоги високий надійності роботи, стабільності характеристик і робочих параметрів.

З одного боку, виконання вказівок вимог можливо про виборі систем електроприводу, схем управління, електричних машин, апаратів і іншої елементної бази, максимально пристосованих до важких умов експлуатації електроустаткування роторних екскаваторів. З іншого боку, для скорочення простоїв екскаватор з вини електроустаткування схеми управління електропроводами не повинні вимагати переналагоджень, повинні забезпечувати можливість швидкого відновлення працездатності окрім загальних вимог до кожного з електропроводів основних механізмів пред'являються специфічні вимоги, які витікають з проведеного вище аналізу функцій механізмів, що виконуються в технологічному процесі, конструктивних особливостей, режимів роботи і характеру навантажень.

Електропривод повороту стріли ротора виконує головний робочий рух, що забезпечує різання ґрунту, – подовжню подачу – і, так само як і електропривод роторного колеса, повинен працювати в тривалому режимі. Електроприводи повороту розвантажувальної консолі і розвороту екскаватора призначені для короткочасних режимів роботи.

Для відробітку забою при кожній заходці необхідна зміна напрямку повороту стріли ротора. Розворот екскаватора, який необхідний для правильної орієнтації машини по відношенню до забою, і поворот розвантажувальної консолі, що забезпечує гнучкість технологічного зв'язку між екскаватором і іншими механізмами комплексу, також вимагають оперативної зміни напрямку обертання електроприводу. Отже, електроприводи опорно-поворотних пристроїв повинні бути реверсивними.

Однією з найважливіших особливостей електромеханічних систем електроприводів повороту стріли ротора і розвороту екскаватора є наявність пружно пов'язаних з платформою інерційних мас стріли ротора з роторним колесом і консолі противаги. Перехідні процеси в таких системах супроводжуються коливаннями, тому від вказаних електроприводів потрібна підвищена плавність

розгону і гальмування з обмеженими на допустимому рівні ривком і прискоренням.

Для виконання цієї вимоги необхідне формування в перехідних процесах оптимальної залежності швидкості від часу $\omega = f(t)$, яка забезпечує мінімізацію динамічних навантажень. Останнє особливо важливе для електроприводу повороту стріли ротора, оскільки його допустимий динамічний момент трохи перевищує статичний момент в режимі різання.

Необхідний діапазон регулювання швидкості електроприводів опорно-поворотних механізмів складає не менше $(3 - 4) : 1$. Він обумовлений для електроприводів повороту розвантажувальної консолі і розвороту екскаватора, з одного боку, з іншого боку, необхідністю отримання великих швидкостей для скорочення часу на виконання вказаних операцій при значних кутах поворотних переміщень.

Навантаження опорно-поворотних механізмів змінюються в досить широкіх межах. Це обумовлено можливим ухилом бази екскаватора і вітрового навантаження, а для електроприводу повороту стріли ротора ще і випадковими змінами бічної сили різання, що становить, що виникають із-за неоднорідності ґрунту, що розробляється. Разом з тим потрібна підтримка постійності заданих робочих швидкостей опорно-поворотних механізмів, особливо для електроприводу повороту стріли ротора, оскільки допустиме відхилення параметрів стружок, що зрізаються, від середнього значення складає $\pm 15\%$. Отже, жорсткість робочої ділянки механічних характеристик електроприводів вказаних механізмів повинна бути достатньо високою.

Разом з тим опорно-поворотні механізми є багатомасовими пружними системами, коливання в яких виникають при змінах як управляючих, так і збудюючих дій. Особливо сильно це виявляється в електромеханічній системі приводу повороту стріли і розвороту екскаватора унаслідок розташування робочого органу на кінці протяжної і пружної стріли. Із-за зміни сили різання швидкість подовжньої подачі може випробовувати значні коливання навіть при абсолютному жорсткій механічній характеристиці електроприводу. Причому електроп-

ривод ефективно не сприятиме загасанню виниклих коливань, оскільки підвищення жорсткості механічної характеристики і стабілізація швидкості електроприводу вимикають його з цього процесу.

Потрібний вибір раціональної динамічної жорсткості робочої ділянки механічних характеристик електроприводів опорно-поворотних механізмів, що забезпечує як підтримку технологічних параметрів в заданих межах, так і ефективне використання демпфуючих властивостей електроприводу.

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 тиристорний перетворювач (система ТП-Д). Для електроприводу механізму розвороту використовуємо систему ТП-Д.

1.6 Постановка задачі синтезу нечіткої системи управління електроприводом механізму повороту стріли роторного екскаватора

Як зазначалося вище, електромеханічна система приводу розвороту роторного екскаватора є багатомасовою пружною системою, в якій виникають коливання при змінах як управляючих, так і збурюючих дій. Загальновживані регулятори не в змозі забезпечити задовільні показники якості функціонування системи.

Традиційні методи управління виявилися дієвими при керуванні менш складними об'єктами та в умовах, коли є достатня інформація про об'єкт. Нейромережеві системи, навпаки, корисні в умовах обмеженої інформації або при високій складності об'єктів. Нечіткі системи займають проміжне положення між цими підходами.

Л. Заде, запропонувавши апарат опису інтелектуальної діяльності, що враховує нечіткість і невизначеність, створив математичний фундамент для теорії нечітких множин і логіки. Це сприяло впровадженню методів нечіткого

управління у практику. Зосередження уваги на практичних застосуваннях нечітких систем породило нові виклики, такі як розробка архітектур комп'ютерів для нечітких обчислень, створення елементів нечітких комп'ютерів та контролерів, засобів розробки, інженерних методів для розрахунків та розробки нечітких систем управління.

Математична теорія нечітких множин дає змогу описувати нечіткі поняття та знання, працювати з ними і здійснювати нечіткі висновки. Нечітке управління є корисним, особливо коли процеси занадто складні для аналізу за допомогою звичайних методів або коли джерела інформації інтерпретуються якісно, неточно або невизначено. Нечітка логіка надає ефективні інструменти для відображення невизначеностей і неточностей реального світу, ближчі до людського мислення та природних мов, ніж традиційні логічні системи.

В даний час нечітке управління (Fuzzy Control, Fuzzy-управління) стоїть у ряду найбільш перспективних інтелектуальних технологій, що дозволяють створювати ефективні системи управління.

Поширення Fuzzy-управління часто визначають наступними чинниками:

1. Особливості систем управління з нечіткою логікою, включаючи малу чутливість до змін параметрів об'єкту управління.
2. Синтез систем управління з нечіткою логікою за допомогою сучасних засобів апаратної та програмної підтримки часто виявляється простішим, ніж у традиційних підходах.

Аналогічно до будь-яких систем управління, існують області, де використання систем із нечіткою логікою є особливо доцільним:

1. Системи регулювання, для яких модель об'єкту управління має лише якісне описання.
2. Розширення традиційних систем регулювання (наприклад, ПІД-регулятори) для вдосконалення їхніх адаптивних властивостей.
3. Моделювання дій людини-оператора.
4. Системи верхнього рівня для організаційного управління.

Застосування нечітких систем управління ґрунтується на наявності невизначеності через відсутність деякої інформації чи складність системи, яку важ-

ко або неможливо описати традиційними методами. Також важливою є наявність якісної інформації про об'єкт, необхідної для коректних впливів на нього.

Метою роботи є синтез нечіткої системи управління механізму розвороту роторного екскаватора, що має високі динамічні характеристики. При цьому об'єкт управління є багатомасовою пружною системою. Система управління повинна забезпечити високоякісне регулювання по задаючій і збурюючій діях при ступінчастому вхідному сигналі з випадковою амплітудою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

Виконати синтез системи регулювання параметрами електроприводу механізму розвороту, розглядаючи об'єкт управління як одномасову систему.

Розробити модель об'єкту управління з урахуванням пружності механічних зв'язків.

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

Виконати моделювання систем і провести аналіз отриманих результатів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Розглянуто фактори, що обумовлюють ефективність використання систем нечіткого висновку 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 разом з елементами теорії нечітких множин, правилами імплікації та нечіткими міркуваннями складають систему нечіткого висновку. Ця система містить множину нечітких правил, базу даних із функціями приналежності, а також механізм висновку і агрегації, що сформований застосованими правилами імплікації. При технічній реалізації вхідні і вихідні сигнали є вимірюваними величинами, які точно відповідають вхідним і вихідним значенням відповідно. Щоб забезпечити взаємодію цих двох видів множин, використовується нечітка система з фузифікатором (який перетворює множину вхідних даних в нечітку множину) на вході і дефузифікатором (який перетворює нечіткі множини в конкретне значення вихідної змінної) на виході. Розглянуті системи нечіткого висновку включають Мамдани-Заде та модель виведення Такагі-Сугено-Канга.

4. Одним з ключових застосувань систем нечіткого висновку є вирішення завдань управління різними об'єктами або процесами. В цьому випадку побудова нечіткої моделі базується на формальному відображенні характеристик сис-

теми у термінах лінгвістичних змінних. Оскільки вхідні та вихідні змінні є ключовими поняттями у системах управління, їх розглядають 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. Виконано аналіз факторів, які обумовлюють вибір системи управління електроприводом механізму розвороту роторного екскаватора. Показано, що однією з найважливіших особливостей електромеханічних систем електроприводів розвороту екскаватора є наявність пружно пов'язаних з платформою інерційних мас стріли ротора з роторним колесом і консолі противаги. Перехідні процеси в таких системах супроводжуються коливаннями, тому від вказаних електроприводів потрібна підвищена плавність розгону і гальмування з обмеженими на допустимому рівні ривком і прискоренням. Традиційні системи управління не можуть забезпечити необхідну якість функціонування системи, тому доцільно застосовувати нечітке управління, яке в даний час є однією з найперспективніших інтелектуальних технологій, що дозволяють створювати високоякісні системи управління.

7. На підставі аналізу технічних вимоги, що пред'являється до електроприводів опорно-поворотних механізмів роторних екскаваторів для електроприводу механізму розвороту вибраний електропривод постійного струму, виконаний за системою ТП–Д.

8. Сформульовано завдання дослідження, яке полягає в розробці не чіткої систем управління багатомасовою електромеханічною системою управління механізмом розвороту роторного екскаватора, що забезпечують високу якість регулювання.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ МЕХАНІЗМОМ РОЗВОРОТУ РОТОРНОГО ЕКСКАВАТОРА

2.1 Технічні характеристики роторного екскаватора. Вимоги до системи управління

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

Таблиця 2.1 – Технічні дані роторного екскаватора

	Параметри	Одиниці вимірю- вання	Позна- чення	Величина
1	Теоретична продуктивність по рих- лій масі	$m^3 \cdot год$	Q	2400
2	Діаметр роторного колеса	m	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	m	R_0	24,1
6	Кутова швидкість повороту платфо- рми	c^{-1}	$\omega_{пл}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
7	Момент площ поворотної платфор- ми, що піддається дії вітру щодо осі обертання	$м^2 \cdot м$	$M_{пв}$	435
8	Швидкість руху транспортної стріч- ки	$м/с$	V_t	3,5
9	Маса поворотної платформи	$кг$	$m_{пл}$	$700 \cdot 10^3$

Продовження таблиці 2.1

	Параметри	Одиниці вимірю- вання	Позна- чення	Величина
10	Маса приймальної частини	кг	$m_{пч}$	$127 \cdot 10^3$
11	Маса відвальної частини	кг	$m_{вч}$	$124 \cdot 10^3$
12	Діаметр роликового круга	м	$D_{кр}$	11
13	Діаметр опорних роликів	м	$d_{тк}$	0,88
14	Момент інерції поворотної платформи	кг · м ²	$J_{пл}$	$20 \cdot 10^7$
15	Частота обертання ротора	рад/хв	ω_p	6
16	Щільність ґрунту	кг/м ³	γ_p	$1,8 \cdot 10^3$
17	Коефіцієнт аеродинамічного опору		$k_{ад}$	1,4
18	Максимально допустиме вітрове навантаження	Па	$\lambda_{вт}$	300
19	Максимально подоланий ухил		γ	10^0
20	Число двигунів механізму повороту		k	2
21	Максимально допустимі прискорення і уповільнення платформи	с ⁻²	$\omega_{пл}$	0,005
22	ККД редуктора роторного колеса		η_p	0,8
23	ККД редуктора механізму повороту		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 при ступінчастій вхідній дії не більше 10%, час регулювання не більше 10 с.

2.2 Розрахунок потужності і вибір електродвигунів механізму розвороту екскаватора

Згідно рекомендаціям, потужність електроприводу розвороту екскаватора складає (0.8-1) потужності електроприводу повороту стріли. Тому визначимо потужність електроприводу повороту і по ній виберемо електродвигуни для розвороту екскаватора.

Заздалегідь потужність двигуна повороту стріли $P_{\text{дп}}$, визначається по формулі

$$P_{\text{дп}} = \frac{1,5 M_{\delta} \omega_{\text{пл}}}{\eta_{\text{п}} k} 10^{-3} \quad (2.1)$$

де M_{δ} - момент обумовлений зусиллями, що виникають на кромках ковшів при копанні, перпендикулярний осі стріли ротора F_{δ}

$$M_{\delta} = F_{\delta} R_{\text{к}} , \quad (2.2)$$

$R_{\text{к}}$ – радіус різання в горизонтальній площині, вимірюваний по кромці ковшів:

$$R_{\text{к}} = R_0 \cos \beta_{\text{с}} . \quad (2.3)$$

$\beta_{\text{с}}$ - кут нахилу стріли ротора по відношенню до горизонталі.

За розрахункове значення моменту M_{δ} приймаємо його максимальне значення, коли $R_0 = R_{\text{к}}$

$$M_{\delta} = M_{\delta \text{max}} = F_{\delta} R_0 , \quad (2.4)$$

$$M_{\delta} = M_{\delta \text{max}} = 3,7 \cdot 10^4 \cdot 24,1 = 89,17 \cdot 10^4 \text{ Нм} .$$

де $\eta_{\text{п}}$ – ККД механізму повороту;

$\omega_{\text{пл}}$ – кутова швидкість повороту платформи;

k – число приводів механізму повороту, рекомендується застосовувати $k = 2$

$$P_{\text{дп}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 89,17 \cdot 10^4 \cdot 2,4 \cdot 10^{-2}}{0,6 \cdot 2} = 26,75 \text{ кВт}.$$

По каталогу вибираємо два двигуни ДВ-808 з наступними технічними даними: номінальна потужність $P_{\text{н}} = 37 \text{ кВт}$; номінальна напруга $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$; номінальна частота обертання $n_{\text{н}} = 575 \text{ об/хв}$; номінальний струм $I_{\text{н}} = 192 \text{ А}$; номінальний струм збудження $I_{\text{зн}} = 1,7 \text{ А}$, число активних провідників якоря $N = 558$; кількість паралельних гілок обмотки якоря $2a = 2$; число полюсів $2p = 4$; опір обмоток при 20°C : обмотки якоря $R_{\text{яд}} = 0,034 \text{ Ом}$, додаткових полюсів $R_{\text{дпд}} = 0,02 \text{ Ом}$, обмотки збудження $R_{\text{зб}} = 102 \text{ Ом}$; тривалість включення $ПВ = 80\%$; номінальний магнітний потік $\Phi_{\text{н}} = 0,0381 \text{ Вб}$; момент інерції двигуна $J_{\text{д}} = 2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $\eta = 89\%$

2.3 Розрахунок швидкісної діаграми електроприводу

Для перевірки правильності попереднього вибору двигуна по методу еквівалентного моменту необхідно побудувати швидкісну і навантажувальну діаграми електроприводу.

Швидкісна діаграма механізму має три ділянки: розгін з граничним прискоренням, рух із сталою швидкістю і гальмування з допустимим уповільненням.

Номінальна швидкість обертання двигуна

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30}, \quad (2.5)$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot 575}{30} = 60,2 \text{ с}^{-1}.$$

Передавальне число механізму

$$i_{\text{п}} = \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{пл}}}, \quad (2.6)$$

$$i_{\pi} = \frac{60,2}{2,4 \cdot 10^{-2}} = 2508.$$

Допустимі величини прискорень і уповільнень платформи $\dot{\omega}_{\text{пл}}$, приведені до валу двигуна

$$\dot{\omega}_{\text{доп}} = \dot{\omega}_{\text{пл}} \cdot i_{\pi}, \quad (2.7)$$

$$\dot{\omega}_{\text{доп}} = 0,005 \cdot 2508 = 12,3 \text{ c}^{-2}.$$

Використовуючи отримані значення, підраховуємо час розгону і уповільнення (гальмування) двигуна

$$t_p = t_r = \frac{\omega_{\text{н}}}{\dot{\omega}_{\text{доп}}}, \quad (2.8)$$

$$t_p = t_r = \frac{60,18}{12,3} = 4,84 \text{ c}$$

Кути повороту, прохідні платформою під час розгону і гальмування:

$$\alpha_p = \alpha_r = \dot{\omega}_{\text{пл}} \frac{t_p^2}{2}, \quad (2.9)$$

$$\alpha_p = \alpha_r = 0,005 \cdot \frac{4,84^2}{2} = 0,0057 \text{ рад}$$

$$\alpha_p = \alpha_r = 0,0057 \text{ рад} = 3,15^\circ$$

Кут повороту платформи за час сталої швидкості:

$$\alpha_y = 2(\alpha_{\pi \text{ max}} - \alpha_p), \quad (2.10)$$

$$\alpha_y = 2 \cdot (1,308 - 0,0058) = 2,55 \text{ рад}$$

$$\alpha_y = 2,54 \text{ рад} = 143,7^\circ$$

Час роботи поворотного механізму із сталою швидкістю:

$$t_y = \frac{\alpha_y \cdot i_{\pi}}{\omega_{\text{н}}} \quad (2.11)$$

$$t_y = \frac{2,55 \cdot 2508}{60,18} = 105,42 \text{ c}.$$

По отриманих результатах на рис. 2.1 побудована швидкісна діаграма механізму повороту роторного екскаватора.

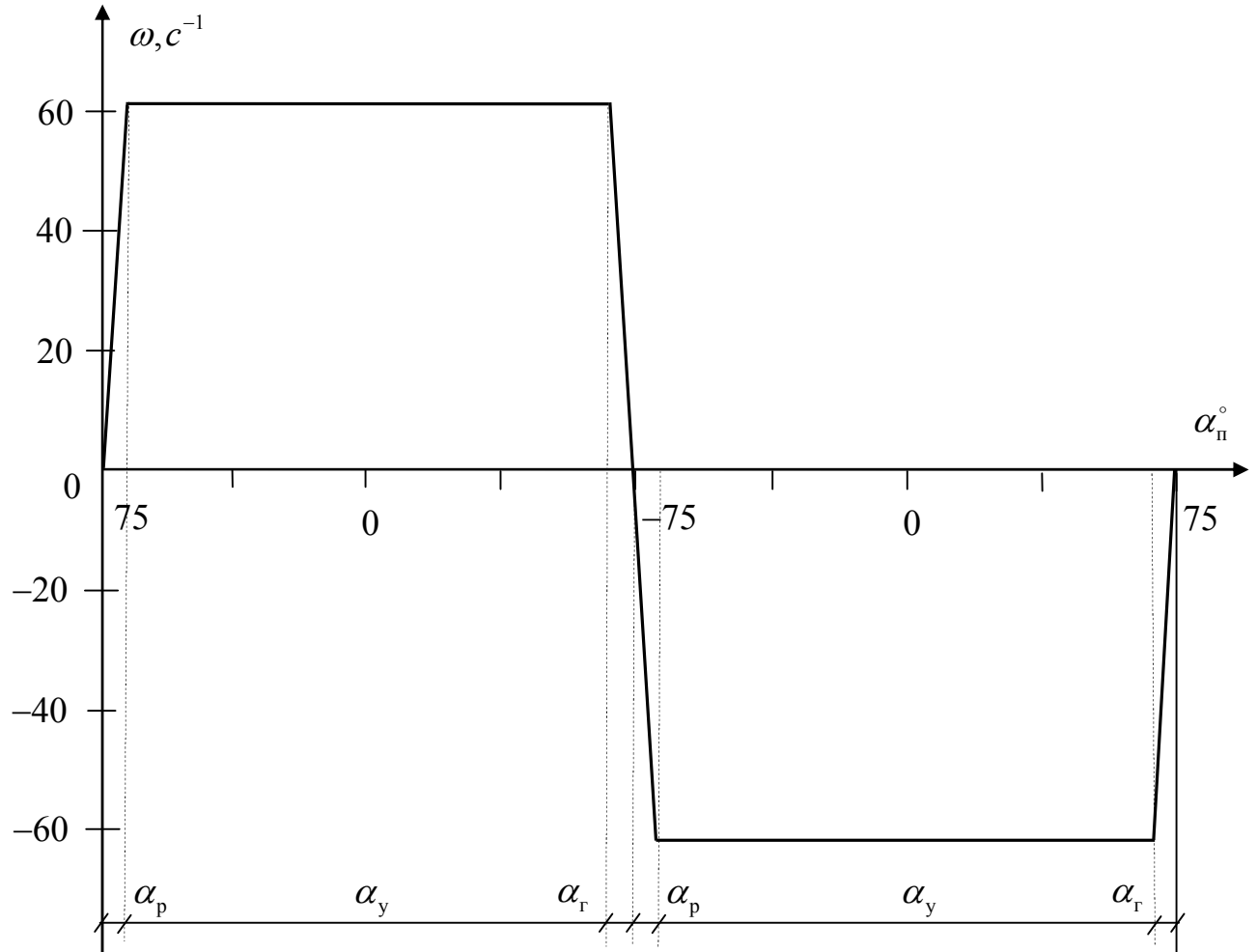


Рисунок 2.1 - Швидкісна діаграма механізму повороту роторного екскаватора.

2.4 Побудова діаграми навантаження електроприводу

Визначимо статичні навантаження, що визначають сумарний момент опору щодо осі обертання поворотної частини екскаватора.

Із-за різних площ конструкції машин, розташованих по різні сторони щодо осі обертання поворотної частини, виникає момент, обумовлений вітровим натиском. При постійності вітрового натиску момент від вітрового навантаження $M_{\text{вт}}, H\cdot m$

$$M_{\text{вт}} = M_{\text{вт max}} \cos \alpha_{\pi} = k_{\text{ад}} \lambda_{\text{вт}} M_{\text{пв}} \cos \alpha_{\pi} \quad (2.12)$$

де $M_{\text{вт max}}$ - максимальний момент від вітрового навантаження (при куті $\alpha_{\pi} = 0$)

$k_{\text{ад}}$ - коефіцієнт аеродинамічного опору;

$\lambda_{\text{вт}}$ - максимально допустиме вітрове навантаження;

$M_{\text{пв}}$ - момент площ поворотної платформи, що піддається дії вітру щодо осі обертання.

$$M_{\text{вт}} = 1,4 \cdot 300 \cdot 435 \cdot \cos \alpha_{\pi} = 18,27 \cdot 10^4 \cdot \cos \alpha_{\pi} \text{ } H \cdot m$$

Момент, що виникає при дії неврівноважених сил тяжіння поворотної частини в результаті відхилення осі обертання від вертикалі на кут γ і повороті стріли на кут α_{π} .

$$M_{\text{нв}} = G_{\text{нв}} R_{\text{цт}} \sin \alpha_{\pi} \sin \gamma \quad (2.13)$$

де $R_{\text{цт}}$ - радіус прикладення неврівноваженої сили тяжіння поворотної частини $G_{\text{нв}}$.

$$G_{\text{нв}} R_{\text{цт}} = g[(m_{\text{пч}} + m_{\text{в пч}}) - m_{\text{вч}}] \frac{L_{\text{пч}}}{3} \quad (2.14)$$

$m_{\text{пч}}, m_{\text{вч}}, m_{\text{в пч}}$ - відповідно маси поворотною, відвальною частин і вантажу, що знаходиться на транспортері приймальної частини

$$m_{\text{в пч}} = \frac{Q \gamma L_{\text{пч}}}{3600 \cdot V_{\text{т}} k_{\text{п}}} ; \quad (2.15)$$

$L_{\text{пч}}$ - довжина транспортера приймальної частини, м, в розрахунку можна прийняти $L_{\text{пч}} = R_0$.

k_p - коефіцієнт розпушування ґрунту, $k_p = 1,1 - 1,5$;

$\gamma_{\text{п}}$ - максимально подоланий ухил,

$$m_{\text{в пч}} = \frac{2400 \cdot 1,8 \cdot 10^3 \cdot 24,1}{3600 \cdot 3,5 \cdot 1,1} = 7,54 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

$$G_{\text{нв}} R_{\text{цт}} = 9,8[(127 + 7,54) - 124] \cdot 10^3 \cdot \frac{24,1}{3} = 863,9 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{нв}} = 863,9 \cdot 10^3 \cdot \sin 10^\circ \cdot \sin \alpha_{\text{п}} = 14,6 \cdot 10^4 \cdot \sin \alpha_{\text{п}} \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент опору обертання від сил тертя

$$M_{\text{тр}} = g(m_{\text{пл}} + m_{\text{в пч}}) \frac{D_{\text{кр}}}{2d_{\text{тк}}} f_{\text{к}} f_{\text{пч}} f_{\text{ек}} \quad (2.16)$$

де $f_{\text{к}}$ - коефіцієнт тертя кочення $f_{\text{к}}$; $f_{\text{к}} = (0,04 - 0,1) \cdot 10^{-2}$ м;

$f_{\text{пр}}$ і $f_{\text{ек}}$ коефіцієнти, що враховують відповідно прослизання роликів циліндрової форми ($f_{\text{пр}} = 1,1 - 1,25$) і ексцентриситет прикладення навантаження ($f_{\text{ек}} = 1,0 - 1,25$).

$$M_{\text{тр}} = 9,8 \cdot (700 + 7,54) \cdot 10^3 \cdot \frac{11}{2 \cdot 0,88} \cdot 0,08 \cdot 10^{-2} \cdot 1,15 \cdot 1,1 = 4,19 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Складові статичного навантаження $M_{\text{вт}}$ і $M_{\text{нв}}$ залежать від кутового положення і носять активний характер (тобто вони можуть сприяти або перешкоджати руху).

Моменти $M_{\text{б}}$ і $M_{\text{тр}}$ є пасивними, вони завжди гальмівні незалежно від напрямку руху.

Приймаємо, що напрям вітру і ухил екскаватора такі, що сумарне статичне навантаження щодо осі поворотної частини для повороту стріли $M_{\text{ст}}$ по і

проти годинникової стрілки, тобто для зміни α_{Π} від -75° до $+75^\circ$ і від $+75^\circ$ до -75° визначається наступним чином:

$$\alpha_{\Pi} = (-75^\circ \div 0) \quad M_{\text{ст}} = |M_{\delta}| + |M_{\text{тр}}| + |M_{\text{вт}}| - |M_{\text{нв}}|; \quad (2.17)$$

$$\alpha_{\Pi} = (0 \div +75^\circ) \quad M_{\text{ст}} = |M_{\delta}| + |M_{\text{тр}}| + |M_{\text{вт}}| + |M_{\text{нв}}|; \quad (2.18)$$

$$\alpha_{\Pi} = (+75^\circ \div 0) \quad M_{\text{ст}} = -(|M_{\delta}| + |M_{\text{тр}}| - |M_{\text{вт}}| - |M_{\text{нв}}|); \quad (2.19)$$

$$\alpha_{\Pi} = (0 \div -75^\circ) \quad M_{\text{ст}} = -(|M_{\delta}| + |M_{\text{тр}}| - |M_{\text{вт}}| + |M_{\text{нв}}|). \quad (2.20)$$

На ділянках розгону і гальмування враховуємо динамічний момент $M_{\text{дин}}$, який складається з $M_{\text{ст}}$ при розгоні і віднімається при гальмуванні

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{м}\Sigma} \cdot \dot{\omega}_{\text{пл}} \quad (2.21)$$

де $J_{\text{м}\Sigma}$ – сумарний момент інерції механізму поворотної платформи і приведені до швидкості обертання платформи моменти інерції двигунів.

$$J_{\text{м}\Sigma} = J_{\text{пл}} + kJ_{\text{д}} i_{\text{п}}^2 \quad (2.22)$$

$J_{\text{пл}}$ – момент інерції поворотної платформи;

$J_{\text{д}}$ – момент інерції одного двигуна

$$J_{\text{м}\Sigma} = 20 \cdot 10^7 + 2 \cdot 2 \cdot 2508^2 = 22,5 \cdot 10^7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$M_{\text{дин}} = 22,5 \cdot 10^7 \cdot 0,005 = 113 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Результуючий момент визначається наступним чином:

$$M_{\text{рез}} = M_{\text{ст}} \pm M_{\text{дин}}. \quad (2.23)$$

Всі результати зводимо в таблицю 2.2. Діаграма навантаження показана на рис.2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок діаграми навантаження

Напрямок руху	Складові моменти, $\times 10^4$	-75°	$-75^\circ + \alpha - 0$	$-75^\circ + \alpha + 0$	-65°	-55°	-45°	-35°	-25°	-15°	-5°	0
По часовій стрільці	M_δ	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17
	$M_{\text{вт}}$	4,84	5,28	5,82	7,63	10,36	12,71	14,79	16,37	17,64	18,03	18,27
	$M_{\text{нy}}$	-13,76	-13,63	-13,63	12,91	-11,67	-10,08	-8,17	-6,02	-3,69	-1,24	0
	M_{mp}	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19
	$M_{\text{ст}}$	83,64	84,39	84,39	87,05	91,12	95,43	99,36	103,08	106,49	109,48	110,79
	$M_{\text{дин}}$	113	113	0	0	0		0	0	0		0
	$M_{\text{рез}}$	196,64	197,39	84,39	87,05	91,12	95,43	99,36	103,08	106,49	109,48	110,79
Проти часової стрільки	M_δ	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17
	$M_{\text{вт}}$	4,84	5,28	5,82	7,63	10,36	12,71	14,79	16,37	17,44	18,03	18,27
	$M_{\text{нy}}$	-13,76	-13,63	-13,63	12,91	-11,67	-10,08	-8,17	-6,02	-3,69	-1,24	0
	M_{mp}	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19
	$M_{\text{ст}}$	-102,51	-101,24	-101,08	-98,02	-94,05	-90,04	-86,11	-82,39	-78,97	-75,98	-74,67
	$M_{\text{дин}}$	-113	-113	0	0	0		0	0	0		0
	$M_{\text{рез}}$	-215,51	-214,24	-101,08	-98,02	-94,05	-90,04	-86,11	-82,39	-78,97	-75,88	-74,67

Продовження таблиці 2.2

Напрямок руху	Складові моменти, $\times 10^4$	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75° – $-\alpha - 0$	75° – $-\alpha + 0$	75°
По часовій стрільці	M_{δ}	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17
	$M_{вт}$	17,99	17,44	16,37	14,79	12,77	10,36	7,63	5,28	5,82	4,844
	$M_{ну}$	5,24	5,62	6,02	8,17	10,08	11,67	12,91	13,63	13,63	13,76
	$M_{тр}$	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19
	$M_{ст}$	113,97	113,86	115,12	115,7	115,58	91,42	87,45	85,78	84,39	82,93
	$M_{дин}$		0	0	0	0	0	0		-113	-113
	$M_{рез}$	11,97	113,86	115,12	115,7	115,58	91,42	87,45	84,39	-13,57	-18,26
Проти часової стрільки	M_{δ}	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17	89,17
	$M_{вт}$	18,03	17,64	16,37	14,79	12,77	10,36	7,63	5,82	5,28	4,8
	$M_{ну}$	5,24	5,62	6,02	8,17	10,08	11,67	12,91	13,63	13,63	13,76
	$M_{тр}$	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19
	$M_{ст}$	-73,5	-71,6	-70,34	-69,77	-69,89	-70,7	-72,18	-73,83	-73,83	-74,29
	$M_{дин}$		0	0	0	0	0	0		113	113
	$M_{рез}$	-73,52	-71,61	-70,34	-69,77	-69,89	-70,7	-72,19	-73,82	39,17	38,71

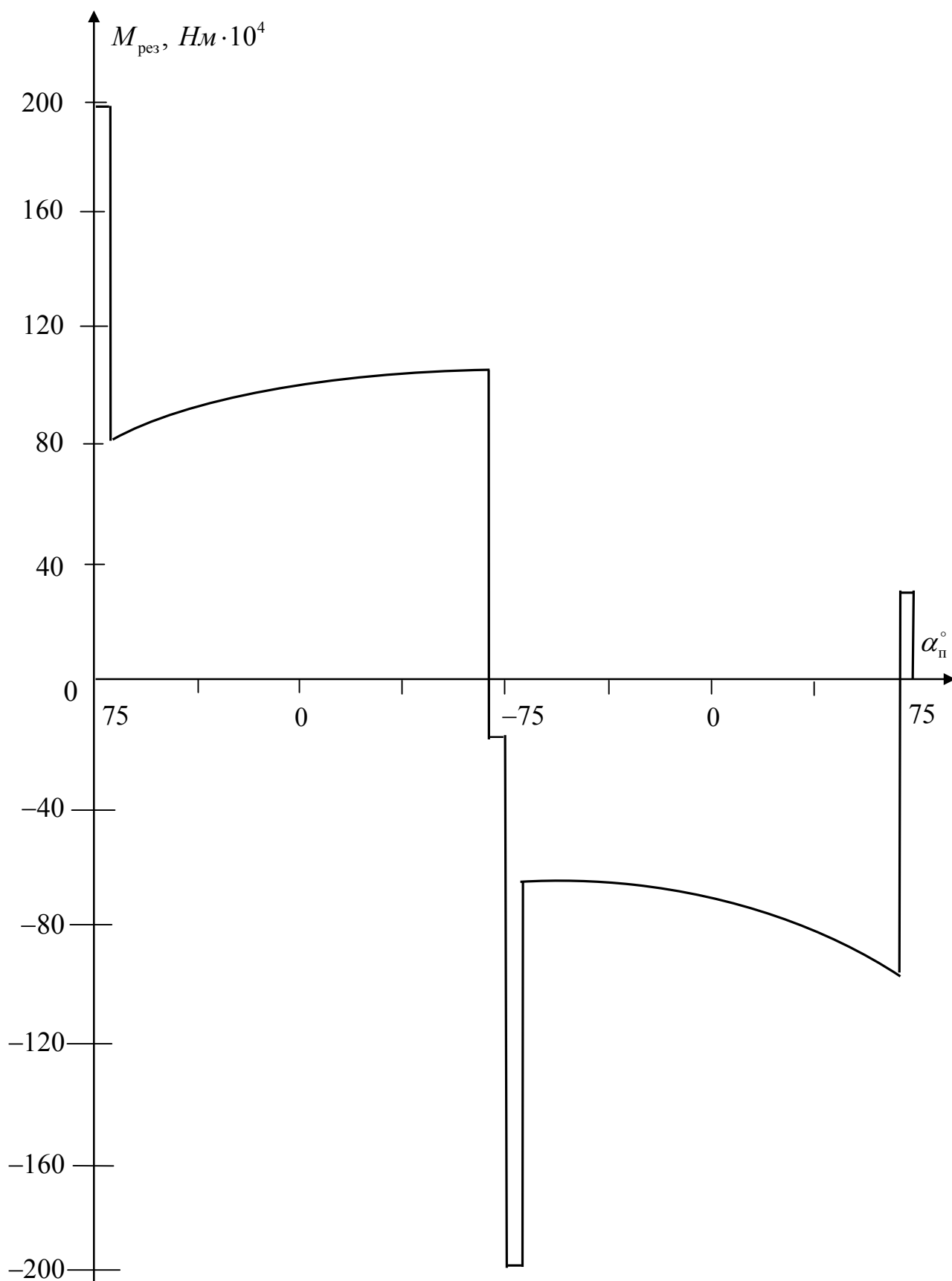


Рисунок 2.2- Навантажувальна діаграм роботи екскаватора

2.5 Перевірка двигунів по нагріву і перевантажувальній здатності

Перевірку двигуна по нагріву виконуємо методом еквівалентного моменту. Для обчислення еквівалентного моменту діаграму навантаження розбиваємо на ділянки з інтервалом часу Δt_i (що відповідає $\Delta \alpha_{\Pi}$) і в межах кожної ділянки визначаємо середнє значення результуючого моменту $M_{\text{рез } i}$.

Еквівалентний момент двигуна визначається з виразу:

$$M_{\text{д екв}} = \frac{1}{\eta_{\Pi} i_{\Pi} k} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_{\text{рез } i}^2 \Delta t_i}{T_{\text{ц}}}}; \quad (2.24)$$

де $T_{\text{ц}}$ - час циклу, тобто час руху в прямому і зворотному напрямі

$$T_{\text{ц}} = 2 \cdot (t_p + t_r + t_y), \quad (2.25)$$

$$T_{\text{ц}} = 2 \cdot (4,84 + 4,84 + 105,42) = 230,2 \text{ с}$$

Підставляючи числові значення з таблиці 2.2 в (2.24), отримаємо

$$M_{\text{д екв}} = 398,72 \text{ Нм}$$

Номінальний момент двигуна

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}, \quad (2.26)$$

$$M_{\text{н}} = \frac{37000}{60,2} = 614,6 \text{ Нм}$$

Оскільки виконується умова: $M_{\text{н}} > M_{\text{д екв}}$, то вибраний двигун за умовами нагріву відповідає вимогам.

Перевіряємо двигуни по перевантажувальній здатності. Максимальний момент, визначений по діаграмі навантаження і приведений до валу двигуна, повинен бути менше, тобто повинно виконуються співвідношення

$$\frac{M_{д \max}}{\eta_{пik}} \leq 2M_{н} \quad (2.27)$$

$$\frac{M_{рез \max}}{\eta_{пik}} = \frac{215,51 \cdot 10^4}{0,6 \cdot 2508 \cdot 2} = 714,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$2 \cdot M_{двн} = 2 \cdot 614,6 = 1229,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Отже, вибраний двигун по перевантажувальній здатності задовольняє вимогам.

2.6 Вибір тиристорного перетворювача

На роторних екскаваторах найбільш широкое використання мають тиристорні перетворювачі типа БУВ і ШУВ, Функціональні схеми цих перетворювачів, які називаються так само станціями управління, показані на рис. 2.3.

Тиристорні перетворювачі складаються з наступних блоків:

ВК – випрямний комплект (для реверсивної схеми їх два: ВКВ і ВКН;

ТОР – токообмежуючий реактор;

А – автоматичний вимикач;

ДТ – датчик току;

БЗ – блок захисту;

СІФУ – система імпульсний-фазового управління;

РП – регулюючий пристрій;

ЛП – логічний пристрій (є тільки в реверсивних ТП);

БП – блок живлення;

В – (вентилятор входить в комплект, якщо охолодження тиристорів примусове).

У реверсивних ТП БУВ і ШУВ використаний принцип роздільного управління комплектами тиристорів, причому для управління ними використовується одна і та ж СІФУ. Дані станції управління призначені для роботи в замкнутих системах управління, що використовують принцип регулювання по ві-

дхиленню координат приводу-напруги, швидкості, струму і т.д. від заданого значення. Відповідно на вхід станції подається сигнал, пропорційний відхиленню, $\Delta U = U_3 - U_{ззш}$ де U_3 – задаюча напруга, пропорційна бажаному значенню регульованої координати, а $U_{ззш}$ – напруга зворотного зв'язку, пропорційна її реальному значенню.

У нереверсивній схемі ΔU подається безпосередньо на вхід РП, основним значенням якого є посилення сигналу ΔU і подача його на вхід СІФУ. При замиканні системи зворотним зв'язком за швидкістю або напрузі підвищується жорсткість робочої частини механічної характеристики. Крім того, замикання САУ електроприводу зворотним зв'язком необхідне для лінеаризації характеристик в зоні переривистих струмів, а також для нормальної роботи реверсивного приводу що має ТП з роздільним способом управління комплектами вентилів.

У даних ТП використовується трифазна реверсивна мостова схема випрямлення, відсутній анодний трансформатор і використовується токообмежуючий реактор.

Вибираємо тиристорний перетворювач ШУВ 3601. Номінальні дані перетворювача: потужність: 147 кВт; випрямлена напруга: 460 В; випрямлений струм: 320 А.

Індуктивність токообмежуючого реактора: $L_{\text{тор}} = 0,174 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

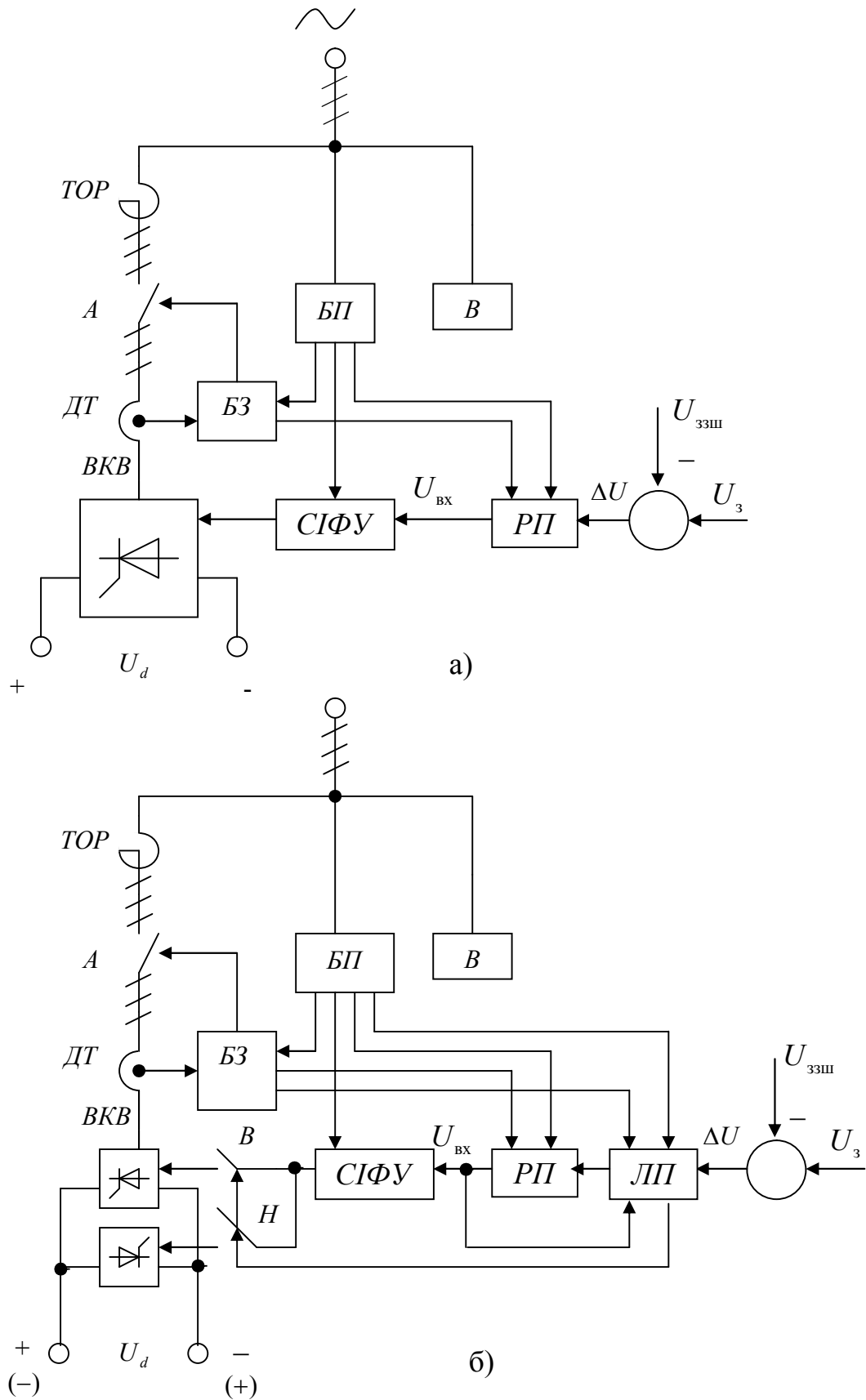


Рисунок 2.3 – Тиристорні станції управління:

а) тип БУВ, б) тип ШУВ.

2.7 Розрахунок статичних характеристик розімкненої і замкненої системи

На рис.2.4 показана схема силового ланцюга системи ТП-Д механізму розвороту екскаватора.

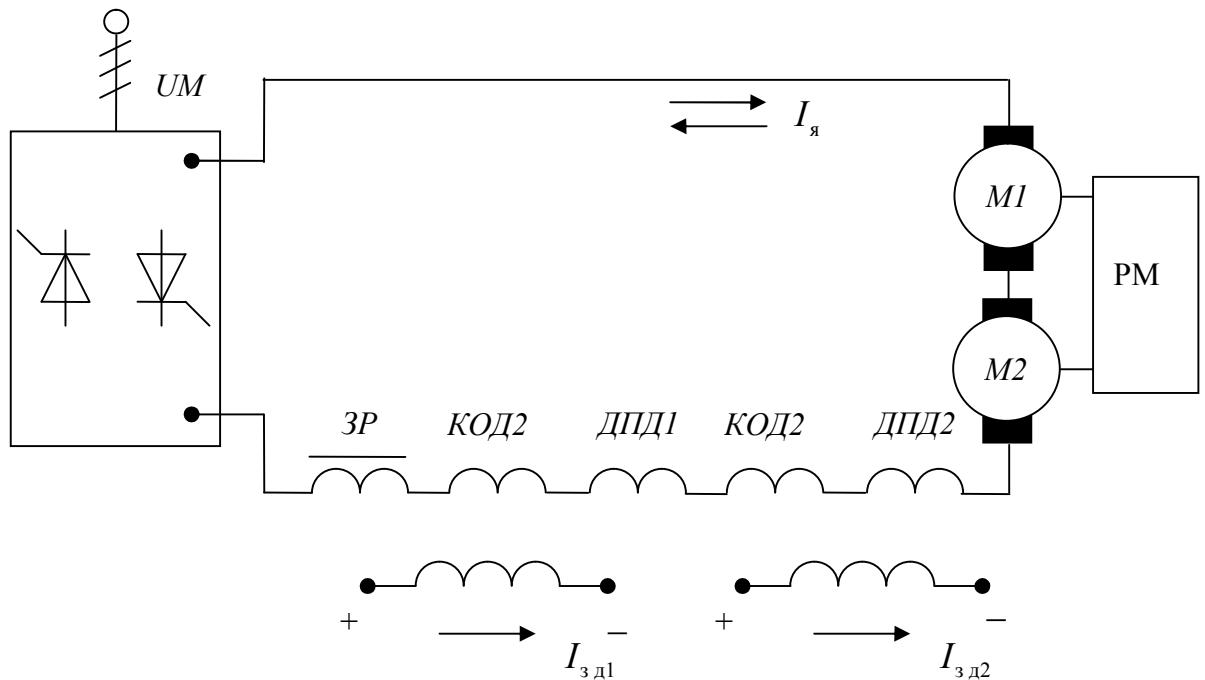


Рисунок 2.4 – Схеми системи ТП-Д

На схемі позначено: UM – підсилювач потужності - тиристорний перетворювач; $ЗР$ – згладжуючий реактор; $РМ$ – робочий механізм; $M1$, $M2$ – привідні двигуни механізму розвороту екскаватора; $ДПД1$, $ДПД2$ – обмотки додаткових полюсів двигунів; $I_{зб\ д1}$, $I_{зб\ д2}$ – струми в обмотках збудження двигунів $M1$, $M2$, $I_я$ – струм якірного ланцюга.

Електропривод механізму розвороту прийнятий двохдвигунним з послідовним включенням якірних обмоток двигунів і тиристорним перетворювачем. Джерелом живлення двигунів є тиристорний перетворювач. ЕДС тиристорного перетворювач позначимо $E_{тп}$.

Визначаємо сумарний активний опір якірного ланцюга електроприводу:

$$R_{я\Sigma} = k \cdot R_{я\Sigma д} + R_{е\ тп} + R_{зр}, \quad (2.28)$$

де $R_{\Sigma д}$ - активний опір якірного ланцюга двигуна;

$$R_{\Sigma д} = k_t (R_{я д} + R_{дп д} + R_{ко д}), \quad (2.29)$$

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

k_t - температурний коефіцієнт $k_t = 1,36$

$$R_{\Sigma д} = 1,36 \cdot (0,034 + 0,02) = 0,0734 \text{ Ом}.$$

$R_{е тп}$ - еквівалентний внутрішній опір тиристорного перетворювача. Еквівалентний внутрішній опір перетворювача тиристора складається з приведенного до ланцюга випрямленого струму активного опору токообмежуючого реактора $R_{тор}$ і еквівалентного опору анодного перекриття

$$R_e = 2mf_1 L_{тор} \quad (2.30)$$

де m – пульсність схеми випрямлення, для трифазної мостової схеми $m = 6$;

f_1 - частота живлячої мережі.

Фактично опір R_e носить не активний, а індуктивний характер, проте явище комутаційного перекриття анодних струмів вентилів приводить до зменшення середнього значення випрямленої напруги, що еквівалентно наявності внутрішнього активного опору перетворювача.

Зазвичай $R_{е тп} \gg R_{тор}$ тому значенням $R_{тор}$ нехтуємо, таким чином $R_{е тп} = R_e$.

$$R_e = 2 \cdot 6 \cdot 50 \cdot 0,174 \cdot 10^{-3} = 104,4 \cdot 10^{-3} = 0,1044 \text{ Ом}.$$

$R_{зр}$ - активний опір включеного в якірний ланцюг згладжуючого реактора ЗР. Питання про включення в якірний ланцюг згладжуючого реактора розглядається нижче.

Сумарна індуктивність якірного кола, $Gн$:

$$L_{я\Sigma} = k L_{яд} + L_T + L_{зр}, \quad (2.31)$$

де $L_{яд}$ - індуктивність якірного ланцюга двигуна;

$$L_{яд} = \gamma \frac{U_n}{I_n \omega_n p}, \quad (2.32)$$

γ - коефіцієнт, рівний $\gamma = 0,25$ для компенсованої машини і $\gamma = 0,6$ для некомпенсованої машини;

U_n , I_n , ω_n - номінальні величини напруги, струму і швидкості двигуна відповідно;

p - число пар полюсів двигуна.

$$L_{яд} = 0,6 \cdot \frac{220}{192 \cdot 60,18 \cdot 2} = 0,0057 \text{ Гн}.$$

L_T - еквівалентна індуктивність токообмежуючого реактора

$$L_T = \frac{m}{3} \cdot L_{\text{тор}}, \quad (2.33)$$

$$L_T = \frac{6}{3} \cdot 0,174 \cdot 10^{-3} = 0,348 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

$L_{зр}$ - індуктивність згладжуючого реактора. Згладжуючий реактор служить для обмеження змінною складової струму якоря. Рівень пульсацій оцінюється значенням основної гармоніки струму, яка дійове значення кого зазвичай вибирається в межах від 2 до 5% номінального струму двигуна.

Для забезпечення заданого рівня пульсацій індуктивність згладжуючого реактора повинна бути, $Gн$:

$$L_{\text{зр}} \geq \frac{\sqrt{2U_d}}{m\omega_1(0,02-0,15)I_H} - L_{\text{яд}} - L_{\text{т}} \quad (2.34)$$

де U_d – значення змінної складової випрямленої напруги.

$$U_d = 0,36 \cdot E_{d0},$$

E_{d0} - максимальне значення ЕДС тиристорного перетворювача при куті управління $\alpha_y = 0$; для мостової схеми випрямлення

$$E_{d0} = 2,34 \cdot U_{\phi}; \quad (2.35)$$

U_{ϕ} - дієве значення фазної напруг, що живить ТП, В.

$$E_{d0} = 2,34 \cdot 220 = 514 \text{ В}$$

$$U_d = 0,36 \cdot 514 = 185 \text{ В}$$

ω_1 - кутова частота живлячої мережі.

$$\omega_1 = 2\pi f, \quad (2.36)$$

$$\omega_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

$$L_{\text{зр}} = \frac{\sqrt{2 \cdot 185}}{6 \cdot 314 \cdot 0,15 \cdot 192} - 0,0057 - 0,000348 = -0,0015 \text{ Гн}$$

Оскільки в правій частині нерівності отримали негативне число, то згладжуючий реактор не ставиться.

Таким чином

$$R_{\text{я}\Sigma} = 2 \cdot 0,07344 + 0,1044 + 0 = 0,2519 \text{ Ом}$$

$$L_{\text{я}\Sigma} = 2 \cdot 0,0057 + 0,348 \cdot 10^{-3} + 0 = 0,0118 \text{ Гн}$$

Рівняння статичних електромеханічної і механічної характеристик електроприводу мають вид:

$$\omega = \frac{E_{\text{тп}}}{k k_{\text{д}} \Phi_{\text{н}}} - I_{\text{я}} \frac{R_{\text{я}} \Sigma}{k k_{\text{д}} \Phi_{\text{н}}} = \omega_0 - \Delta \omega_{\text{ст}} ; \quad (2.37)$$

$$\omega = \frac{E_{\text{тп}}}{k k_{\text{д}} \Phi_{\text{н}}} - M \frac{R_{\text{я}} \Sigma}{k (k_{\text{д}} \Phi_{\text{н}})^2} = \omega_0 - \Delta \omega_{\text{ст}} , \quad (2.38)$$

де M – момент, що розвивається одним двигуном;

k - число двигунів;

$k_{\text{д}}$ – конструктивний коефіцієнт двигуна;

$\Phi_{\text{н}}$ – номінальний магнітний потік двигуна.

Добуток $k_{\text{д}}$ на $\Phi_{\text{н}}$ можна визначити з виразу для природної електромеханічної характеристики двигуна:

$$k_{\text{д}} \Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} R_{\text{я}} \Sigma}{\omega_{\text{н}}} ; \quad (2.39)$$

$$k_{\text{д}} \Phi_{\text{н}} = \frac{220 - 192 \cdot 0,0734}{60,18} = 3,42$$

Підставляючи набуті значення параметрів в рівняння електромеханічної і механічної характеристик, отримаємо

$$\omega_{\text{д}} = \frac{E_{\text{тп}}}{2 \cdot 3,42} - I_{\text{я}} \frac{0,2518}{2 \cdot 3,42} = 0,146 \cdot E_{\text{тп}} - I_{\text{я}} \cdot 0,0367$$

$$\omega_{\text{д}} = \frac{E_{\text{тп}}}{2 \cdot 3,42} - M_{\text{д}} \cdot \frac{0,2518}{2 \cdot (3,42)^2} = 0,146 \cdot E_{\text{тп}} - M \cdot 0,0054.$$

Оскільки характеристики мають вид прямих ліній, то для їх побудови досить визначити координати двох точок, наприклад точки холостого ходу і точки, відповідній номінальному навантаженню. У якості максимального значення

$E_{\text{тп}}$ приймемо подвоєну номінальну напругу електродвигуна, тобто $E_{\text{тп1}} = E_{\text{тп max}} = k U_{\text{н}} = 2 \cdot 220 = 440 \text{ В}$. Будуємо характеристики також при

$$E_{\text{тп2}} = 0,75 \cdot E_{\text{тп max}} = 0,75 \cdot 440 = 330 \text{ В},$$

$$E_{\text{тп3}} = 0,5 \cdot E_{\text{тп max}} = 0,5 \cdot 440 = 220 \text{ В},$$

$$E_{\text{тп4}} = 0,25 \cdot E_{\text{тп max}} = 0,25 \cdot 440 = 110 \text{ В}$$

$$E_{\text{г5}} = 0 \text{ (характеристика динамічного гальмування)}.$$

1 точка – точка ідеального холостого ходу

$$I_{\text{я}} = 0, \quad M = 0$$

$$\omega_{01} = E_{\text{тп1}} \cdot 0,146 = 440 \cdot 0,146 = 64,24 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_{02} = E_{\text{г2}} \cdot 0,146 = 330 \cdot 0,146 = 48,18 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_{03} = E_{\text{тп3}} \cdot 0,146 = 220 \cdot 0,146 = 32,12 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_{04} = E_{\text{тп4}} \cdot 0,133 = 110 \cdot 0,146 = 16,06 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_{05} = 0$$

2 точка – відповідає номінальному режиму

$$I_{\text{я}} = I_{\text{н}} = 192 \text{ А},$$

$$M = M_{\text{н}} = k_{\text{д}} \Phi_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}} = 3,42 \cdot 192 = 656,64 \text{ Нм}$$

$$\omega_1 = 440 \cdot 0,146 - 192 \cdot 0,0367 = 57,19 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_2 = 330 \cdot 0,146 - 192 \cdot 0,0367 = 41,13 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_3 = 220 \cdot 0,146 - 192 \cdot 0,0367 = 25,07 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_4 = 110 \cdot 0,146 - 192 \cdot 0,0367 = 9,01 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_5 = 0 \cdot 0,146 - 192 \cdot 0,0367 = -7,046 \text{ c}^{-1}$$

Графіки електромеханічних і механічних характеристик розімкненої системи приведені на рис. 2.5 (пунктирні прямі). Для від'ємних значень напруги характеристики являються симетричними відносно початку координат.

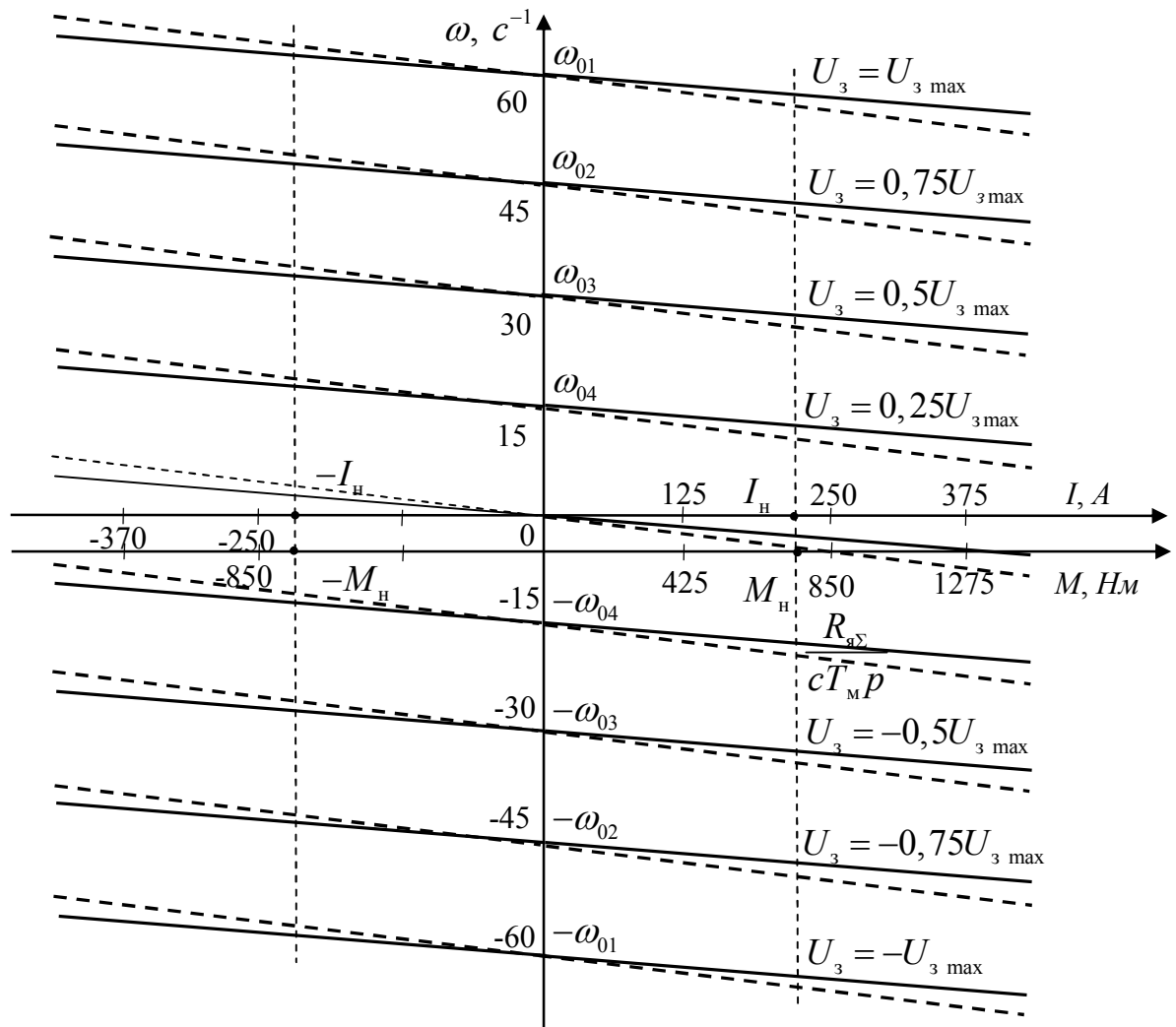


Рисунок 2.5 – Механічні і електромеханічні характеристики розімкненої (пунктирні лінії) і замкнутої (суцільні лінії) системи

До електроприводів більшості основних механізмів роторних екскаваторів пред'являються підвищені вимоги відносно жорсткості робочої частини механічної характеристики і обмеження максимального значення моменту, що розвивається. Забезпечити вказані вимоги можна тільки в замкнутих САУ електроприводом. На рис. 2.6 зображена функціональна схема вживаної на роторних екскаваторах САУ, яка має один зворотний зв'язок – по напрузі ТП. На схемі для спрощення подальших досліджень показаний один еквівалентний двигун.

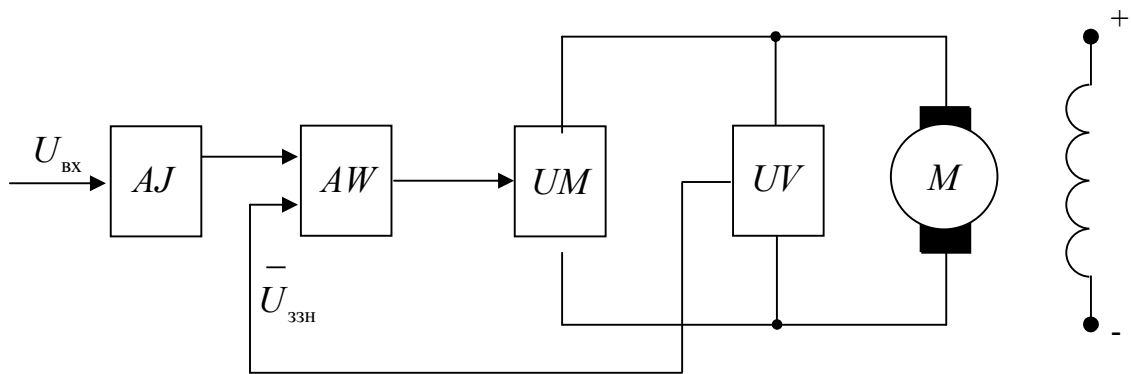


Рисунок 2.6 – Функціональна схема системи

Рівняння статичної електромеханічної характеристики системи має вид :

$$\omega = U_3 \frac{k_\Sigma / (k c)}{1 + k_\Sigma k_{33H}} - I_\text{я} \left(\frac{R_{\Sigma}}{k c} - \frac{R_{\text{епр}} k_\Sigma k_{33H} / (k c)}{1 + k_\Sigma k_{33H}} \right) = \omega_0 - \Delta \omega_{\text{ст1}} \quad (2.40)$$

де $k_\Sigma = k_{AW} \cdot k_{ТП}$ – сумарний коефіцієнт посилення, рівний добутку коефіцієнтів посилення k_{AW} суматора AW і тиристорного перетворювача $k_{ТП}$.

Коефіцієнт посилення суматора приймаємо $k_{AW} = 0,3$.

Коефіцієнт посилення тиристорного перетворювача, для синусоїдальної напруги порівняння з амплітудою U_M приблизно можна визначити як

$$k_{ТП} = \frac{E_{d0}}{U_M}. \quad (2.41)$$

Приймаємо $U_M = 15 \text{ В}$.

$$k_{\text{тп}} = \frac{514}{15} = 34,2$$

$$k_{\Sigma} = 0,3 \cdot 34,2 = 8,89$$

c - коефіцієнт, визначуваний як

$$c = k_{\text{д}} \Phi_{\text{н}} = 3,42.$$

$k_{\text{ззп}}$ - коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі, величину $k_{\text{ззп}}$ слід визначити виходячи з необхідного статичного перепаду швидкості $\Delta\omega_{\text{ст1}}$ при номінальному струмі двигуна:

$$\Delta\omega_{\text{ст1}} = I_{\text{н}} \left(\frac{R_{\text{я}\Sigma}}{k c} - \frac{R_{\text{епр}} k_{\Sigma} k_{\text{ззп}} / (k c)}{1 + k_{\Sigma} k_{\text{ззп}}} \right), \quad (2.42)$$

звідки

$$k_{\text{ззп}} = \left(\frac{I_{\text{н}} R_{\text{я}\Sigma} / (k c) - \Delta\omega_{\text{ст1}}}{k_{\Sigma} \Delta\omega_{\text{ст1}} + I_{\text{н}} k_{\Sigma} \cdot R_{\text{епр}} / (k c)} \right). \quad (2.43)$$

Значення $\Delta\omega_{\text{ст1}}$ приймаємо рівним половині $\Delta\omega_{\text{ст}}$ в розімкненій системі. Після визначення $k_{\text{ззп}}$ слід проаналізувати можливість його фізичної реалізації в розробленій схемі. Величину необхідно визначити з умови отримання при $U_{\text{з max}}$ швидкості ідеального холостого ходу розімкненої системи при $E_{\text{тп}} = k \cdot U_{\text{н}}$

$$\omega_0 = U_{\text{з max}} \frac{k_{\Sigma} / (k c)}{1 + k_{\Sigma} k_{\text{ззп}}} = \frac{U_{\text{н}}}{c}. \quad (2.44)$$

$$\Delta\omega_{\text{ст}} = I_{\text{н}} \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{k k_{\text{д}} \Phi_{\text{н}}},$$

$$\Delta\omega_{\text{ст}} = 192 \cdot \frac{0,2519}{2 \cdot 3,42} = 7,046$$

$$\Delta\omega_{\text{ст1}} = \frac{1}{2} \cdot \Delta\omega_{\text{ст}} = \frac{1}{2} \cdot 7,046 = 3,523$$

$$k_{33H} = \frac{(192 \cdot 0,2512) / 2 \cdot 3,42 - 3,523}{8,89 \cdot 3,523 + (192 \cdot 8,89 \cdot 0,1044) / (2 \cdot 3,42)} = 0,07$$

$$U_{3 \max} = \frac{U_H (1 + k_{\Sigma} k_{33H})}{k_{\Sigma} / k} \quad (2.45)$$

$$U_{3 \max} = \frac{220 \cdot (1 + 8,89 \cdot 0,07)}{8,89 / 2} = 80,3 \text{ В}$$

Рівняння електромеханічної характеристики замкнутої системи

$$\omega = U_3 \frac{8,89 / (2 \cdot 3,42)}{1 + 8,89 \cdot 0,07} - I_{\text{я}} \left(\frac{0,2519}{2 \cdot 3,42} - \frac{0,1044 \cdot 8,89 \cdot 0,07 / (2 \cdot 3,42)}{1 + 8,89 \cdot 0,07} \right) =$$

$$= U_3 \cdot 0,802 - I_{\text{я}} \cdot 0,0183.$$

Використовуючи дану залежність, будуюмо електромеханічні і механічні характеристики при $U_{31} = U_{3 \max}$, а також же при

$$U_{32} = 0,75 \cdot U_{3 \max} = 0,75 \cdot 80,3 = 60,23 \text{ В},$$

$$U_{33} = 0,5 \cdot U_{3 \max} = 0,5 \cdot 80,3 = 40,15 \text{ В},$$

$$U_{34} = 0,25 \cdot U_{3 \max} = 0,25 \cdot 80,3 = 20,1 \text{ В}$$

$$U_{35} = 0 \text{ (характеристика динамічного гальмування)}.$$

Характеристики замкнутої системи будуюмо також по двох точках: ідеального холостого ходу і номінальної.

1 точка- точка ідеального холостого ходу

$$I_{\text{я}} = 0, \quad M = 0.$$

$$\omega_{01} = 80,3 \cdot 0,802 = 64,2 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_{02} = 60,23 \cdot 0,802 = 48,2 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_{03} = 40,15 \cdot 0,802 = 32,1 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_{02} = 20,1 \cdot 0,802 = 16,05 \text{ c}^{-1}$$

2 точка – відповідає подвійному номінальному навантаженню

$$I_{\text{я}} = 192 \text{ A}, \quad M = M_{\text{н}} = 656,64 \text{ Нм}$$

$$\omega_1 = \omega_{01} = 80,3 \cdot 0,802 - 192 \cdot 0,0183 = 60,68 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_2 = 60,23 \cdot 0,802 - 192 \cdot 0,0183 = 44,68 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_3 = 40,15 \cdot 0,802 - 192 \cdot 0,0183 = 28,57 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_4 = 20,1 \cdot 0,802 - 192 \cdot 0,0183 = 12,53 \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_5 = 0 \cdot 0,802 - 192 \cdot 0,0183 = -3,523 \text{ c}^{-1}$$

Графіки електромеханічних і механічних характеристик замкнутої системи для додатних та від'ємних значень напруги завдання приведені на рис.2.5 (суцільні лінії).

2.8 Дослідження динамічних характеристик системи

Для дослідження динамічних характеристик системи складаємо алгоритмічну схему, показану на рис.2.7. Дана схема відповідає функціональній схемі

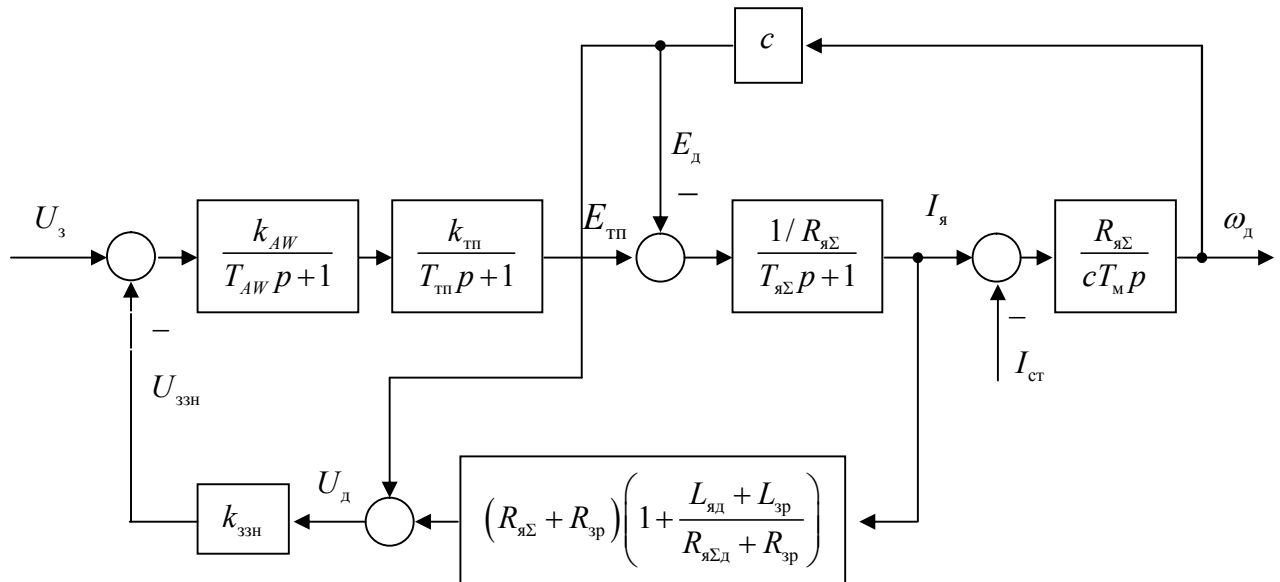


рис. 2.6.

Рисунок 2.7 – Алгоритмічна схема системи автоматичного управління електроприводом ТП-Д

Шляхом еквівалентних перетворень дану схему можна перетворити до алгоритмічної схеми, показаної на рис.2.8, яка відповідає системі Г-Д, детально описаної в [44].

На схемі прийняті наступні позначення.

Коефіцієнта посилення ланцюга зворотного зв'язку за швидкістю

$$k_{33\text{III}} = k_{33\text{II}} \quad k \quad c. \quad (2.46)$$

Постійна часу ланцюга гнучкого зворотного зв'язку по струму

$$T_{33T} = k_{33H} (k L_{\text{яд}} + L_{3p}). \quad (2.47)$$

Впливом жорсткого ЗЗ по струму, що виникає за рахунок присутності в сигналі $U_{\text{ЗЗН}}$ величини $k_{\text{ЗЗН}} (k R_{\Sigma \text{Д}} + R_{\text{ЗР}}) I_{\text{я}}$, яка викликає деяке зменшення жорсткості механічної характеристики і трохи позначається на динаміці, можна нехтувати.

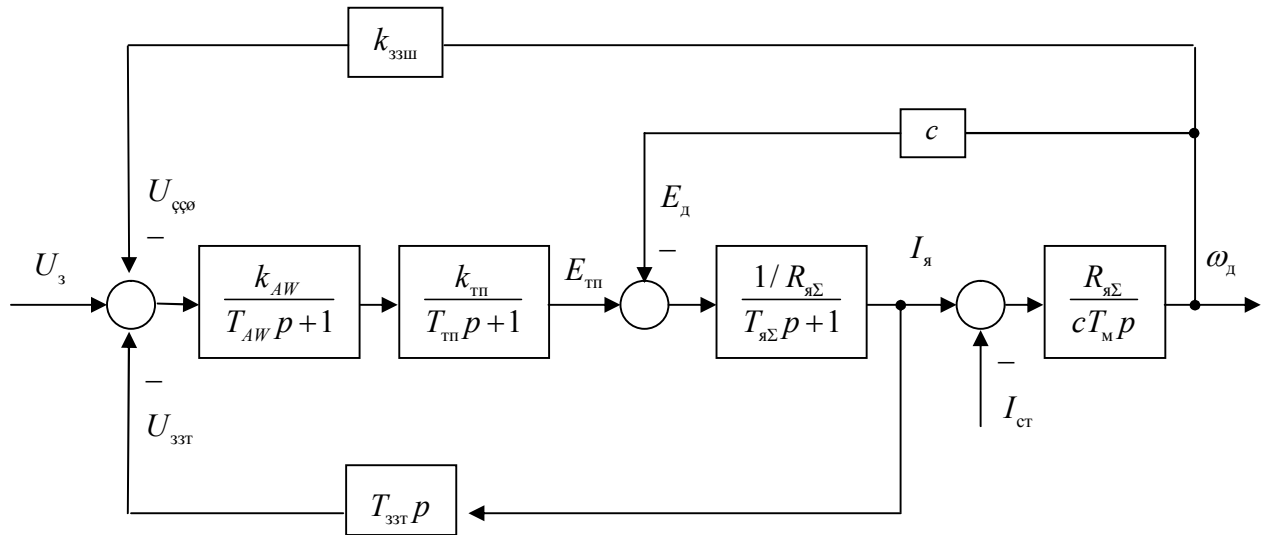


Рисунок 2.8 – Перетворена алгоритмічна схема САУ

По відношенню до системи Г-Д динаміка системи ТП-Д має істотні відмінності, пов'язані з незрівнянно вищою швидкістю ТП. З метою обмеження динамічних навантажень в конструкціях і механізмах екскаваторів управління проводиться через задатчик інтенсивності AJ . Можливості настройки якості перехідних процесів в заданій структурі САУ обмежені, оскільки можна варіювати тільки один ЗЗ по напрузі ТП, яка одночасно впливає на статичні і динамічні характеристики приводу. Зазвичай приймають невеликі значення $k_{\text{ЗЗН}}$, що декілька знижує жорсткість статичної характеристики, проте сприятливо впливає на динаміку системи. У попередньому розділі розрахунок статичних характеристик був проведений для величини $k_{\text{ЗЗН}} = 0,7$. Надалі проведемо розрахунок динамічних характеристик системи для декількох значень $k_{\text{ЗЗН}}$ і виберемо значення, при якому показники якості перехідних процесів найкращі.

З огляду на те, що суматор AW виконаний на операційних підсилювачах, його постійною часу T_{AW} , вимірюваною мікросекундами, нехтуємо.

Тоді передатні функції напівпровідникових суматорів AW і тиристорного перетворювача можна об'єднати в одну еквівалентну ланку з передавальною функцією

$$W_1(p) = \frac{k_\Sigma}{T_{\text{тп}}p + 1}, \quad (2.48)$$

де $k_\Sigma = k_{AW} \cdot k_{\text{тп}}$

Отримаємо алгоритмічну схему, зображену на рис.2.9.

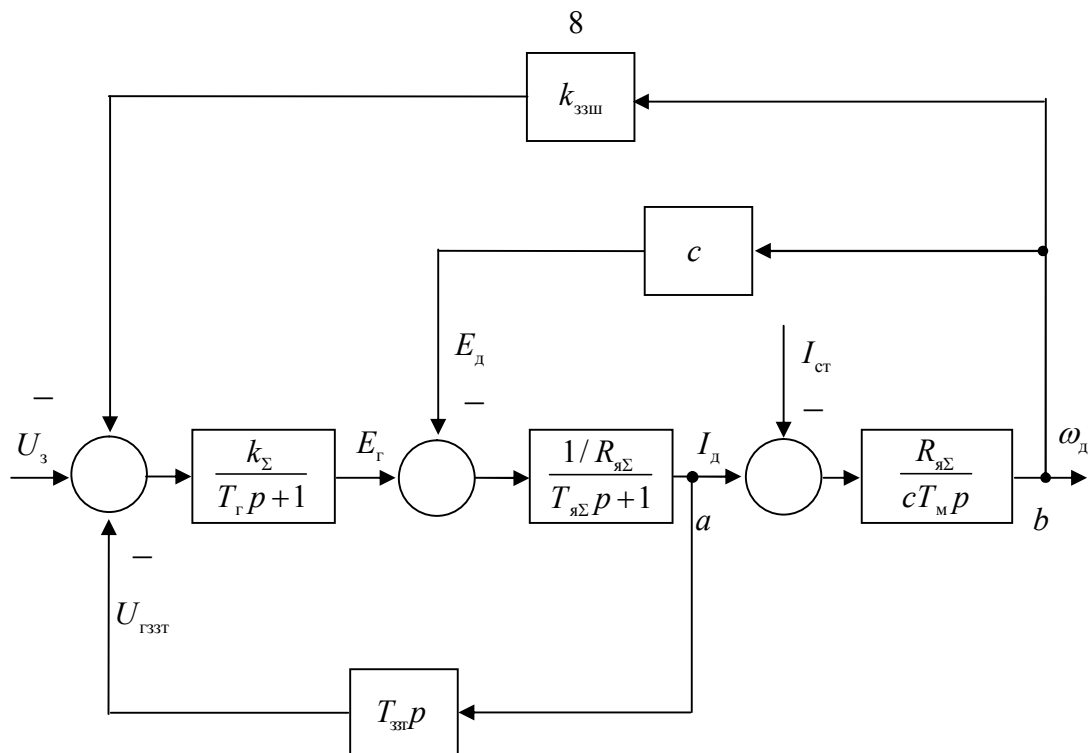


Рисунок 2.9 – Перетворена алгоритмічна схема системи автоматичного управління електроприводу Г-Д

Для дослідження динамічних системи отримаємо передатні функції системи по задаючій і збурюючій діях.

Алгоритмічна схема для одержання передавальної функції швидкості по задаючій дії $W_{\omega_d U_3}(p) = \frac{\omega_d(p)}{U_3(p)} \quad (I_{\text{ст}} = 0)$ показана на рис. 2.10, на якому пронумеровані від 1 до 6 всі передатні функції, що складають алгоритмічну схему

$$W_1(p) = \frac{k_\Sigma}{T_\Gamma p + 1}; \quad W_2(p) = \frac{1/R_{я\Sigma}}{T_{я\Sigma} p + 1}; \quad W_3(p) = \frac{R_{я\Sigma}}{c T_M p}; \quad (2.49)$$

$$W_4(p) = c = \frac{1}{k_d}; \quad W_5(p) = T_{ззт} p; \quad W_6(p) = k_{ззш}. \quad (2.50)$$

В передавальній функції $W_4(p)$ прийнято позначення $k_d = \frac{1}{c}$ – коефіцієнт посилення двигуна.

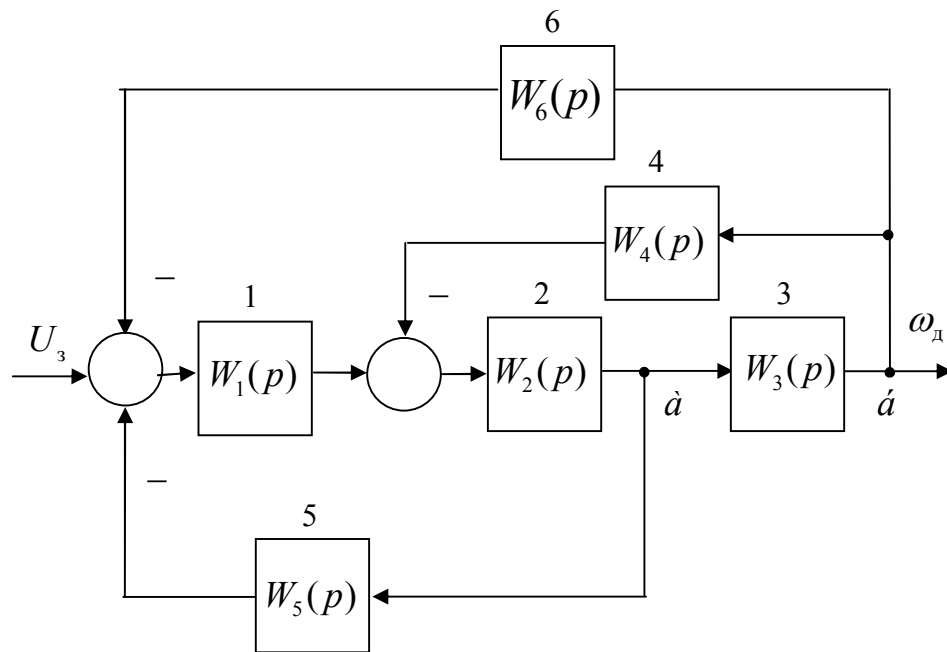


Рисунок 2.10 – Алгоритмічна схема для визначення

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

Перемикаємо зворотний зв'язок по струму з точки a в точку b , включаючи при цьому в зворотний зв'язок ланку з передатною функцією

$$W_9(p) = \frac{1}{W_5(p)} = \frac{c T_M p}{R_{я\Sigma}}. \quad (2.51)$$

Отримаємо алгоритмічну схему, показану на рис.2.11 із зворотними зв'язками, що не перехрещуються.

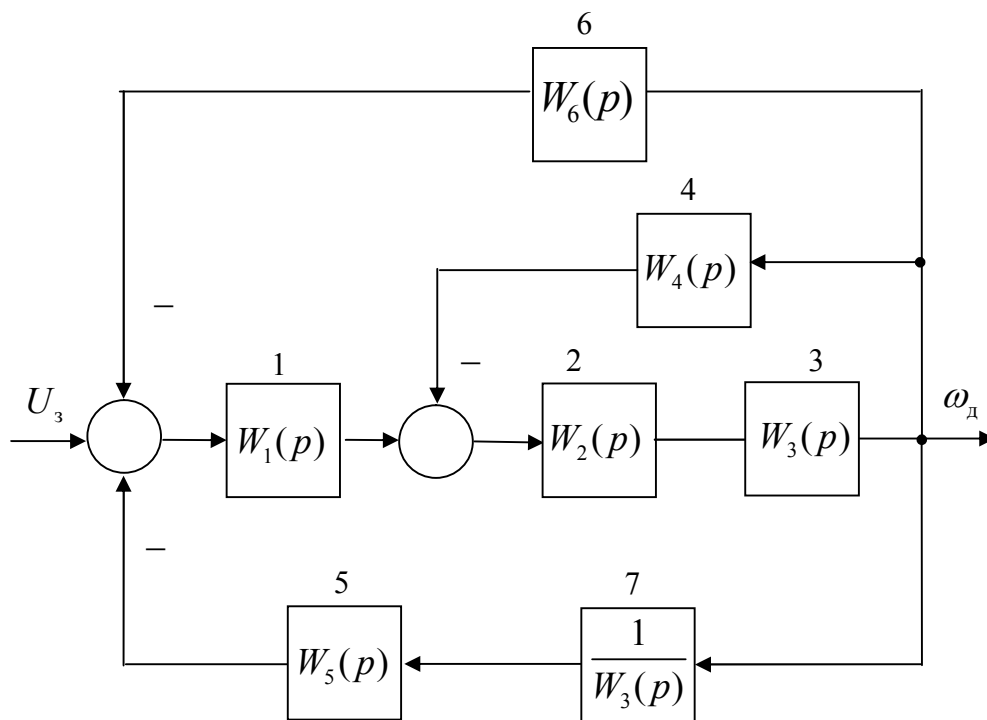


Рисунок 2.11 – Розрахункова алгоритмічна схема для визначення

$$\text{передавальної функції } W_{\omega U_3}(p) = \frac{\omega(p)}{U_3(p)}$$

Об'єднаємо ланки 2, 3 і 4. Еквівалентна передавальна функція визначається по формулі:

$$W_{2,3,4}(p) = \frac{W_2(p)W_3(p)}{1 + W_2(p)W_3(p)W_4(p)}. \quad (2.52)$$

Підставимо в (2.52) відповідні передавальні функції. Отримаємо:

$$W_{2,3,4}(p) = \frac{\frac{1/R_{\Sigma}}{T_{\Sigma}p + 1} \cdot \frac{R_{\Sigma}}{cT_{\Sigma}p}}{1 + \frac{c}{(T_{\Sigma}p + 1)cT_{\Sigma}p}} = \frac{k_d}{T_{\Sigma}T_{\Sigma}p^2 + T_{\Sigma}p + 1}. \quad (2.53)$$

Передавальна функція ланок 5 і 6 визначається як добуток передавальних функцій

$$W_{5,7}(p) = W_5(p) \cdot \frac{1}{W_3(p)} = T_{33T} p \cdot \frac{cT_M p}{R_{я\Sigma}} = \frac{cT_M T_{33T} p^2}{R_{я\Sigma}}. \quad (2.54)$$

Передавальні функції $W_{5,7}(p)$ і $W_6(p)$ включені паралельно, тому еквівалентна передатна функція визначається як сума передатних функцій

$$W_{5,6,7}(p) = W_{5,7}(p) + W_6(p) = \frac{cT_M T_{33T} p^2}{R_{я\Sigma}} + k_{33Ш}. \quad (2.55)$$

Передавальні функції $W_1(p)$ і $W_{2,3,4}(p)$ включені послідовно, тому еквівалентна передатна функція визначається як

$$\begin{aligned} W_{1,2,3,4}(p) &= W_1(p) \cdot W_{2,3,4}(p) = \\ &= \frac{k_\Sigma}{T_\Gamma p + 1} \cdot \frac{k_\Delta}{T_{я\Sigma} T_M p^2 + T_M p + 1} = \frac{k_\Sigma k_\Delta}{(T_\Gamma p + 1)(T_{я\Sigma} T_M p^2 + T_M p + 1)}. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Визначаємо передавальну функцію швидкості по задавальній дії

$$\begin{aligned} W_{\omega_d U_3}(p) &= \frac{\omega_d(p)}{U_3(p)} = \frac{W_{1,2,3,4}(p)}{1 + W_{1,2,3,4}(p) \cdot W_{5,6,7}(p)} = \\ &= \frac{\frac{k_\Sigma k_\Delta}{(T_\Gamma p + 1)(T_{я\Sigma} T_M p^2 + T_M p + 1)}}{1 + \frac{k_\Sigma k_\Delta}{(T_\Gamma p + 1)(T_{я\Sigma} T_M p^2 + T_M p + 1)} \left(\frac{cT_M T_{33T} p^2}{R_{я\Sigma}} + k_{33Ш} \right)} = \\ &= \frac{k_\Sigma k_\Delta}{T_\Gamma T_M T_{я\Sigma} p^3 + \left(T_\Gamma T_M + T_{я\Sigma} T_M + \frac{k_\Sigma T_M T_{33T}}{R_{я\Sigma}} \right) p^2 + (T_\Gamma + T_M) p + 1 + k_\Sigma k_\Delta k_{33Ш}}. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Передавальну функцію для струму по задаючій дії ($I_c = 0$) $W(p) = \frac{I(p)}{U_3(p)}$

отримаємо з перетвореної алгоритмічної схеми рис. 2.12.

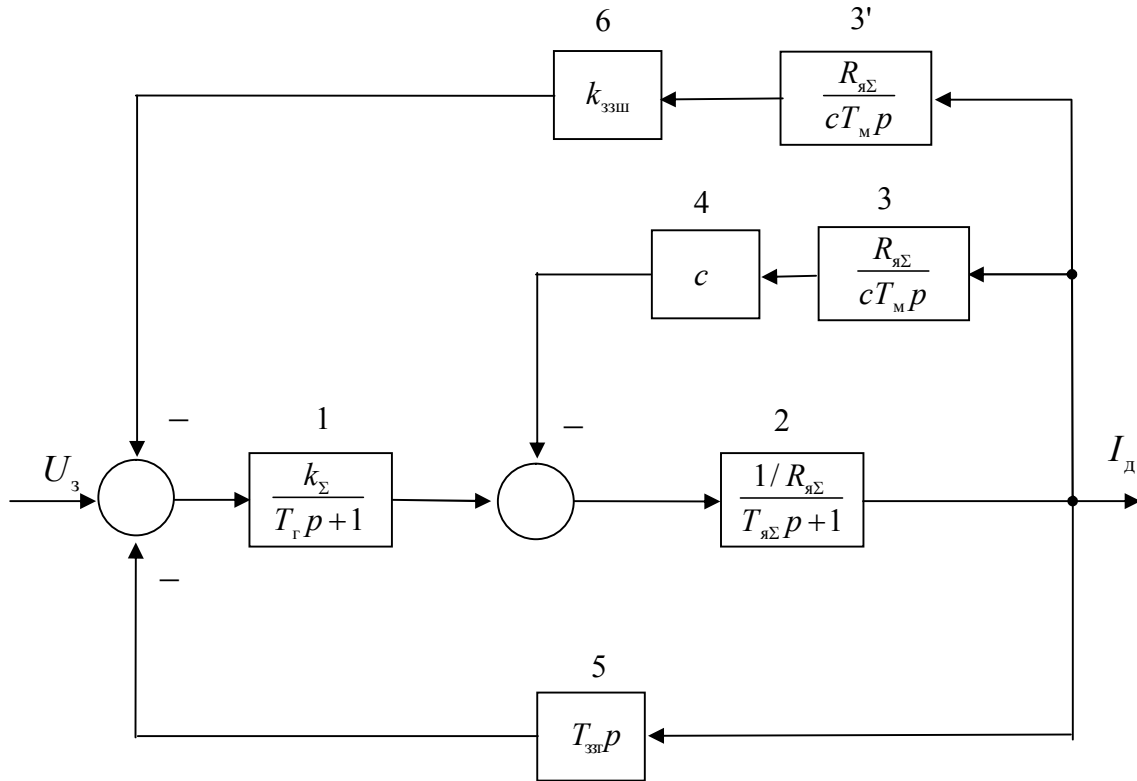


Рисунок 2.12 – Розрахункова алгоритмічна схема для визначення

$$\text{передавальної функції } W_{I_d U_3}(p) = \frac{I_d(p)}{U_3(p)}$$

Виконаємо об'єднання передавальних функцій ланок алгоритмічної схеми системи, зображеної на рис.2.12 аналогічно вище приведеному.

$$W_{2,3,4}(p) = \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p)} =$$

$$\frac{\frac{1/R_{я\Sigma}}{T_{я\Sigma}p + 1}}{1 + \frac{1/R_{я\Sigma}}{T_{я\Sigma}p + 1} \cdot \frac{R_{я\Sigma}}{c T_{м}p} \cdot c} = \frac{T_{м}p / R_{я\Sigma}}{T_{я\Sigma} T_{м} p^2 + T_{м}p + 1} \quad (2.58)$$

$$W_{3',6}(p) = W_3(p) \cdot W_6(p) = \frac{k_{33\Pi} R_{\Sigma}}{c T_M p}. \quad (2.59)$$

$$W_{3',6,5}(p) = W_{3',6}(p) + W_5(p) = \frac{k_{33\Pi} R_{\Sigma}}{c T_M p} + T_{33T} p. \quad (2.60)$$

$$\begin{aligned} W_{1,2,3,4}(p) &= W_1(p) \cdot W_{2,3,4}(p) = \frac{k_{\Sigma}}{T_{\Gamma} p + 1} \cdot \frac{T_M p / R_{\Sigma}}{T_{\Sigma} T_M p^2 + T_M p + 1} = \\ &= \frac{k_{\Sigma} T_M p}{R_{\Sigma} (T_{\Gamma} p + 1) (T_{\Sigma} T_M p^2 + T_M p + 1)} \end{aligned} \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} W_{I_d U_3}(p) &= \frac{I_d(p)}{U_3(p)} = \frac{W_{1,2,3,4}(p)}{1 + W_{1,2,3,4}(p) \cdot W_{3',6,5}(p)} = \\ &= \frac{\frac{k_{\Sigma} T_M p}{R_{\Sigma} (T_{\Gamma} p + 1) (T_{\Sigma} T_M p^2 + T_M p + 1)}}{1 + \frac{k_{\Sigma} T_M p}{R_{\Sigma} (T_{\Gamma} p + 1) (T_{\Sigma} T_M p^2 + T_M p + 1)} \cdot \left(\frac{k_{33\Pi} R_{\Sigma}}{c T_M p} + T_{33T} p \right)} = \\ &= \frac{k_{\Sigma} T_M p / R_{\Sigma}}{T_{\Gamma} T_M T_{\Sigma} p^3 + \left(T_{\Gamma} T_M + T_{\Sigma} T_M + \frac{k_{\Sigma} T_M T_{33T}}{R_{\Sigma}} \right) p^2 + (T_{\Gamma} + T_M) p + 1 + k_{\Sigma} k_d k_{33\Pi}}. \end{aligned} \quad (2.62)$$

Передавальну функцію для швидкості по збурюючій дії ($U_3 = 0$)

$W_{\omega_d I_{\text{ст}}}(p) = \frac{\omega_d(p)}{I_{\text{ст}}(p)}$ отримаємо з перетвореної алгоритмічної схеми, представленій

на рис. 2.13.

$$W_{4,7}(p) = \frac{c \cdot (T_{\Gamma} p + 1)}{k_{\Sigma}} = \frac{(T_{\Gamma} p + 1)}{k_{\Sigma} k_d}. \quad (2.63)$$

$$W_{4,7,6}(p) = W_{4,7}(p) + W_6(p) = \frac{(T_{\Gamma} p + 1)}{k_{\Sigma} k_d} + k_{33\Pi}. \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned}
W_{1,2,5}(p) &= \frac{W_1(p) \cdot W_2(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_5(p)} = \\
&= \frac{\frac{k_{\Sigma}}{T_{\Gamma}p + 1} \cdot \frac{1/R_{\Sigma}}{T_{\Sigma}p + 1}}{1 + \frac{k_{\Sigma}}{T_{\Gamma}p + 1} \cdot \frac{1/R_{\Sigma}}{T_{\Sigma}p + 1} \cdot T_{3\Gamma}p} = \frac{k_{\Sigma} / R_{\Sigma}}{(T_{\Gamma}p + 1)(T_{\Sigma}p + 1) + \frac{k_{\Sigma}T_{3\Gamma}}{R_{\Sigma}}p} .
\end{aligned} \tag{2.65}$$

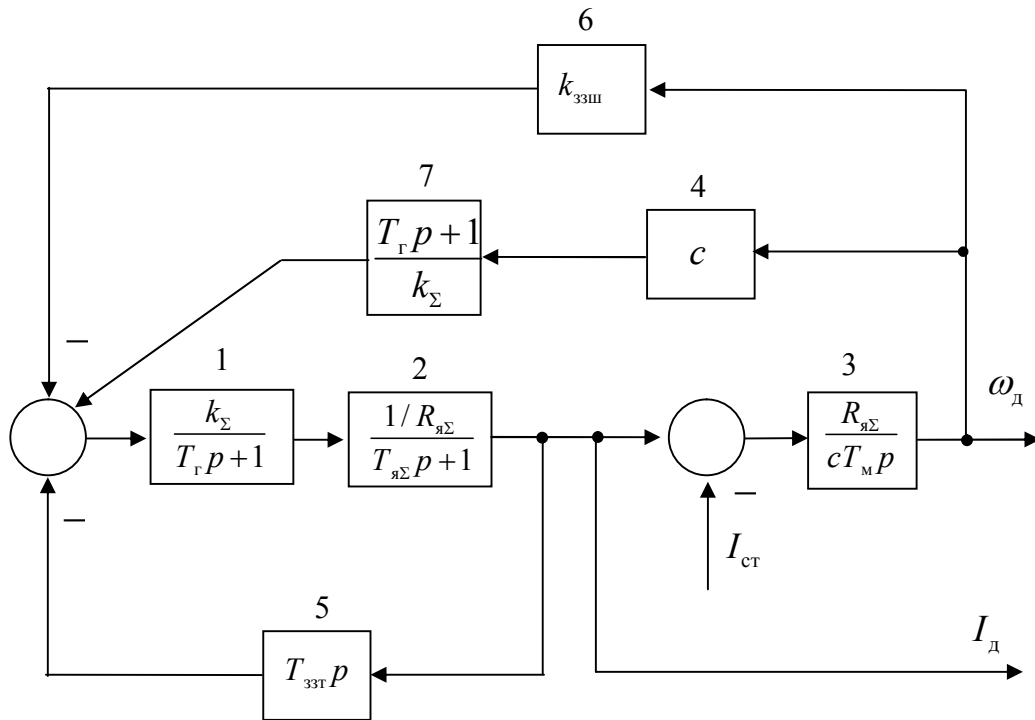


Рисунок 2.13 – Розрахункова алгоритмічна схема для отримання

$$\text{передавальної функції } W_{\omega_d I_{\text{ст}}}(p) = \frac{\omega_d(p)}{I_{\text{ст}}(p)}$$

Алгоритмічна схема, приведена на рис. 2.13 з урахуванням перетворених передатних функцій, прийме вид, показаний на рис.2.14.

$$W_{1,2,5,4,7,6}(p) = \frac{k_{\Sigma} / R_{\Sigma}}{(T_{\Gamma}p + 1)(T_{\Sigma}p + 1) + \frac{k_{\Sigma}T_{3\Gamma}}{R_{\Sigma}}p} \cdot \left(\frac{(T_{\Gamma}p + 1)}{k_{\Sigma}k_d} + k_{33Ш} \right) =$$

$$= \frac{T_{\Gamma} p + 1 + k_{\Sigma} k_{33\text{III}}}{k_{\Sigma} R_{\Sigma} \left[T_{\Gamma} T_{\Sigma} p^2 + \left(T_{\Gamma} + T_{\Sigma} + \frac{k_{\Sigma} T_{33\Gamma}}{R_{\Sigma}} \right) p + 1 \right]}. \quad (2.66)$$

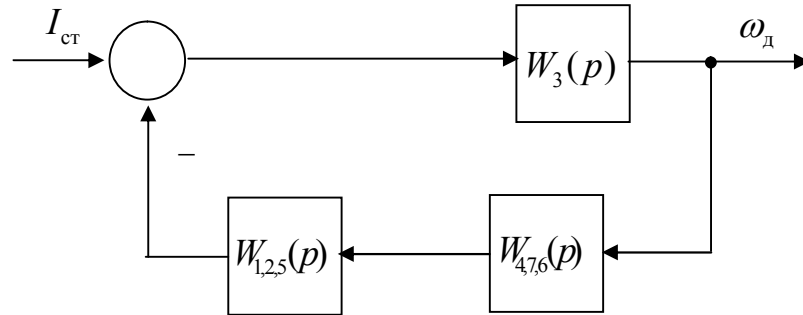


Рисунок 2.14 – Перетворена алгоритмічна схема для отримання

$$\text{передавальної функції } W_{\omega_{\text{д}} I_{\text{ст}}}(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)}.$$

Шукана передавальна функція:

$$\begin{aligned} W_{\omega_{\text{д}} I_{\text{ст}}}(p) &= \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)} = \frac{W_3(p)}{1 + W_3(p) \cdot W_{1,2,5,4,7,6}(p)} = \\ &= \frac{\frac{R_{\Sigma}}{c T_{\text{М}} p}}{1 + \frac{R_{\Sigma}}{c T_{\text{М}} p} \cdot \frac{T_{\Gamma} p + 1 + k_{\Sigma} k_{33\text{III}}}{k_{\Sigma} R_{\Sigma} \left[T_{\Gamma} T_{\Sigma} p^2 + \left(T_{\Gamma} + T_{\Sigma} + \frac{k_{\Sigma} T_{33\Gamma}}{R_{\Sigma}} \right) p + 1 \right]}} = \\ &= \frac{\frac{R_{\Sigma}}{c T_{\text{М}} p}}{\frac{T_{\text{М}} T_{\Gamma} T_{\Sigma} p^2 + \left(T_{\text{М}} T_{\Gamma} + T_{\text{М}} T_{\Sigma} + \frac{k_{\Sigma} T_{33\Gamma} T_{\text{М}}}{R_{\Sigma}} \right) \cdot p^2 + (T_{\text{М}} + T_{\Gamma}) p + 1 + k_{\Sigma} k_{33\text{III}}}{p T_{\text{М}} \left[T_{\Gamma} T_{\Sigma} p^2 + \left(T_{\Gamma} + T_{\Sigma} + \frac{k_{\Sigma} T_{33\Gamma}}{R_{\Sigma}} \right) p + 1 \right]}} = ; \end{aligned}$$

$$= \frac{[R_{я\Sigma} T_{\Gamma} T_{я\Sigma} p^2 + (R_{я\Sigma} T_{\Gamma} + R_{я\Sigma} T_{я\Sigma} + k_{\Sigma} T_{33T}) p + R_{я\Sigma}] k_{\Gamma}}{T_{\Gamma} T_{\Sigma} T_{я\Sigma} p^3 + \left(T_{\Gamma} T_{\Sigma} + T_{я\Sigma} T_{\Sigma} + \frac{k_{\Sigma} T_{\Sigma} T_{33T}}{R_{я\Sigma}} \right) p^2 + (T_{\Gamma} + T_{\Sigma}) p + 1 + k_{\Sigma} k_{\Gamma} k_{33T}}. \quad (2.67)$$

Передавальну функцію для струму по збурюючій дії ($U_3 = 0$)

$W_{I_{\Gamma} I_{\Sigma}}(p) = \frac{I_{\Gamma}(p)}{I_{\Sigma}(p)}$ отримаємо, використовуючи алгоритмічну схему, зображену

на рис.2.14, перетворивши її до схеми, показаної на рис. 2.15.

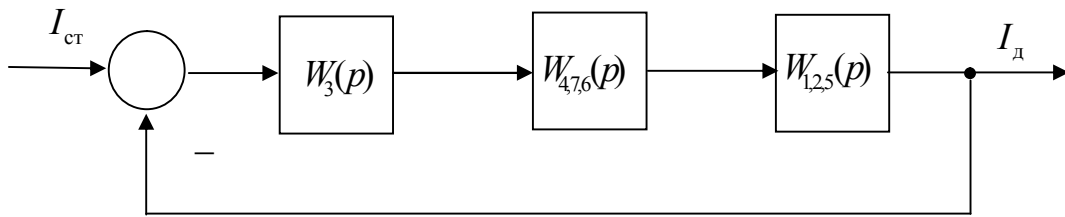


Рисунок 2.15 – Розрахункова алгоритмічна схема для отримання

передавальної функції $W_{I_{\Gamma} I_{\Sigma}}(p) = \frac{I_{\Gamma}(p)}{I_{\Sigma}(p)}$.

$$W_{5,4,7,6,1,2,5}(p) = W_3(p) \cdot W_{4,7,6}(p) \cdot W_{1,2,5}(p) =$$

$$\frac{R_{я\Sigma}}{c T_{\Sigma} p} \cdot \left(\frac{(T_{\Gamma} p + 1)}{k_{\Sigma} k_{\Gamma}} + k_{33T} \right) \cdot \frac{k_{\Sigma} / R_{я\Sigma}}{(T_{\Gamma} p + 1)(T_{я\Sigma} p + 1) + \frac{k_{\Sigma} T_{33T}}{R_{я\Sigma}} p} =$$

$$= \frac{T_{\Gamma} p + 1 + k_{33T} k_{\Sigma} k_{\Gamma}}{T_{\Sigma} p (T_{\Gamma} p + 1) \cdot (T_{я\Sigma} p + 1) + \frac{k_{\Sigma} T_{33T} T_{\Sigma}}{R_{я\Sigma}} p^2}. \quad (2.68)$$

Таким чином

$$W_{I_{\Gamma} I_{\Sigma}}(p) = \frac{I_{\Gamma}(p)}{I_{\Sigma}(p)} = \frac{W_{3,4,7,6,1,2,5}(p)}{1 + W_{3,4,7,6,1,2,5}(p)}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{T_{\Gamma} p + 1 + k_{33\text{Ш}} k_{\Sigma} k_{\text{Д}}}{T_{\text{М}} p (T_{\Gamma} p + 1) \cdot (T_{\text{я}\Sigma} \cdot p + 1) + \frac{k_{\Sigma} T_{33\text{Т}} T_{\text{М}}}{R_{\text{я}\Sigma}} p^2} \\
&= \frac{1 + \frac{T_{\Gamma} p + 1 + k_{33\text{Ш}} k_{\Sigma} k_{\text{Д}}}{T_{\text{М}} p (T_{\Gamma} p + 1) \cdot (T_{\text{я}\Sigma} \cdot p + 1) + \frac{k_{\Sigma} T_{33\text{Т}} T_{\text{М}}}{R_{\text{я}\Sigma}} p^2}}{1 + \frac{T_{\Gamma} p + 1 + k_{\Sigma} k_{33\text{Ш}} k_{\text{Д}}}{T_{\Gamma} T_{\text{М}} T_{\text{я}\Sigma} p^3 + \left(T_{\Gamma} T_{\text{М}} + T_{\text{я}\Sigma} T_{\text{М}} + \frac{k_{\Sigma} T_{\text{М}} T_{33\text{Т}}}{R_{\text{я}\Sigma}} \right) p^2 + (T_{\Gamma} + T_{\text{М}}) p + 1 + k_{\Sigma} k_{\text{Д}} k_{33\text{Ш}}}}. \quad (2.69)
\end{aligned}$$

Визначимо числові значення параметрів системи, що входять до складу передавальних функцій.

Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга, c

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}\Sigma}}{R_{\text{я}\Sigma}}, \quad (2.70)$$

$$T_{\text{я}} = \frac{0,0118}{0,2519} = 0,047 \text{ } c,$$

$$T_{33\text{Т}} = k_{33\text{Н}} (k \cdot L_{\text{яД}} + L_{3\text{р}}), \quad (2.71)$$

$$T_{33\text{Т}} = 0,07 \cdot (2 \cdot 0,0057 + 0) = 0,798 \cdot 10^{-2} \text{ } c,$$

$$k_{33\text{Ш}} = k_{33\text{Н}} \cdot k \cdot c, \quad (2.72)$$

$$k_{33\text{Ш}} = 0,07 \cdot 2 \cdot 3,42 = 0,479.$$

Постійну часу тиристорного перетворювача $T_{\text{тп}}$ згідно рекомендаціям [48] приймаємо рівною 0,005 c .

Електромеханічна постійна часу

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\Sigma} R_{\text{я}\Sigma}}{c^2}; \quad (2.73)$$

де J_{Σ} - сумарний момент інерції якоря двигуна і приведений до його валу момент інерції механізмів

$$J_{\Sigma} = 2J_{\text{д}} + J_{\text{пл}} / i_{\text{п}}^2; \quad (2.74)$$

$$J_{\Sigma} = 2 \cdot 2 + 20 \cdot 10^7 / 2508^2 = 4 + 31,8 = 35,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$T_{\text{м}} = \frac{35,8 \cdot 0,2519}{(2 \cdot 3,42)^2} = 0,104 \text{ с}$$

По передавальних функціях $W_1(p) \div W_4(p)$ розраховуємо перехідні характеристики системи. Розрахунок перехідних процесів виконуємо з використанням системи MATLAB. Графіки перехідних процесів представлені на рис.2.17 і рис. 2.18. Ті ж результати були отримані шляхом дослідження перехідних процесів за допомогою моделі системи, показаної на рис.2.16. Розрахунок проводився для різних значень постійної часу $k_{\text{зпн}}$. На рис.2.17 і рис.2.18 представлені графіки перехідних процесів для трьох значень $k_{\text{зпн}}$, а саме: 1 - $k_{\text{зпн}} = 0,07$, 2 - $k_{\text{зпн}} = 0,21$; 3 - $k_{\text{зпн}} = 0,49$. Як видно з рисунка, при $k_{\text{зпн}} = 0,07$ перехідні процеси мають найкращі показники якості, хоча статична помилка при накиді навантаження становить $4,3 \text{ с}^{-1}$.

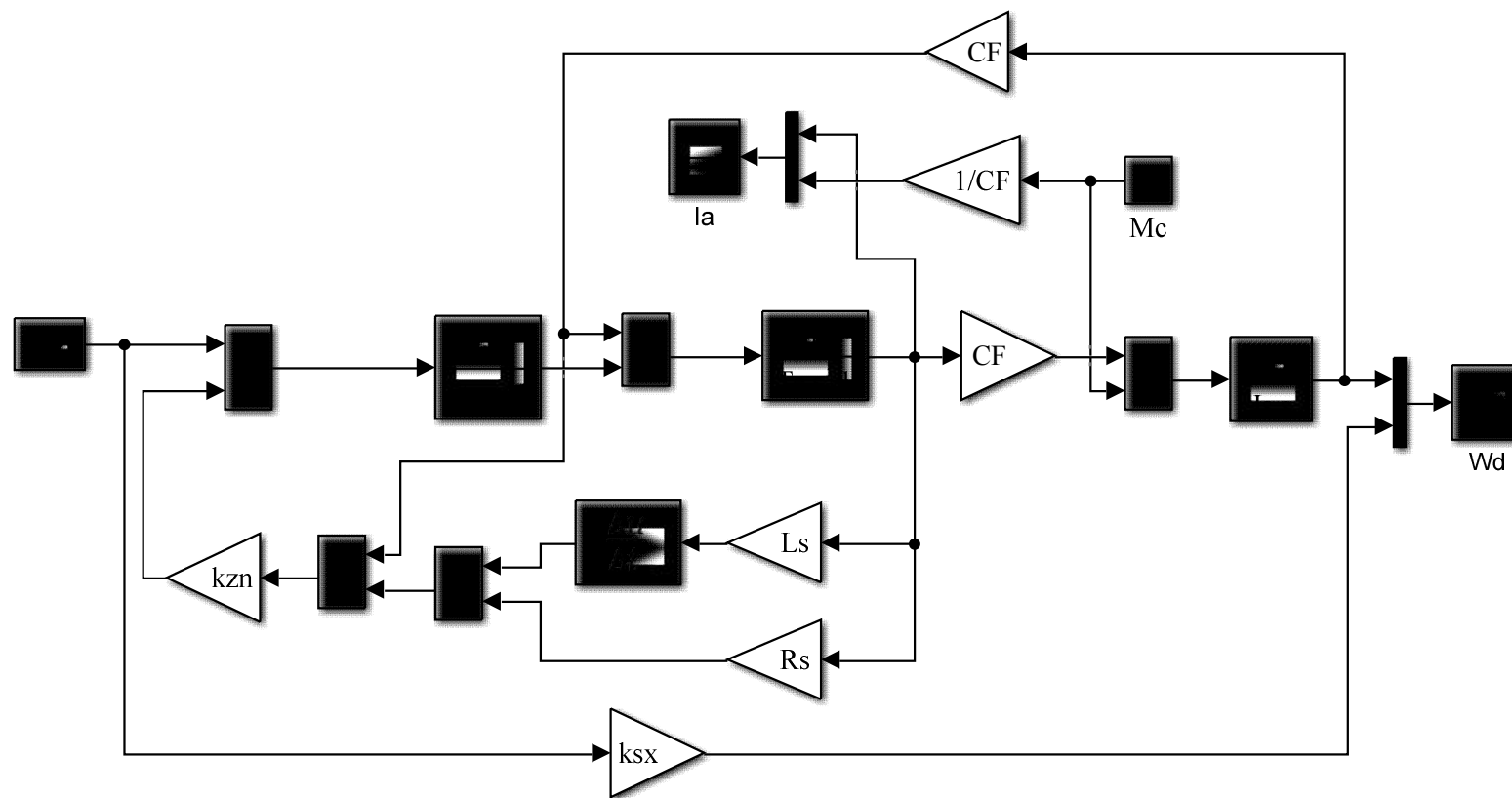


Рисунок 2.16 - Схема системи, розроблена на ЕОМ

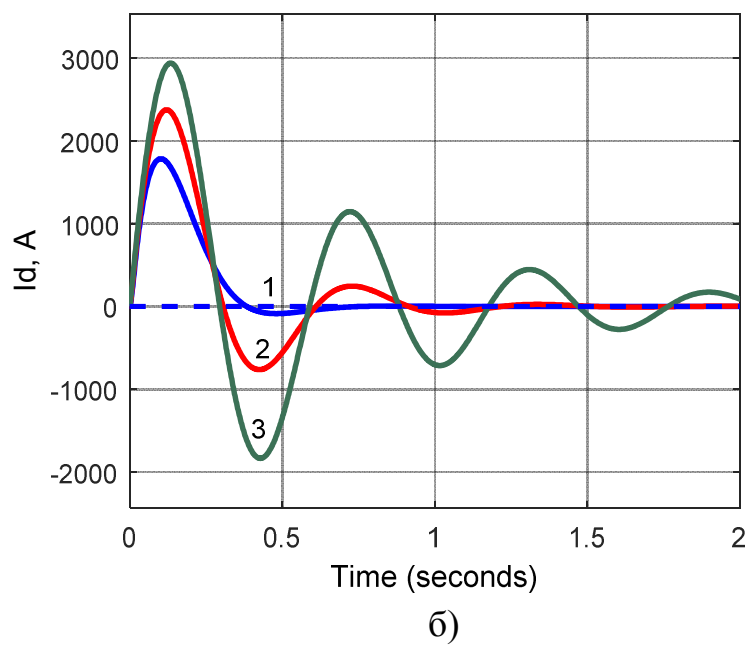
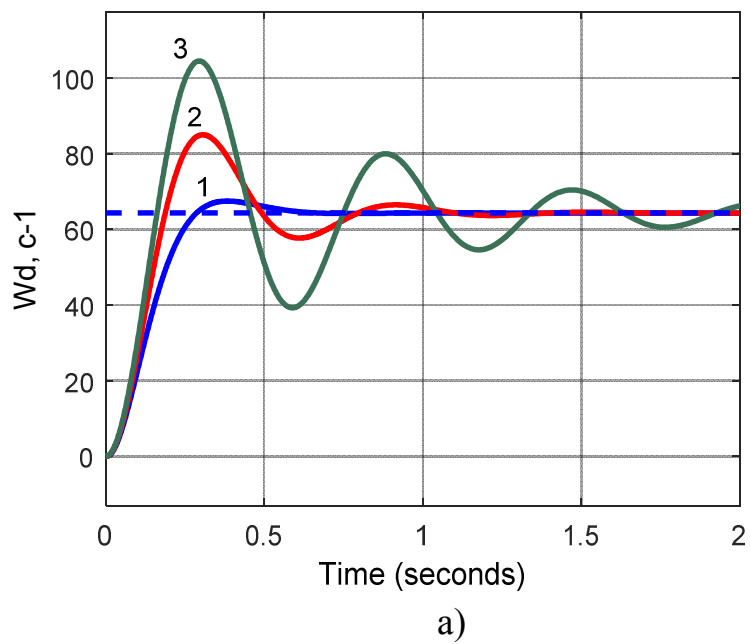


Рисунок 2.17 – Графіки перехідних процесів швидкості а) і струму б)
по залаючій дії

$$1 - k_{33H} = 0,07, \quad 2 - k_{33H} = 0,21; \quad 3 - k_{33H} = 0,49$$

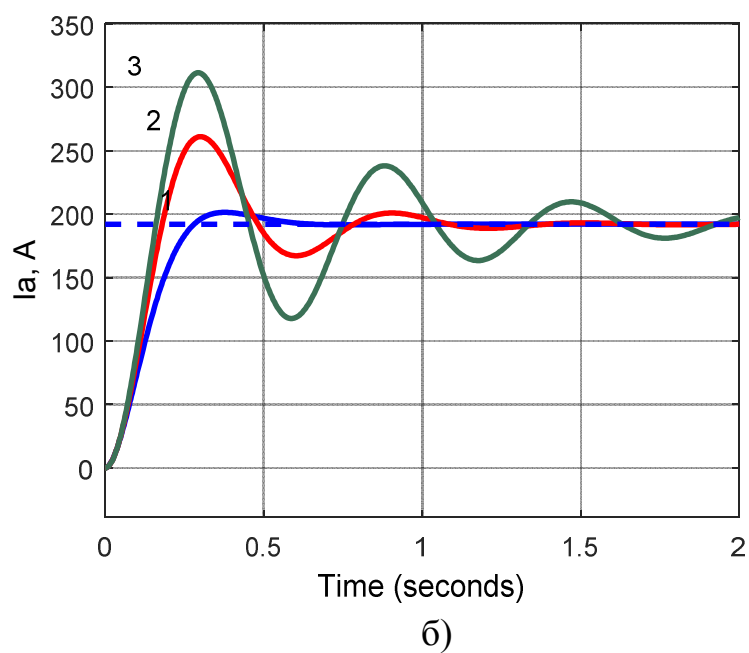
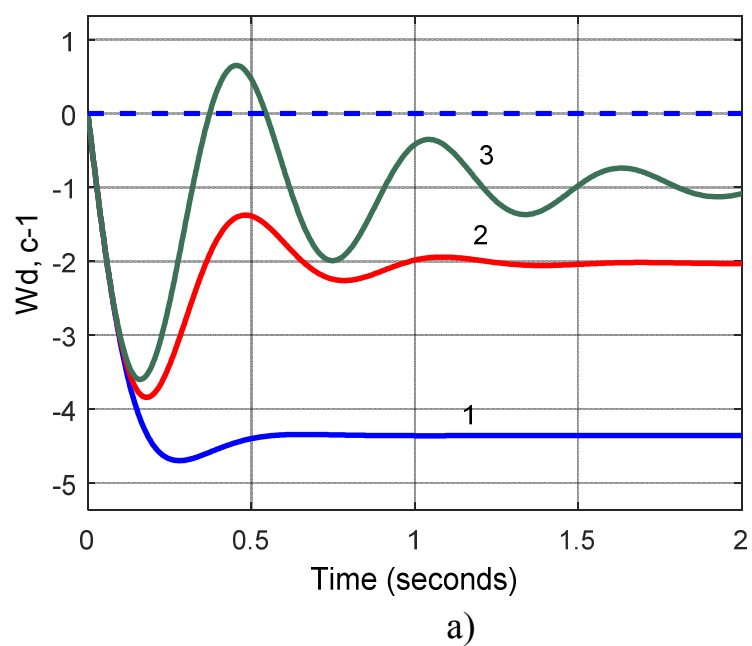


Рисунок 2.18 – Графіки перехідних процесів швидкості а) і струму б)
по збурюючій дії

1 - $k_{33H} = 0,07$, 2 - $k_{33H} = 0,21$; 3 - $k_{33H} = 0,49$

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. На підставі аналізу технічних вимоги, що пред'являється до електроприводів опорно-поворотних механізмів роторних екскаваторів для електроприводу механізму розвороту вибраний електропривод постійного струму, виконаний за системою ТП–Д.

2. Виконано вибір електродвигуна і основного електроустаткування силового ланцюга електроприводу, проведена перевірка двигуна за умовами нагріву і перевантажувальної здатності, для чого розраховано швидкісну і навантажувальні діаграми. Отримане при розрахунку значення еквівалентного моменту показує, що по нагріву двигун відповідає умовам експлуатації. По перевантажувальній здатності двигун також задовольняє вимогам.

3. Виконано розрахунок параметрів силового ланцюга електроприводу, що використовуються при розрахунку системи автоматичного управління.

4. 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 [44] вибрано систему, що має зворотний зв'язок по напрузі тиристорного перетворювача.

5. Проведений розрахунок статичних характеристик розімкненої і замкненої системи. Складено алгоритмічну схему системи та визначені передавальні функції системи по задаючій і збурюючій діях.

6. 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 коефіцієнта підсилення зворотного зв'язку по напрузі, при якому перехідні процеси змінних стану системи мають задовільні показники якості.

РОЗДІЛ 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Математична модель двомасової системи

У попередніх розділах було проведено дослідження динамічних характеристик системи електроприводу механізму розвороту в припущенні нескінченної жорсткості всіх зв'язків між елементами механічної частини системи. Моделювання механічної частини за допомогою жорсткої прив'язаної ланки відображає середній характер руху елементів, оскільки не враховує вплив пружності реальних механічних з'єднань. Внаслідок кінцевої жорсткості цих зв'язків механічна частина електроприводу є пружною системою, прикладення до якої управляючої дії (моменту двигуна), або збурюючої дії (моменту статичного навантаження) викликає коливання зв'язаних мас, що збільшують максимальні навантаження зв'язків і відробітки необхідних рухів і переміщень, що ускладнюють точність.

Кінематична схема механізму розвороту є складною розгалуженою механічною системою, що складається з великого числа зосереджених і розподілених мас, сполучених пружними зв'язками. При інженерних розрахунках такі системи зазвичай зводяться до трьохмасових або двомасових систем із зосередженими масами і гнучкими невагомими зв'язками між ними.

Для електроприводу механізму розвороту використовуються два двигуни. Така схема багаторухового електроприводу в загальному випадку приводиться до розгалуженої розрахункової схеми, показаної на рис.3.1.

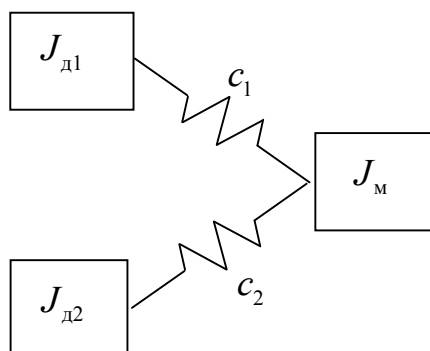


Рисунок 3.1 – Розгалужена розрахункова схема механічної частини електроприводу

На схемі позначено:

$J_{д1}$ і $J_{д2}$ – моменти інерції двигунів;

c_1 , c_2 – приведені жорсткості кожного приводу;

$J_{м}$ – приведений момент інерції механізму; тобто приведений до валу двигуна момент інерції поворотної платформи $J_{м} = J'_{пл}$;

Оскільки двигуни приводу рухаються синфазно, розгалужену схему рис.3.1 можна звести до двомасової розрахункової механічної схеми рис.3.2.

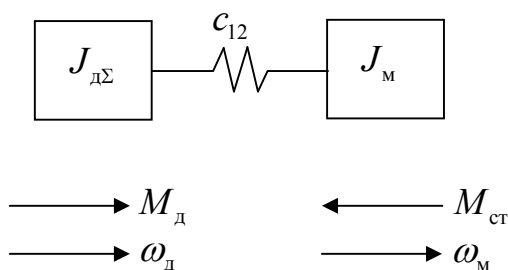


Рисунок 3.2 – Двомасова розрахункова схема

де $J_{дΣ}$ - сума моментів інерції двигунів; оскільки використовуються два однакові двигуни, то $J_{Σ} = k \cdot J_{д} = 2 \cdot 8,25 = 16,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

c_{12} – приведена жорсткість зв'язку між масами; $c_{12} = c_1 + c_2$;

β – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя між масами.

Якщо привести всі рухомі маси і жорсткості електроприводу механізму 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 $M_{\text{вт}} = \beta(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{м}})$;

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

$\omega_{\text{д}}$, $\omega_{\text{м}}$ - 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

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

Диференціальні рівняння, що описують електромеханічні процеси в розробленій в попередніх розділах одномасовій системі (у відповідності із алгоритмічною схемою рис.3.2) мають наступну форму

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

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:

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

Введемо вектор стану системи

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

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:

$$\mathbf{A} = \begin{array}{ccccc} \omega_{\text{м}} & M_{\text{пр}} & \omega_{\text{д}} & I_{\text{я}} & E_{\text{г}} \\ \left| \begin{array}{ccccc} -\frac{\beta}{J_{\text{м}}} & \frac{1}{J_{\text{м}}} & \frac{\beta}{J_{\text{м}}} & 0 & 0 \\ -c_{12} & 0 & c_{12} & 0 & 0 \\ \frac{\beta}{J_{\text{м}}} & -\frac{1}{J_{\text{м}}} & -\frac{\beta}{J_{\text{м}}} & \frac{c}{J_{\text{м}}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{c}{T_{\text{я}\Sigma} R_{\text{я}\Sigma}} & -\frac{1}{T_{\text{я}\Sigma}} & \frac{1}{T_{\text{я}\Sigma} R_{\text{я}\Sigma}} \\ 0 & 0 & \frac{ck_{\Sigma} T_{\text{ззТ}}}{T_{\text{я}\Sigma} R_{\text{я}\Sigma} T_{\text{тп}}} - \frac{k_{\text{ззш}} k_{\Sigma}}{T_{\text{г}}} & \frac{k_{\Sigma} T_{\text{ззТ}}}{T_{\text{я}\Sigma} T_{\text{тп}}} & \frac{-k_{\Sigma} T_{\text{ззТ}}}{T_{\text{я}\Sigma} R_{\text{я}\Sigma} T_{\text{тп}}} - \frac{1}{T_{\text{тп}}} \end{array} \right| \end{array}$$

$$\mathbf{B} = \begin{array}{cc} U_3 & M_{\text{ст}} \\ \left| \begin{array}{cc} 0 & -\frac{1}{J_{\text{м}}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_{\Sigma}}{T_{\text{г}}} & 0 \end{array} \right| \end{array}$$

Алгоритмічна схема двомасової системи показана на рис.3.3..

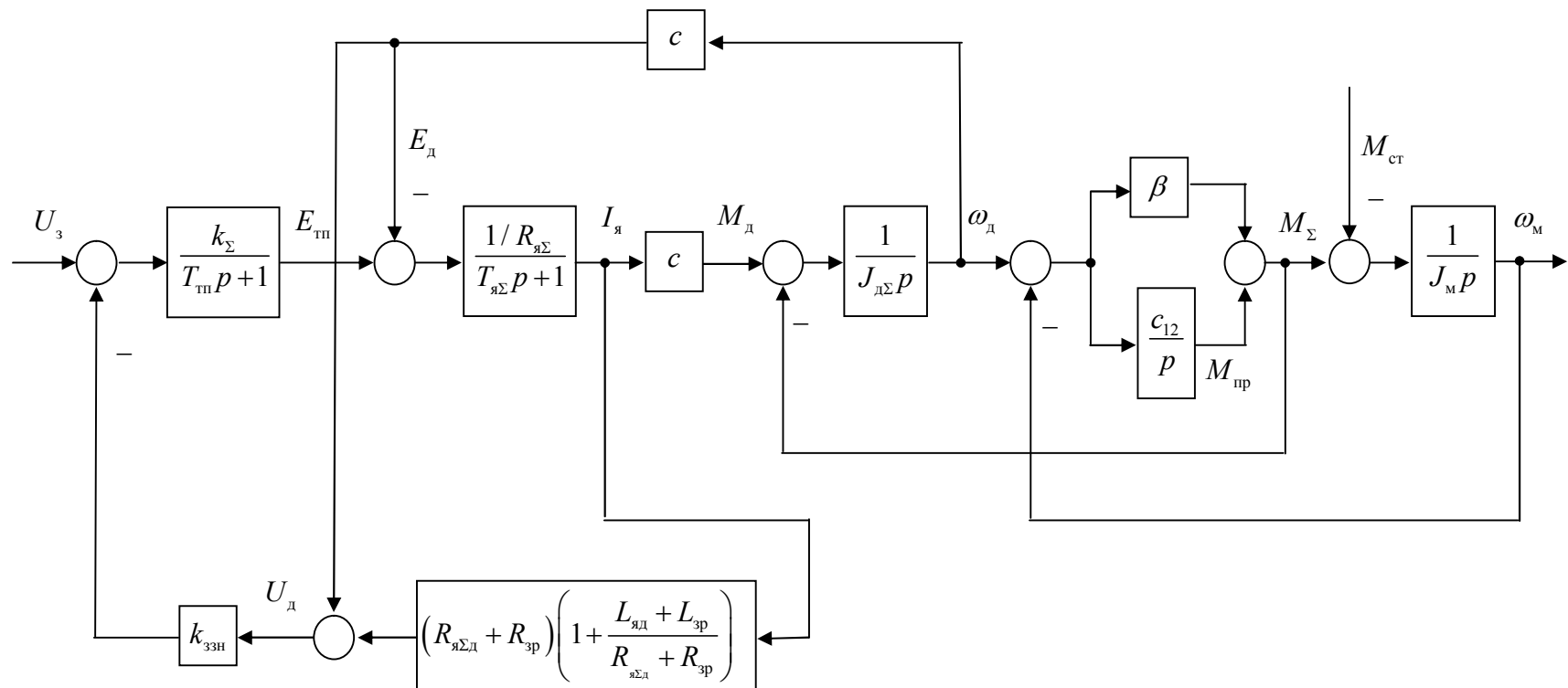


Рисунок 3.3- Алгоритмічна схема двомасової системи.

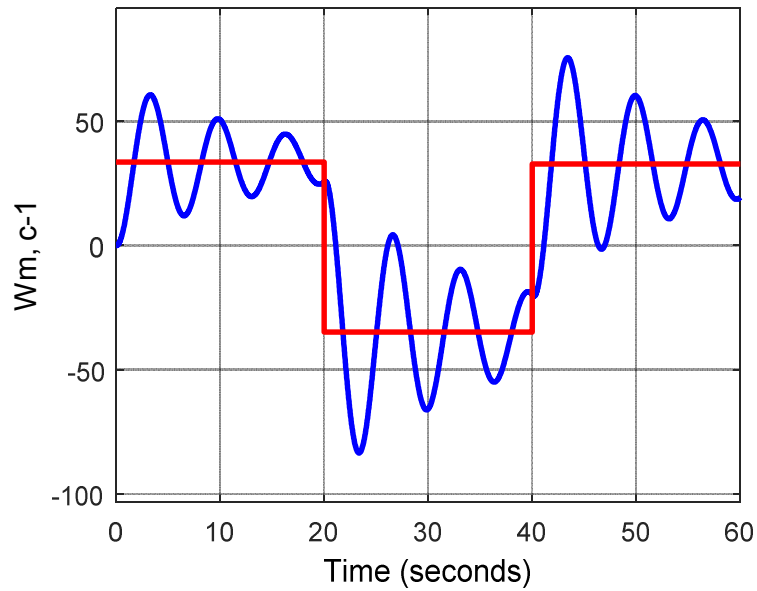
3.2 Розрахунок перехідних процесів двомасової системи

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 Г. Дослідження проводилися також за допомогою схеми моделі системи, приведеної на рис. 3.4. Всі розрахунки виконувалися на ЕОМ за допомогою пакету прикладних програм MATLAB.

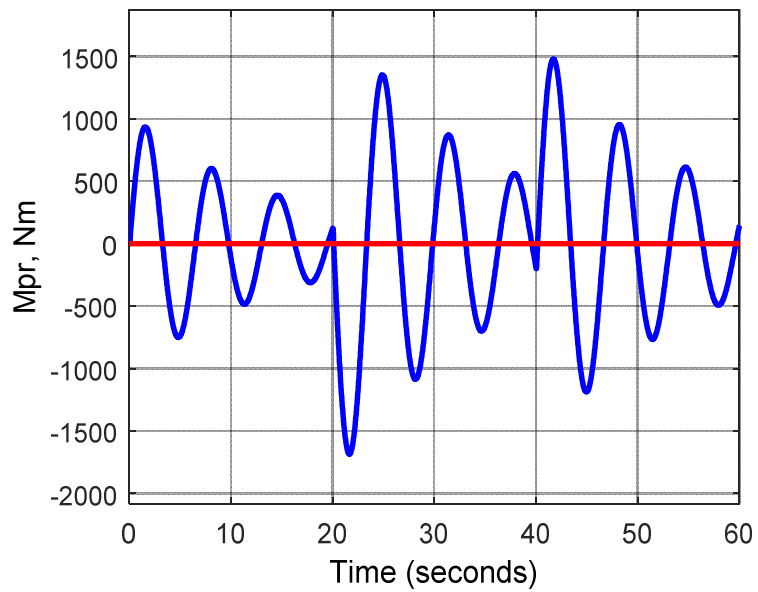
Графіки перехідних процесів показані на рисунках 3.5 – 3.8. На рисунках приведені перші чотири змінні стани системи. Як видно з графіків, мають місце значні коливання основних координат системи, що несприятливо позначається на роботі механізму.



Рисунок 3.4 - Схема моделі двомасової системи, розроблена на ЕОМ



a)



б)

Рисунок 3.5 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{\text{пр}} = f(t)$ (б) двомасової системи по задаючій дії.

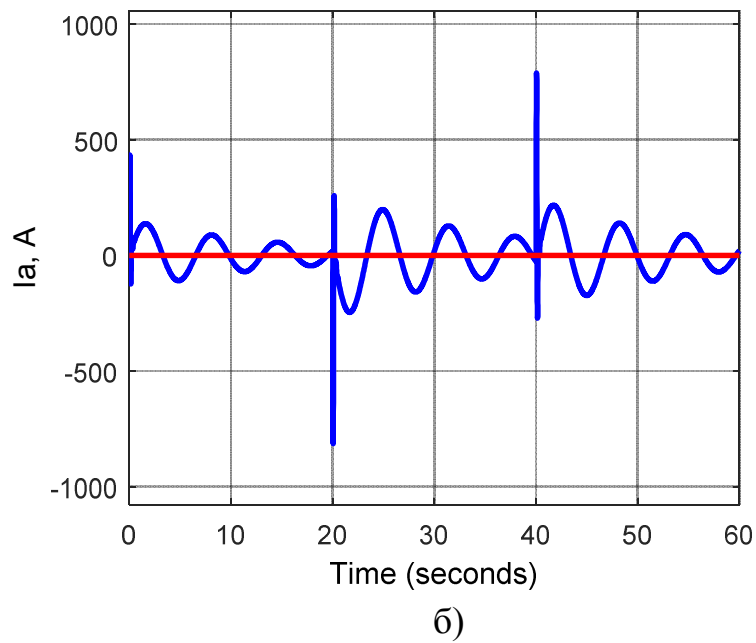
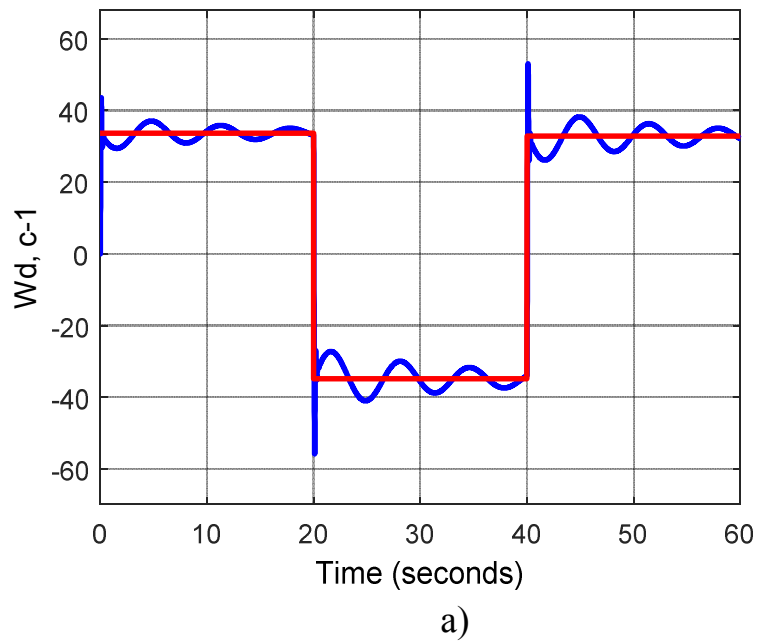


Рисунок 3.6 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і струму двигуна $I_a = f(t)$ (б) двомасової системи по задаючій дії.

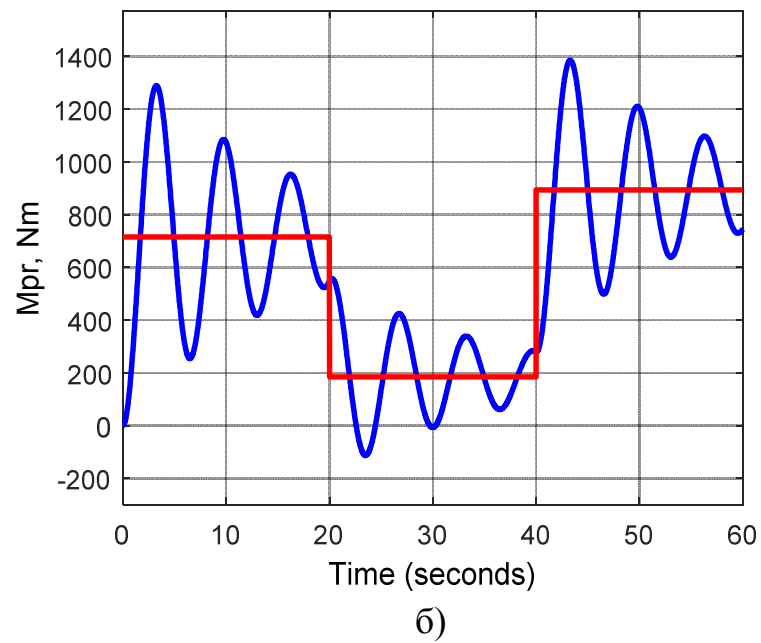
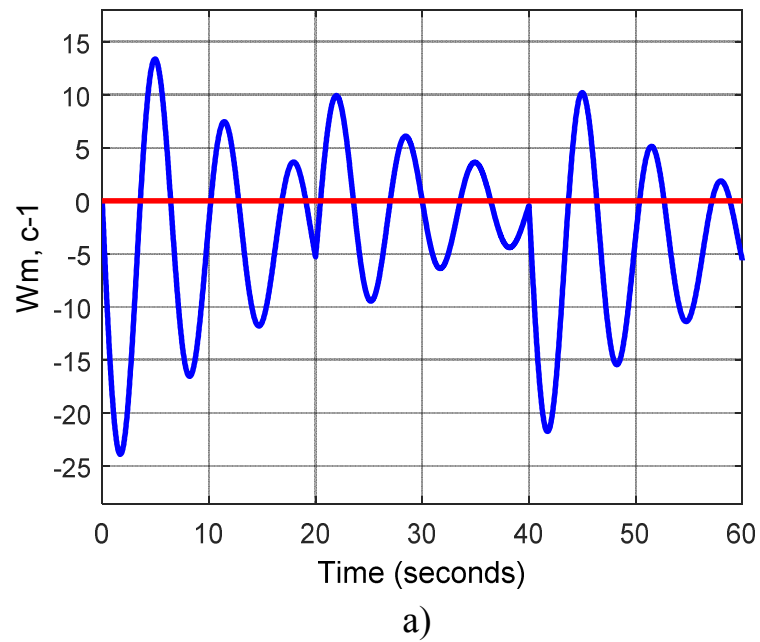


Рисунок 3.7 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{пр} = f(t)$ (б) двомасової системи по збурюючій дії.

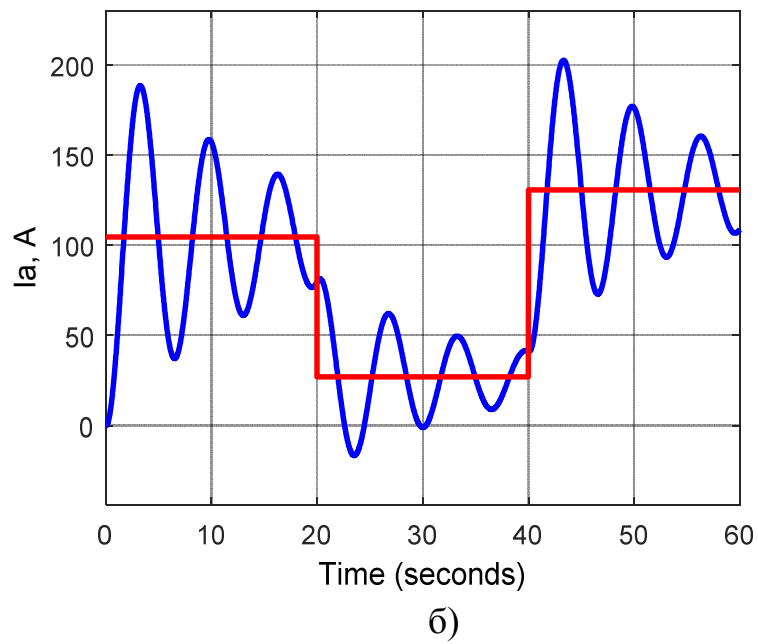
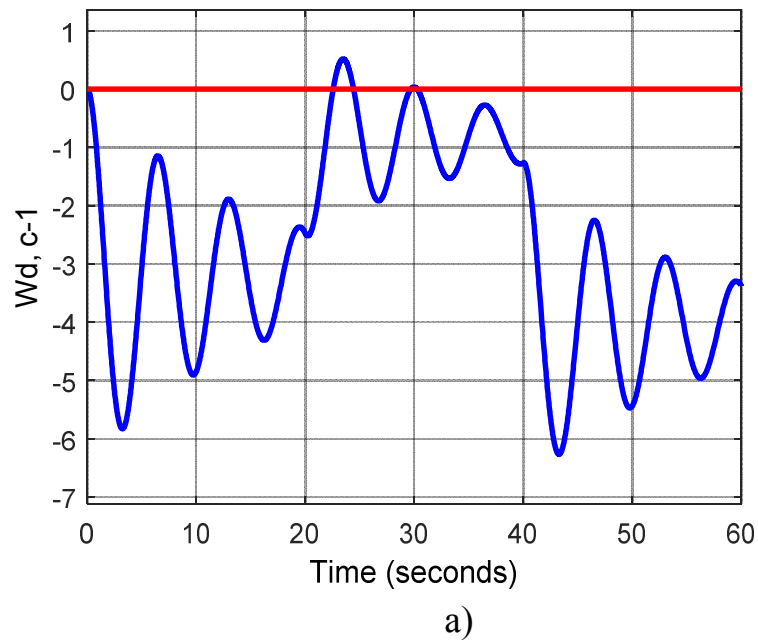


Рисунок 3.8 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і струму двигуна $I_a = f(t)$ (б) двомасової системи по збурюючій дії.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Проведено аналіз роботи механізму розвороту роторного екскаватора з урахуванням пружності механічних зв'язків. Представлення механічної частини жорсткою приведеною ланкою відображає дійсний характер рухів елементів тільки в середньому, оскільки не враховує вплив пружності реальних механічних зв'язків. Із-за кінцевої жорсткості цих зв'язків механічна частина електроприводу є пружною системою, додаток до якої управляючої дії або збурюючої дії (моменту статичного навантаження), викликає коливання зв'язаних мас, що збільшують максимальні навантаження зв'язків і ускладнюють точність обробки необхідних рухів і переміщень. Показано, що кінематична схема механічної частини системи управління механізмом розвороту екскаватора з урахуванням податливості елементів механічної частини електроприводу 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 подамо 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 $M_{\text{пр}}$ – "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".

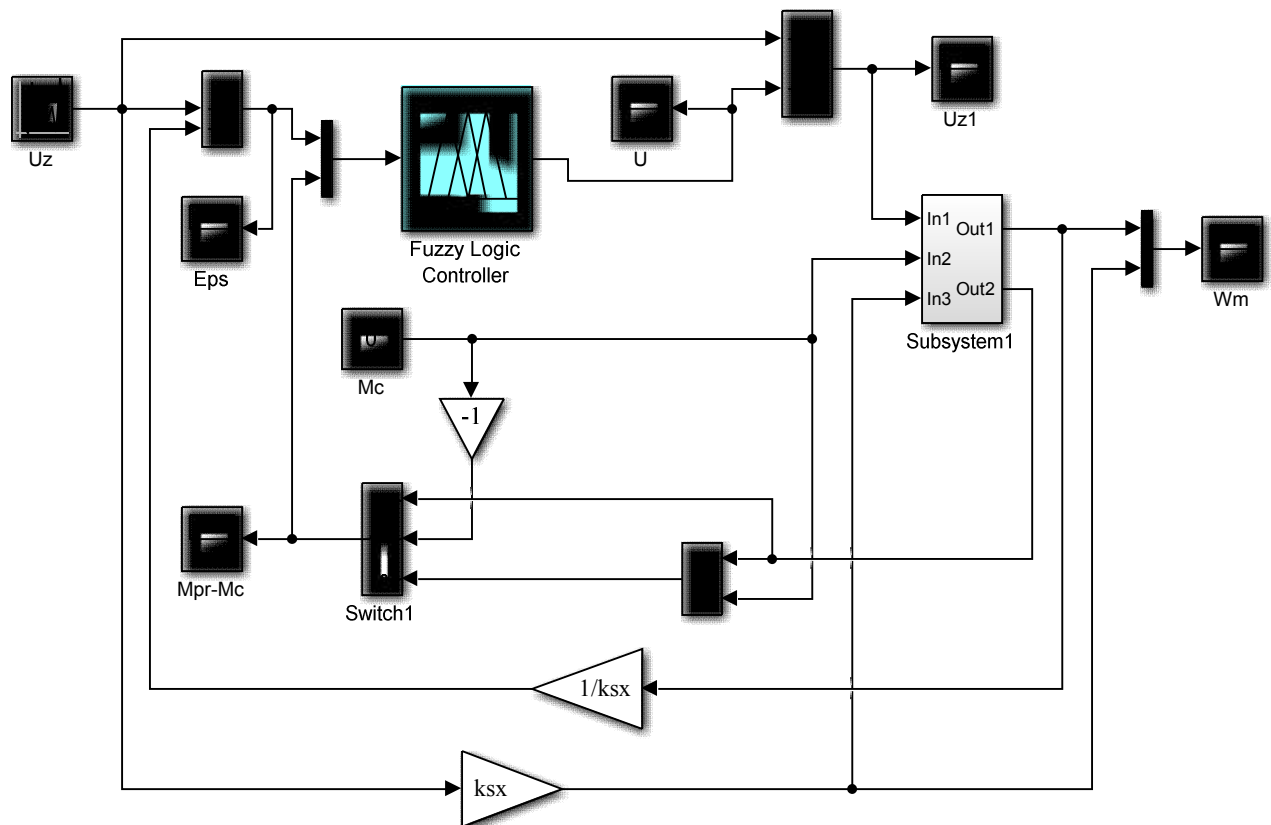


Рисунок 4.1 – Схема системи з Fuzzy регулятором

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.

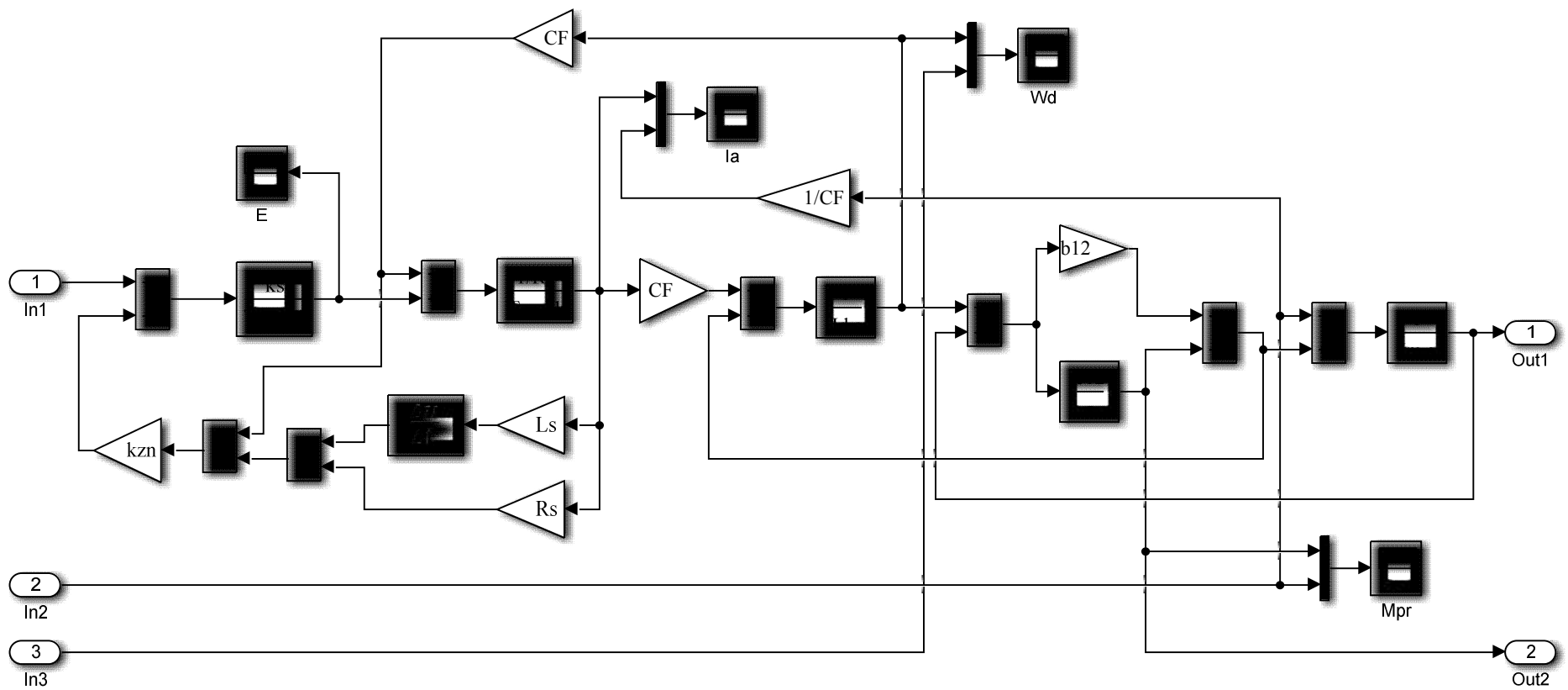


Рисунок 4.2 – Схема моделі об'єкту управління

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.

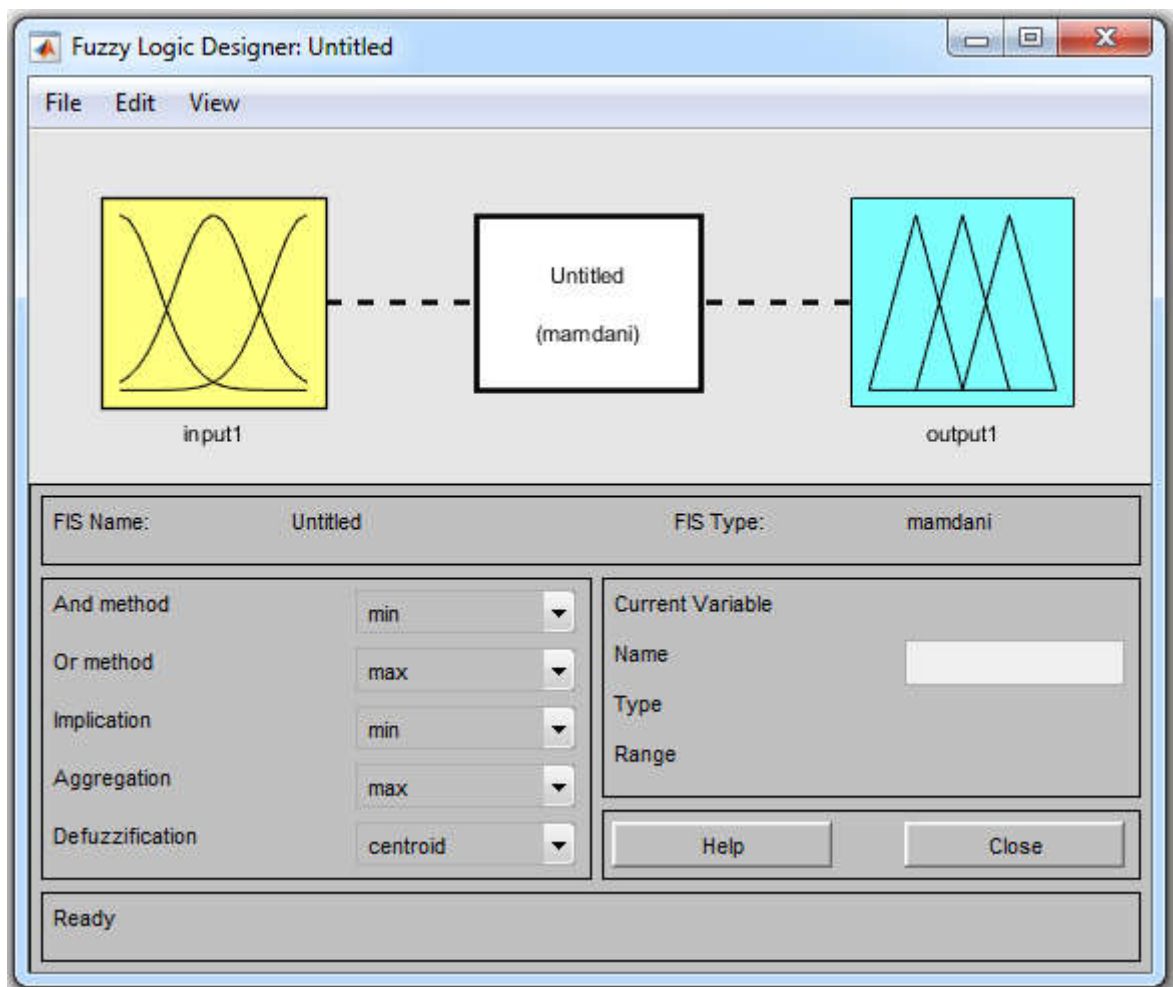


Рисунок 4.3 – Вид вікна FIS Editor

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" ($M_{\text{пр}}(t)$) для блоку "input2" і "U" ($U(t)$) для вихідного блоку (праворуч зверху) "output1". Одразу ж ми також присвоюємо ім'я всій системі – "KranPodem10" ("механізм підйому крана"), зберігаючи це через меню "File / Export / To Workspace" (Зберегти в робочому просторі). Після виконаних дій вигляд вікна редактора наведений на рис. 4.4.

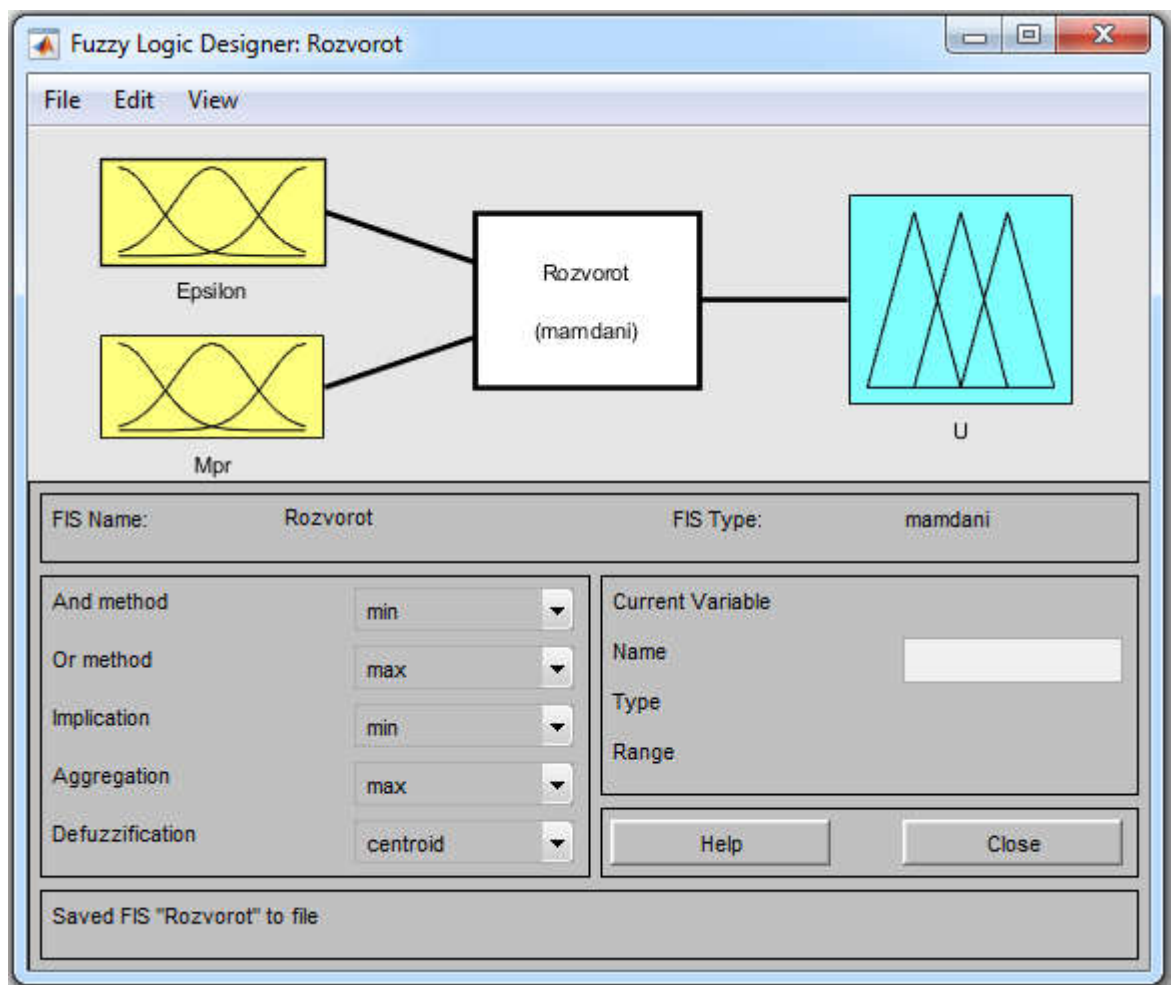


Рисунок 4.4 – Вид вікна FIS Editor після завдання структури системи

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).

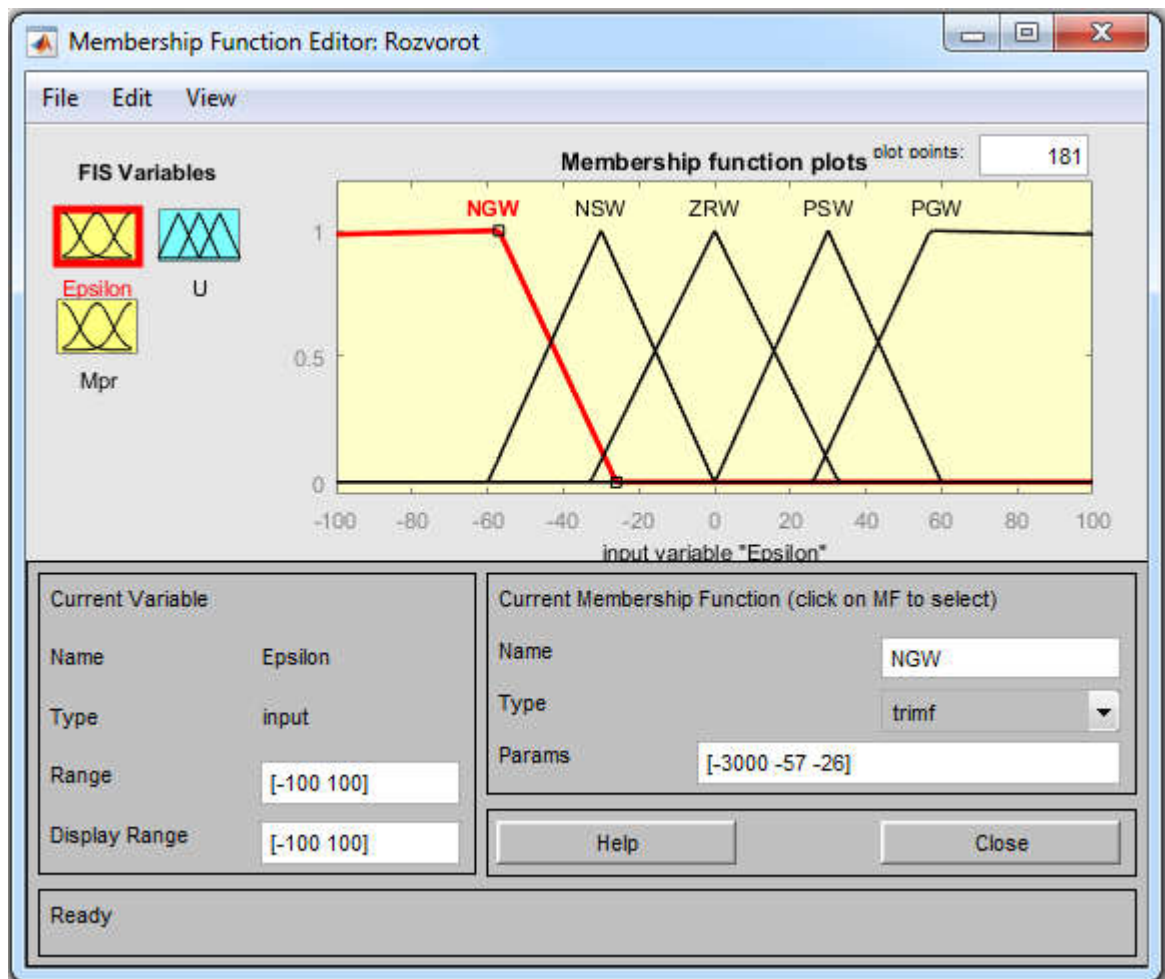


Рисунок 4.5 – Функції приналежності змінної «Epsilon»
(помилка регулювання $\varepsilon(t)$)

Спочатку встановимо діапазон зміни та відображення змінної у полях Range і Display Range від -100 до +100, 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).

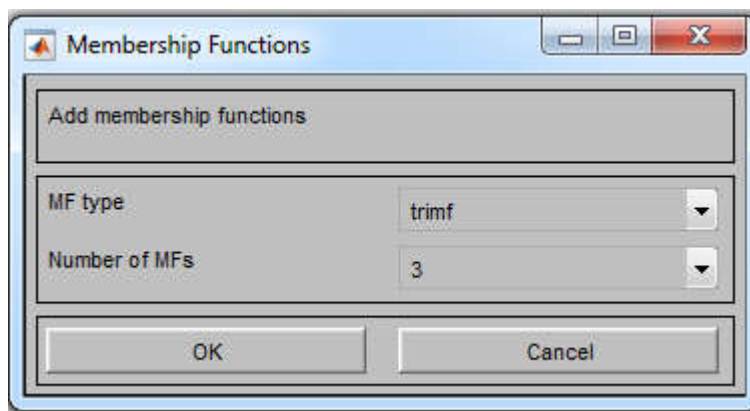


Рисунок 4.6 – Вид вікна завдання типа і кількості функцій приналежності

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 -1000 до +1000, 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).

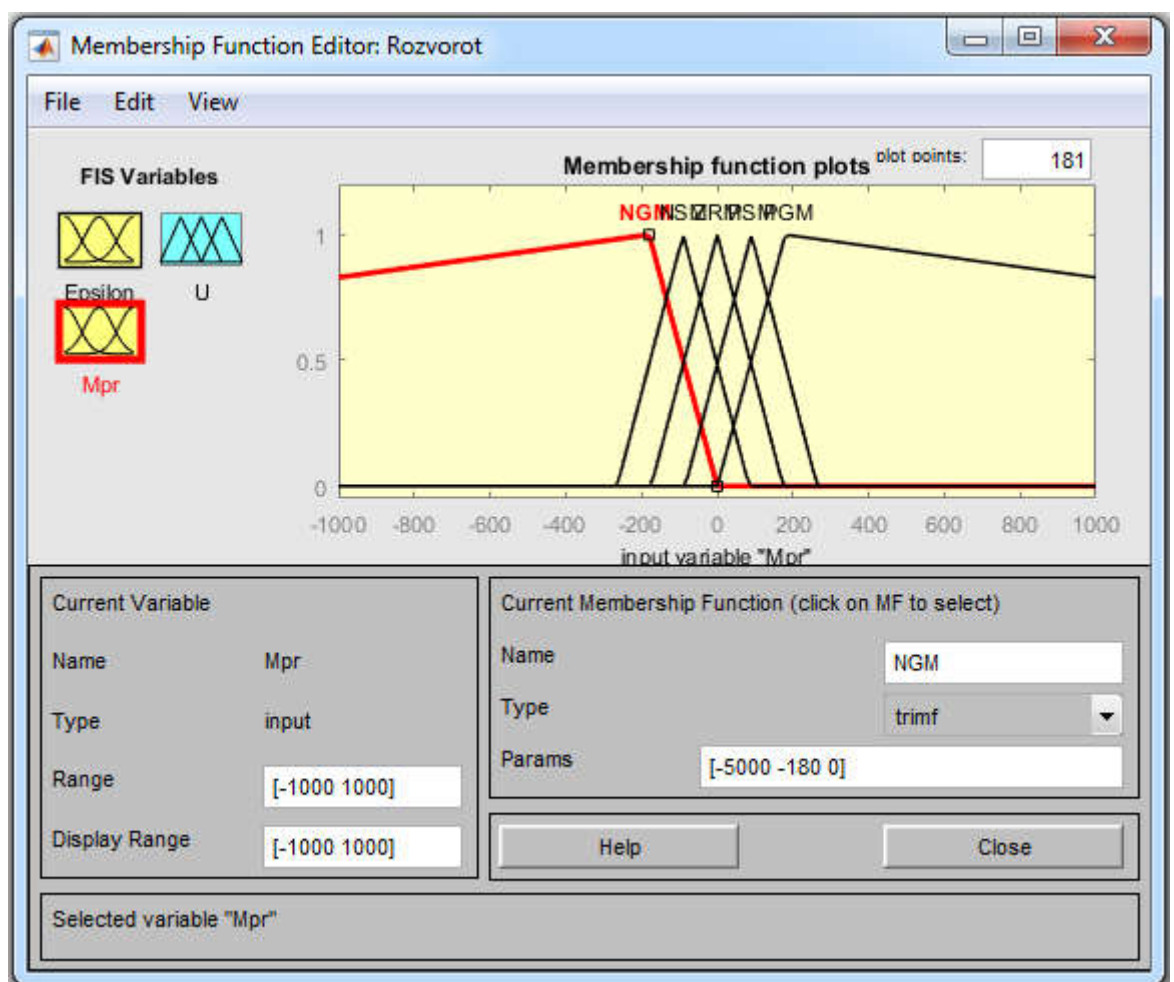


Рисунок 4.7 – Функції приналежності змінної «Mpr» ($M_{np}(t)$)

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.

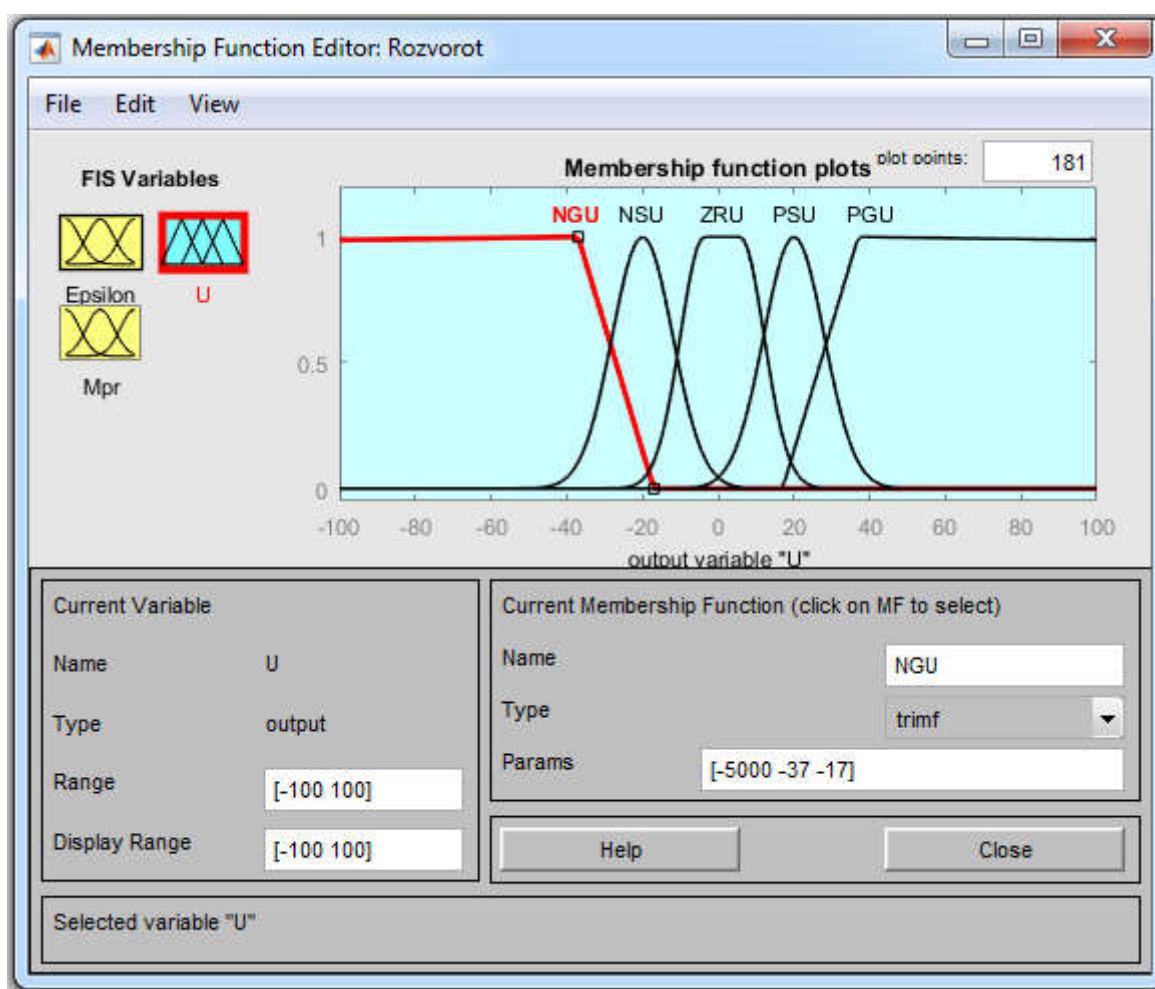


Рисунок 4.8 – Функції приналежності «U» (вихідної змінної $U(t)$)

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

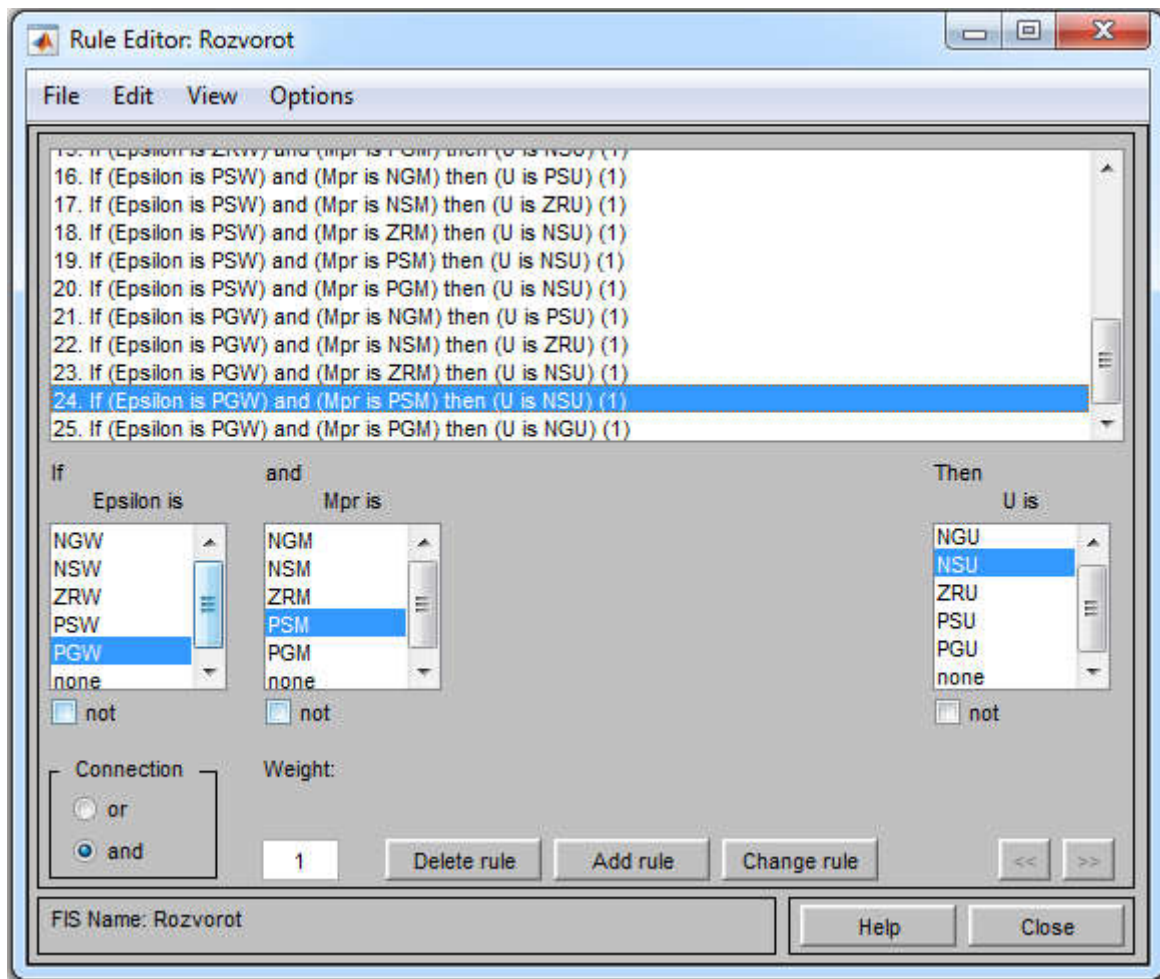


Рисунок 4.9 – Вікно редактора правил

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 призводить 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.

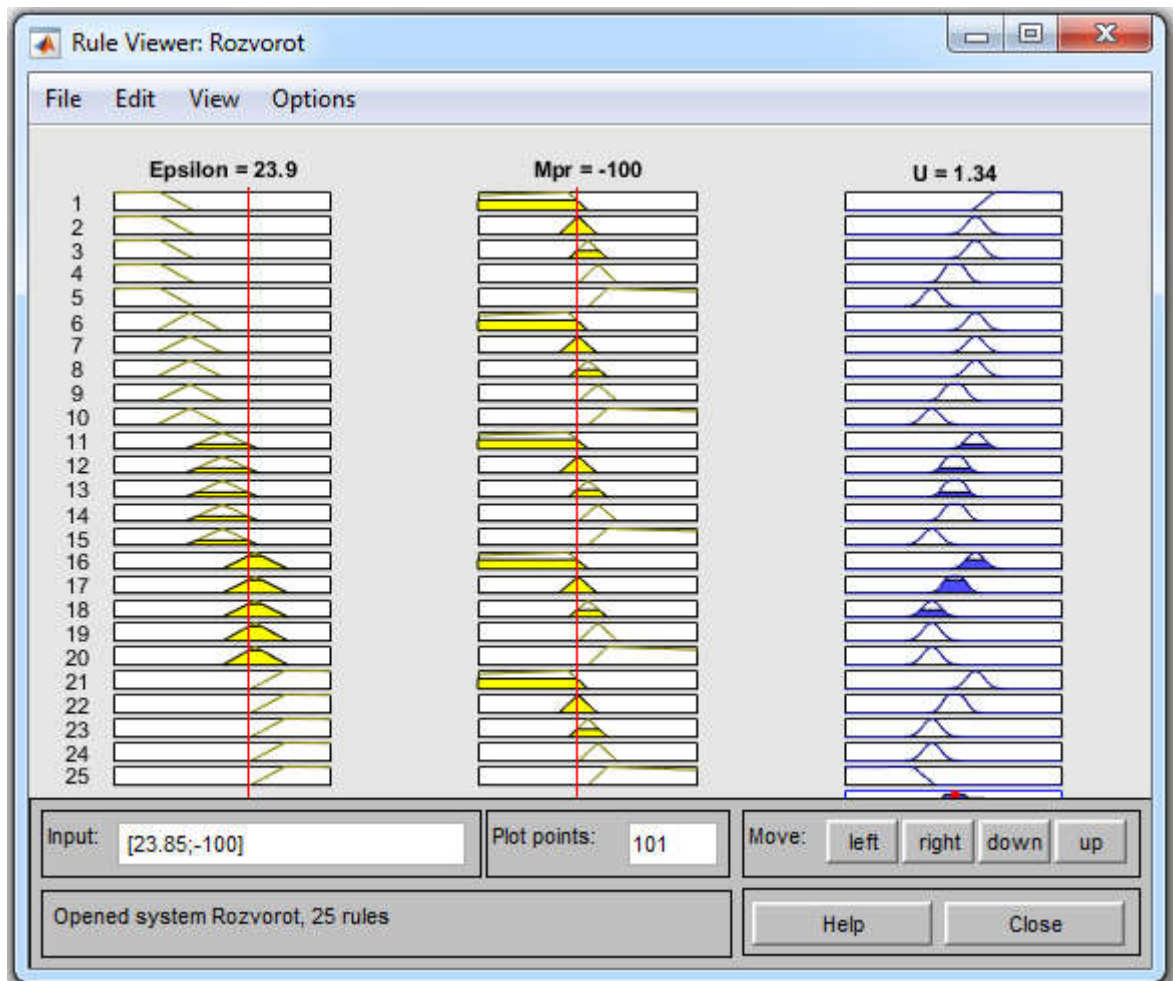


Рисунок 4.10 – Вікно перегляду правил

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 моменту пружності $Mpr(M_{np}(t))$ (рис. 4.12).

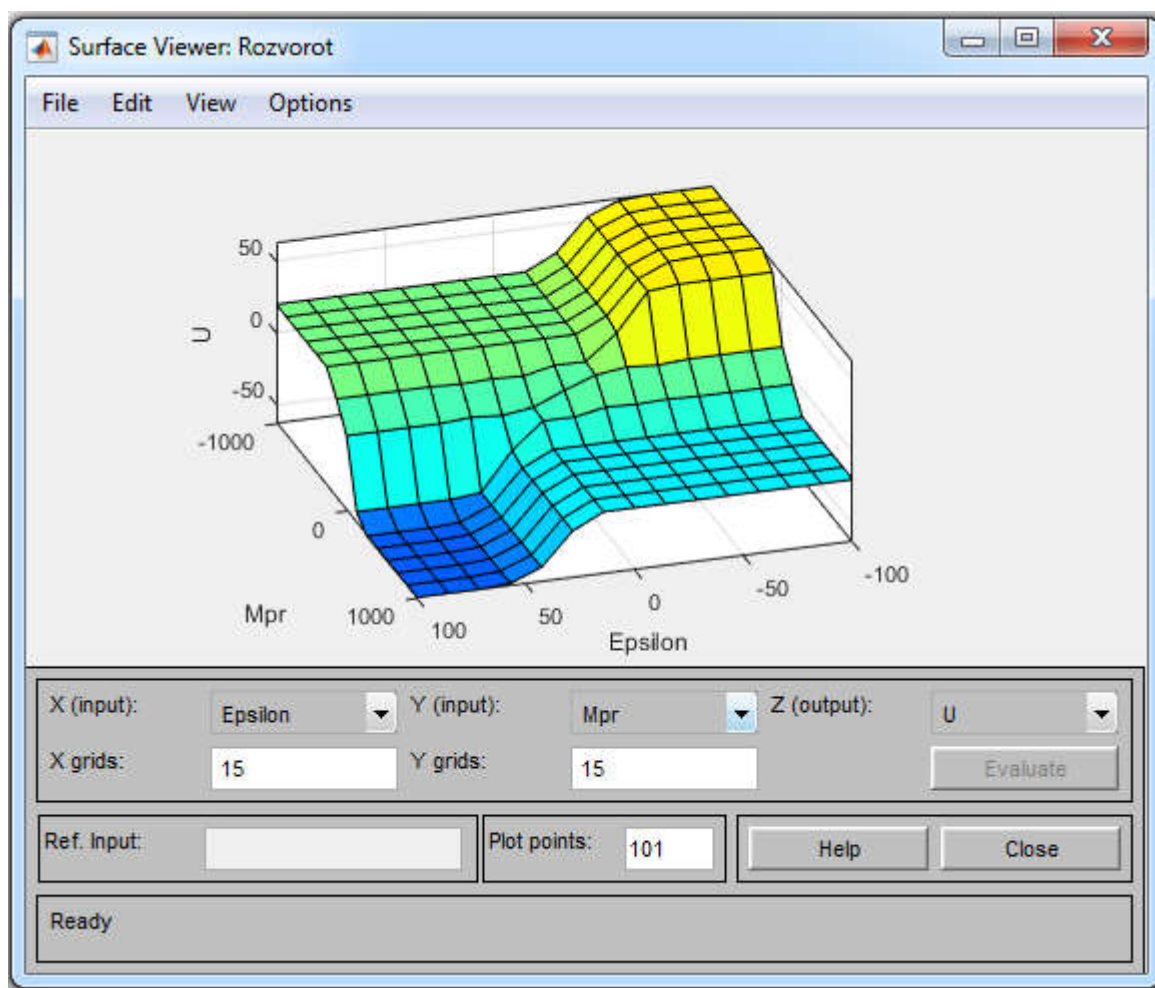


Рисунок 4.11 – Графічний вид залежності вихідної змінної від вхідних

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.

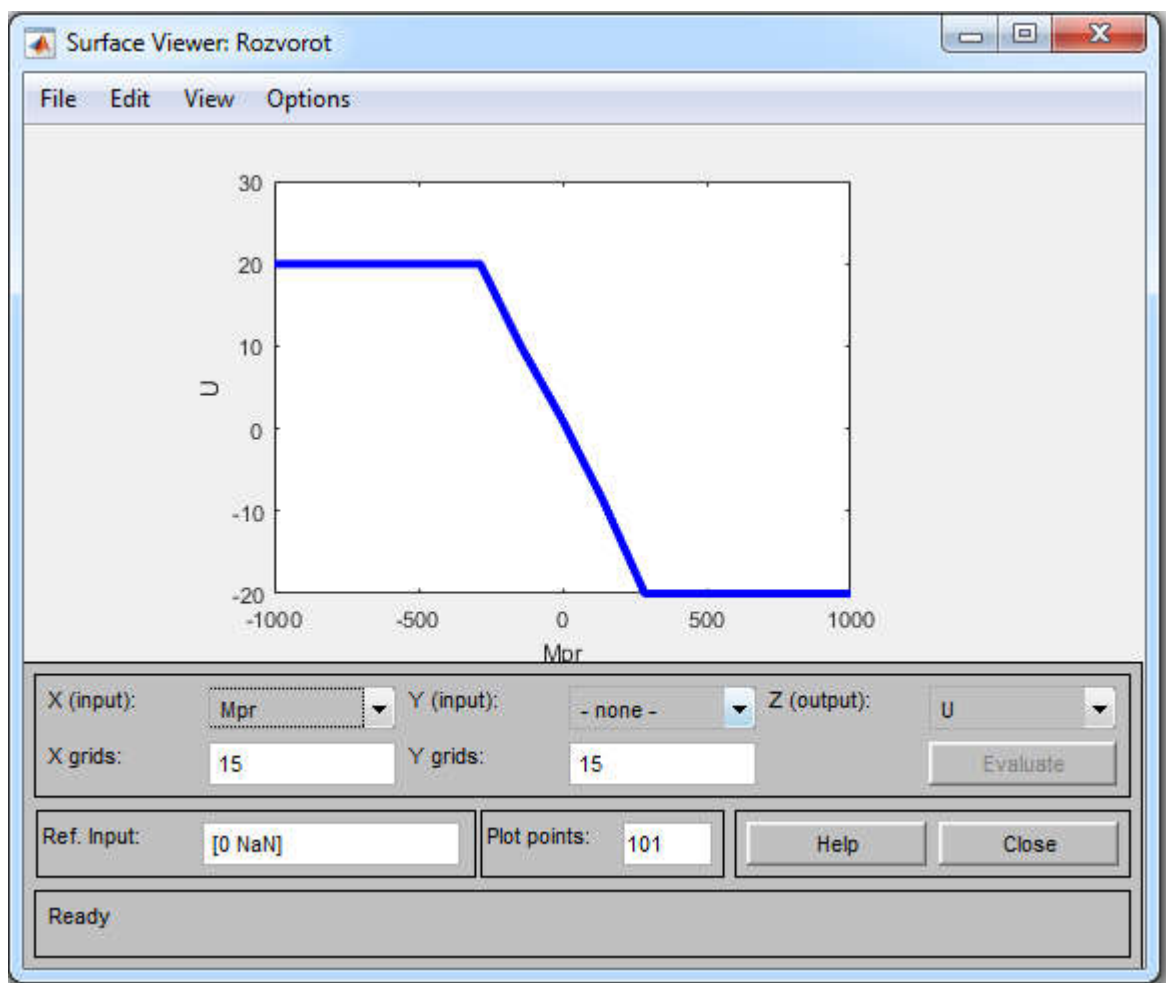


Рисунок 4.12 – Одновимірна залежність вихідний змінної U ($U(t)$) від вхідної – моменту пружності M_{pr} ($M_{pr}(t)$)

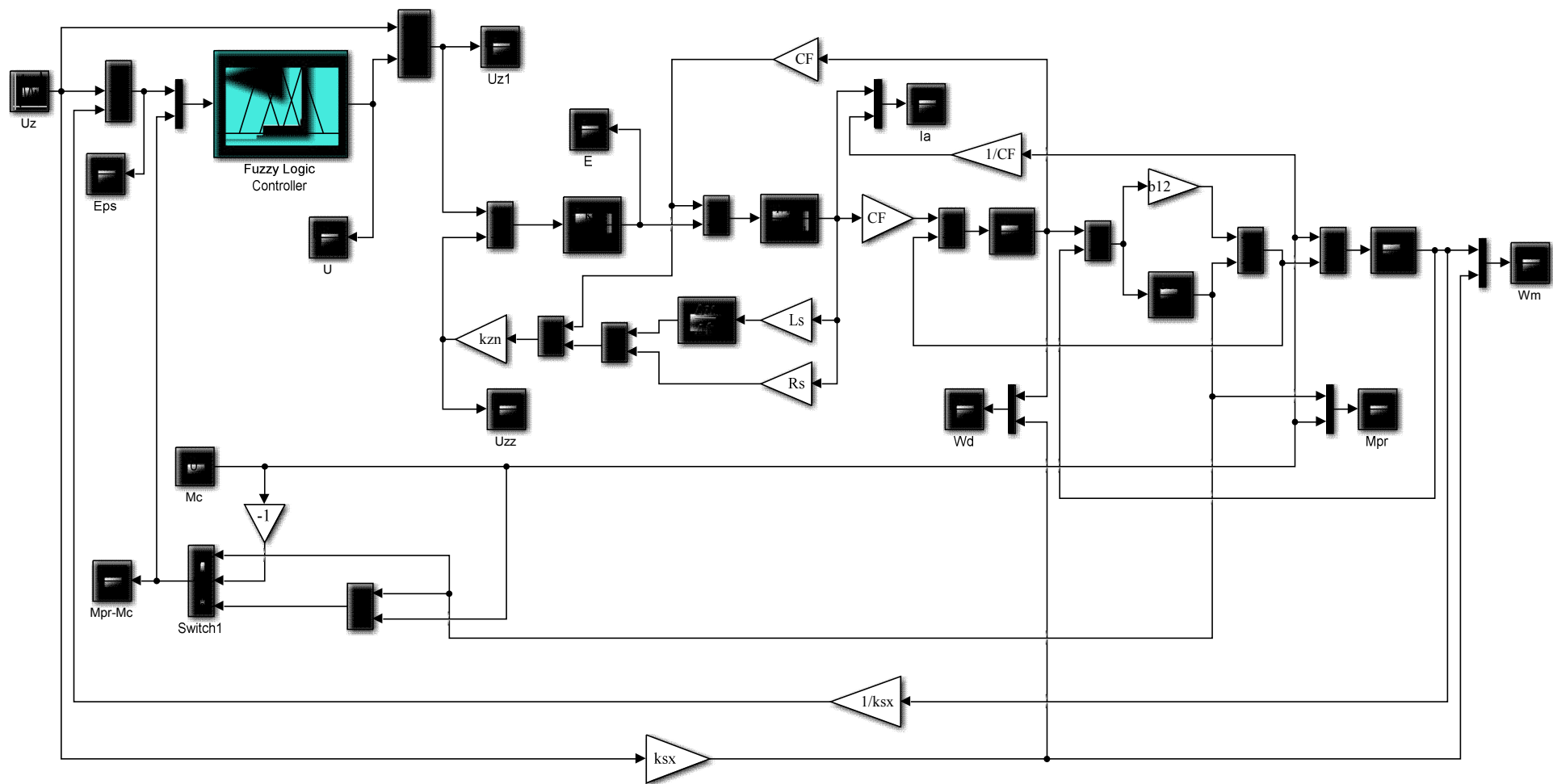
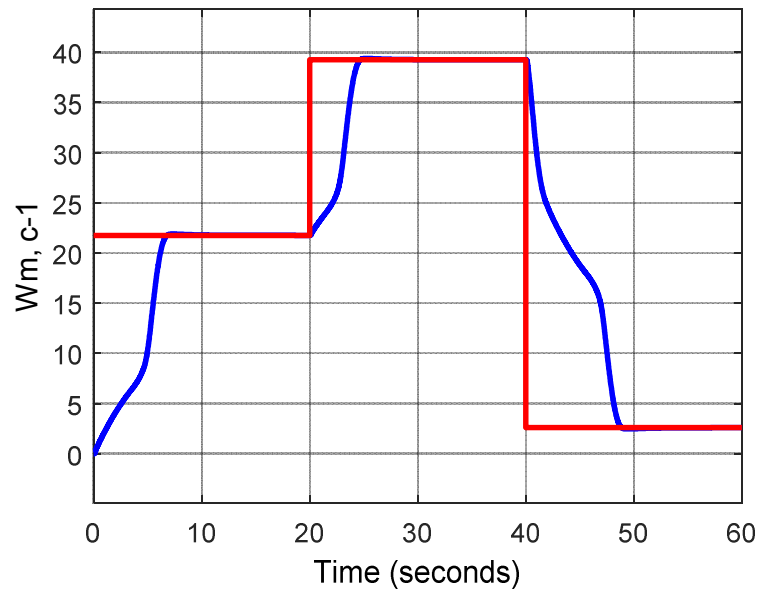
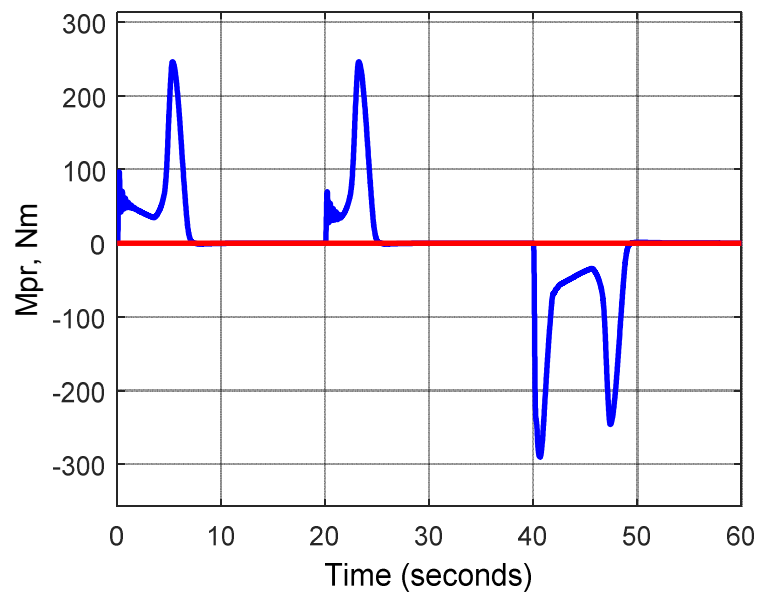


Рисунок 4.13 – Схема моделі двомасової системи з Fuzzy регулятором



a)

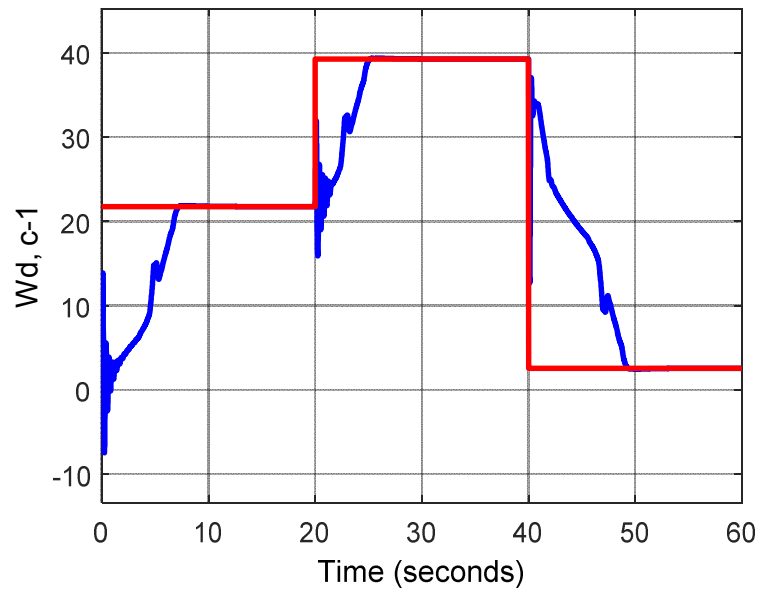


б)

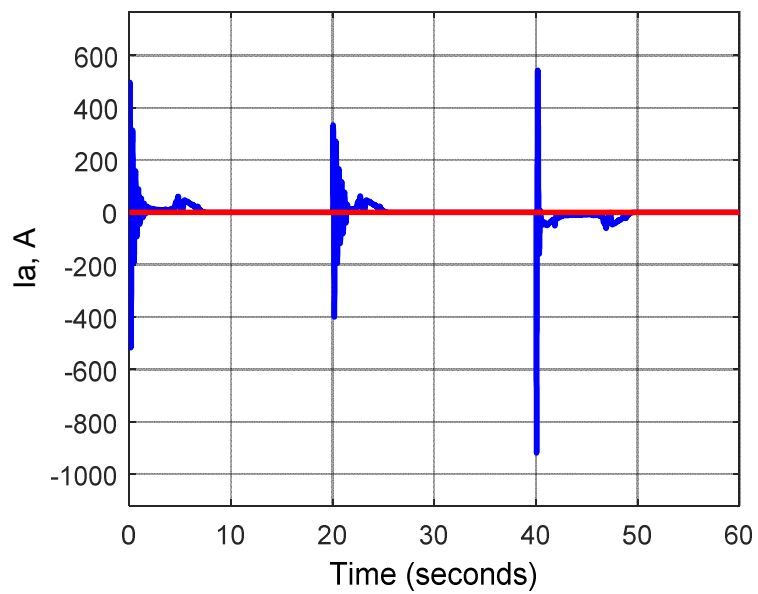
Рисунок 4.13 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму

$\omega_m = f(t)$ (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

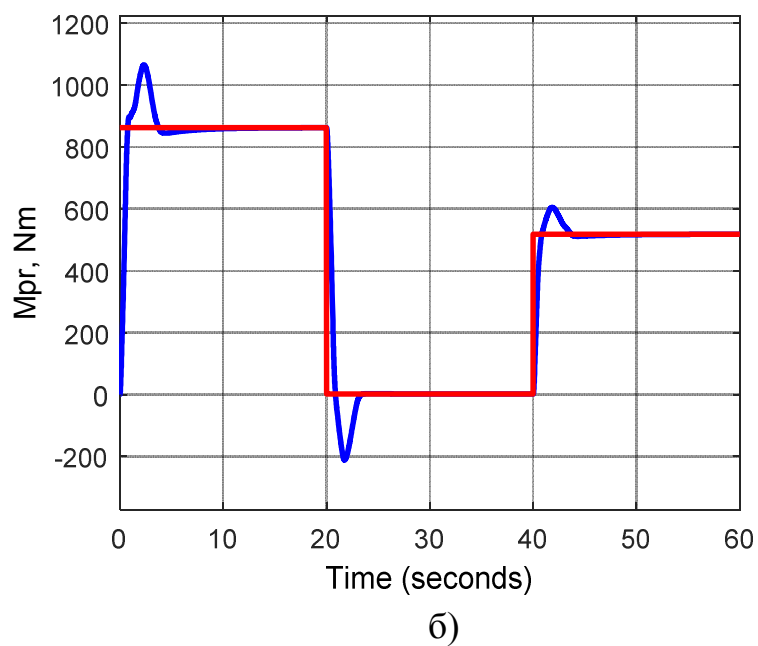
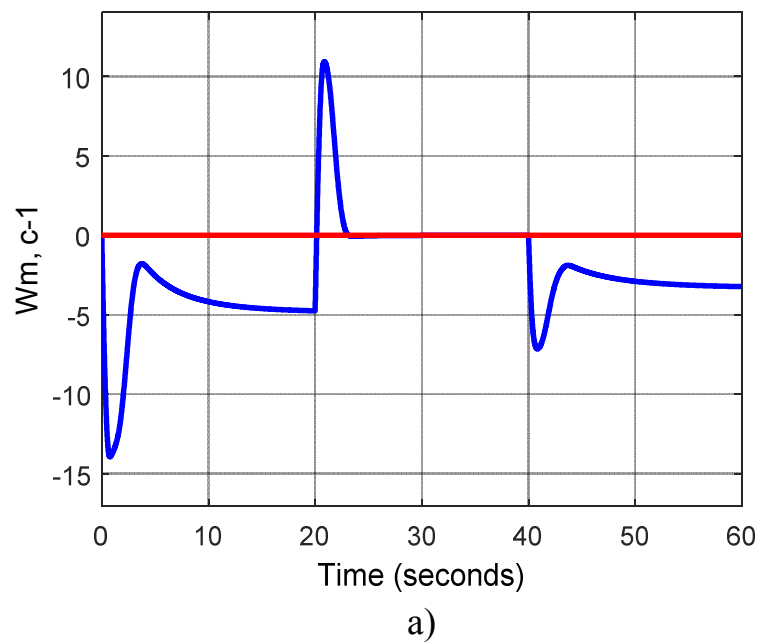
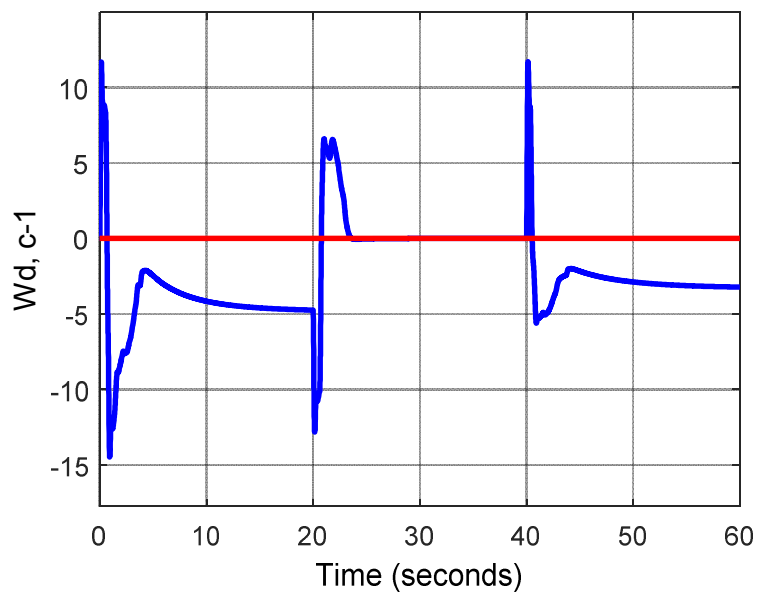
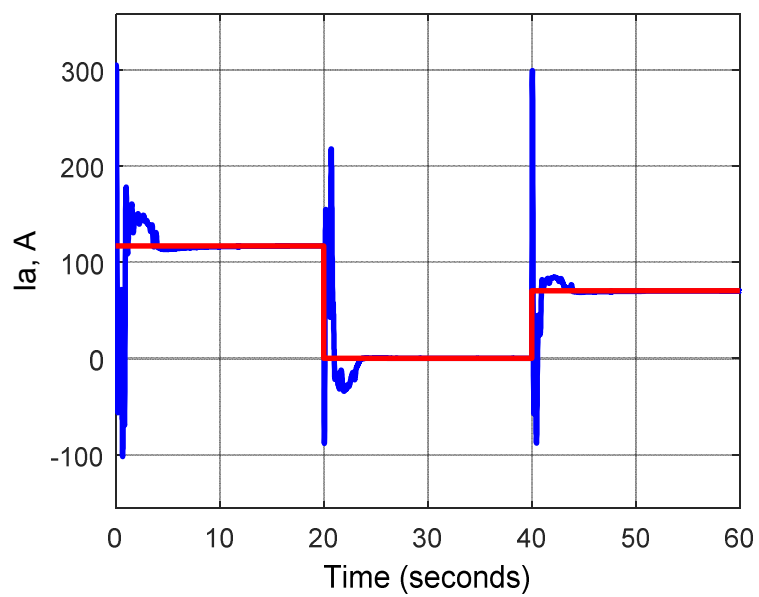


Рисунок 4.15 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{пр} = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по збурюючій дії



a)



б)

Рисунок 4.16 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і струму двигуна $I_d = f(t)$ (б) двохмасової 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 немає, час регулювання складає 8 с, що відповідає завданню.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача розробки нечіткої системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму розвороту 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 розвороту роторного екскаватора.

2. На підставі аналізу вимог до систем електроприводів основних механізмів роторних екскаваторів для електроприводу механізму розвороту вибраний електропривод постійного струму, виконаний за системою ТП–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, що має зворотний зв'язок по напрузі тиристорного перетворювача. 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, що враховує податливість механічних зв'язків між двигуном і механізмом. Виконано моделювання системи на комп'ютері. Дослідження виявили, що в двомасовій системі

перехідні процеси основних координат супроводжуються значними коливаннями.

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 показав, що показники якості перехідних процесів зміни стану системи у двомасовій системі з Fuzzy регулятором в режимі пуску і накиду навантаження мають задовільний характер. Перерегулювання немає, час регулювання складає 8 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. Василюк, А.Ю. Мезеря, О.О. Варфоломійєв. – 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. 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. Прикладные нечеткие системы: Перевод с япон./ К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. - М.: Мир, 1993.
33. Mamdani E. H. Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant. Porc. IEE. vol. 121, n. 12, pp. 1585-1588, 1974.
34. . Smidth F. L. Computing with a human face. New Scientist, 6 may, 1982.
35. 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.

36. 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.
37. Yasunobu S., and Hasegawa T. Predictive fuzzy control and its applications for automatic container crane operation system, in Proc. 2nd. IFSA Congress, Tokyo, Japan, July 1987.
38. F. Fujitec, FLEX-8800 series elevator group control system, Fujitec Co., Ltd., Osaka, Japan, 1988.
39. 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.
40. Sangalli A., and Klir G.R. Fuzzy logic goes to market, New Scientist, 8 Feb., 1992.
41. Wang, L. X., and J. M. Mendel. "Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning." IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 3, no. 5, 1992, pp. 807–814.
42. Castro, J. L. "A fuzzy logic controller: Introduction and applications." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 25, no. 4, 1995, pp. 665–685.
43. Kosko, Bart. "Fuzzy systems as universal approximators." IEEE Transactions on Computers, vol. 43, no. 11, 1993, pp. 1329–1333.
44. Системы электропривода и электрооборудования роторных экскаваторов. / Ю.Т. Калашников, А.О. Горнов, В.Н. Остриров и др. – М.; Энергоатомиздат, 1988 – 312 с.
45. Подерни Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ в 2 томах - М.; МГГУ, Издание 4, 2001 – 754 с.
46. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К. : Либідь, 2007. – 656 с.
47. Голюк П.Ф., Гречин Т.М. Теорія автоматичного керування: Навчальний посібник. – Л: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 280 с.

48. Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Лисенко В.П. Теорія автоматичного управління: навч. посіб. – К.: Вид. Центр НУБіП України, 2012. – 240 с.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. Євстіфєєв В. О. Теорія автоматичного керування. Частина 1. Безперервні лінійні та нелінійні системи. Навчальний посібник. – Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2006. – 288 с.
53. Євстіфєєв В. О. Теорія автоматичного керування. Частина 2. Спеціальні системи автоматичного керування. Навчальний посібник. – Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2007. – 224 с.
54. І.Г. Абраменко, Д. І. Абраменко Теорія автоматичного керування. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 178 с.
55. 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
56. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інш. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г.Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інш. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1.

57. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інш. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інш. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч2.
58. 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.
59. Гурко О.Г. Аналіз та синтез систем автоматичного управління у MATLAB: Навчальний посібник / О.Г. Гурко, І.Ф. Єрьоменко. Харків, ХНАДУ, 2012. – 284 с.
60. 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.
61. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. –СПб: Питер, 2001. –488 с.
62. Круглов В.В., Дли М.И. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечёткой логики и нечёткого вывода. – М.: Физматлит, 2002. – 252 с.
63. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде МАТЛАБ и fuzzyTECH.-СП.:БХБ-Петербург, 2003.-736с.
64. ШтовбаС.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба – М.: "Горячая линия - Телеком", 2007. – 288 с.
65. 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 НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

А.1 Визначення 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

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

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

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

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:

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

Введемо далі наступні поняття.

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

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

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

Терм-множиною називається множина всіх можливих значень лінгвістичної змінної.

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

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

А.2 Нечіткість і вірогідність

Добре відомий той факт, що стохастична (імовірнісна) і лінгвістична невизначеності мають різний характер. *Стохастична невизначеність* має справу з невизначеністю того, чи відбудеться деяка добре описана подія в майбутньому, а теорія вірогідності дозволяє дати на це питання ту або іншу відповідь.

Лінгвістична невизначеність пов'язана з неточністю опису самої ситуації або події незалежно від часу їх розгляду. Теорія вірогідності не може використовуватися для вирішення подібних проблем, оскільки уявлення про суб'єктивні категорії, присутні в процесах мислення людини, повною мірою не узгоджуються з її аксіомами.

Проте, деякі з фахівців, що інтенсивно працюють з теорією вірогідності і математичною статистикою, довгий час заперечували саму можливість застосування нечіткої логіки в додатках. Ці фахівці часто стверджували, що всі види невизначеності можуть бути виражені в поняттях теорії вірогідності. В той же час, очевидно, що як теорію вірогідності, так і теорію нечітких множин доцільно використовувати для моделювання різних аспектів невизначеності, що відрізняються за своєю природою.

Поняття нечіткої множини здатне забезпечити адекватною інформацією щодо неточного опису тих або інших ситуацій. По суті, цей підхід найбільш застосовний для вирішення таких проблем, в яких невизначеність характеризується відсутністю добре визначених критеріїв, що дозволяють однозначно судити про приналежність елементів тому або іншому класу. Саме у цьому виявляється відмінність між нечіткістю і випадковістю. В той же час нечіткі моделі не є заміною моделей, розроблених в теорії, вірогідності. Кожна чітка множина є нечіткою, але зворотне твердження не вірне.

Тому нечіткі моделі узагальнюють традиційні і більш знайомі нам математичні моделі. Іноді вони працюють краще, а іноді ні. Врешті-решт, ефективність моделі виявляється в її здатності адекватно вирішити ту або іншу конкретну проблему.

Як правило, складна проблема в тому або іншому ступені пов'язана з невизначеністю. Досягнуті останнім часом вражаючі успіхи в застосуванні нечітких технологій для вирішення найрізноманітніших практичних завдань дозволяють стверджувати, що нечітке моделювання реальних складних систем — ефективна альтернатива традиційним математичним моделям і методам.

А.3 Функції приналежності нечіткої логіки

Вищенаведене формальне визначення нечіткої множини не накладає ніяких обмежень на вибір конкретної функції приналежності для його уявлення. Проте на практиці зручно використовувати ті з них, які допускають аналітичне уявлення 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).

З практичної точки зору найбільшою популярністю користуються функції типу гауса, а також трикутні і трапецеїдальні функції.

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

$$\mu_A(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c}{\sigma} \right)^2 \right]. \quad (\text{A.4})$$

На рис. А.1 представлена форма типових функцій гаусів при різних параметрах c і a , причому на рис. А.1 а показаний вплив розміщення центру c при незмінному значенні a , а на рис. А.1 б – вплив значення a при фіксованому положенні c . Параметр c позначає центр нечіткої множини, а його зміна відповідає зсуву функції приналежності по горизонтальній осі. Параметр, іноді званий коефіцієнтом широти, відповідає за форму функції. Чим менше його значення, тим більше крутизна функції. Слід зазначити, що при відповідному зсуві центру функція гауса може реалізувати і сигмоїдальну функцію (найчастіше при зсуві управо c).

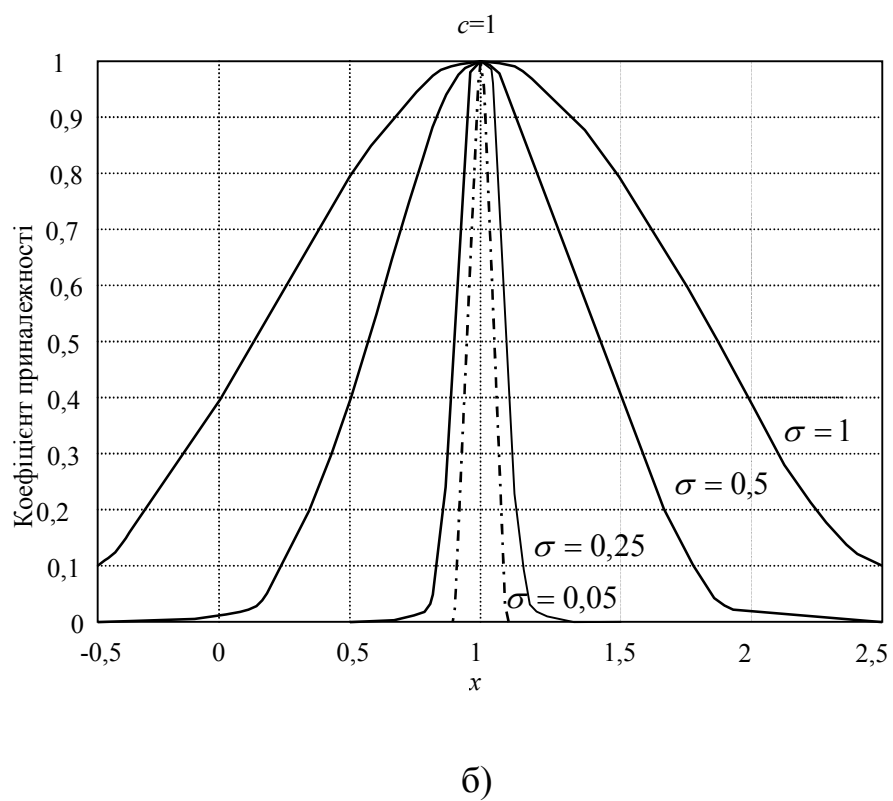
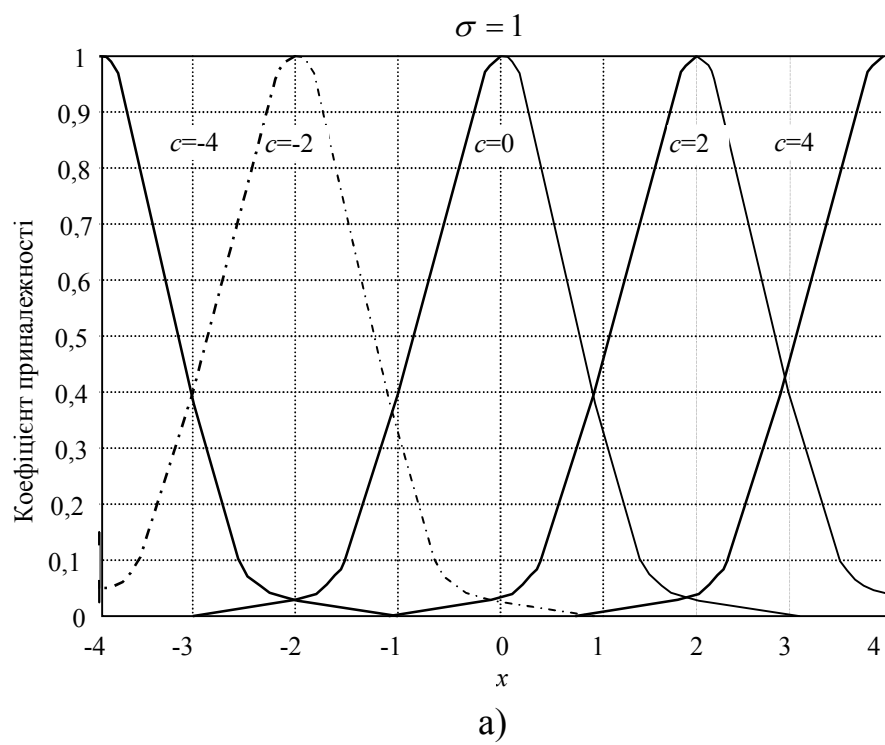


Рисунок А.1 – Ілюстрація впливу параметрів функції гауса на її форму:

а – вплив розміщення центру c при $\sigma = 1$;

б – вплив значення σ при постійному значенні $c = 1$

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

$$\mu_A(x) = \exp \left[- \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^{2b} \right]. \quad (\text{A.5})$$

Вона оперує трьома параметрами: c , σ і b . Значення параметра b істотним чином впливає на форму кривої, що демонструється на рис.А.2.

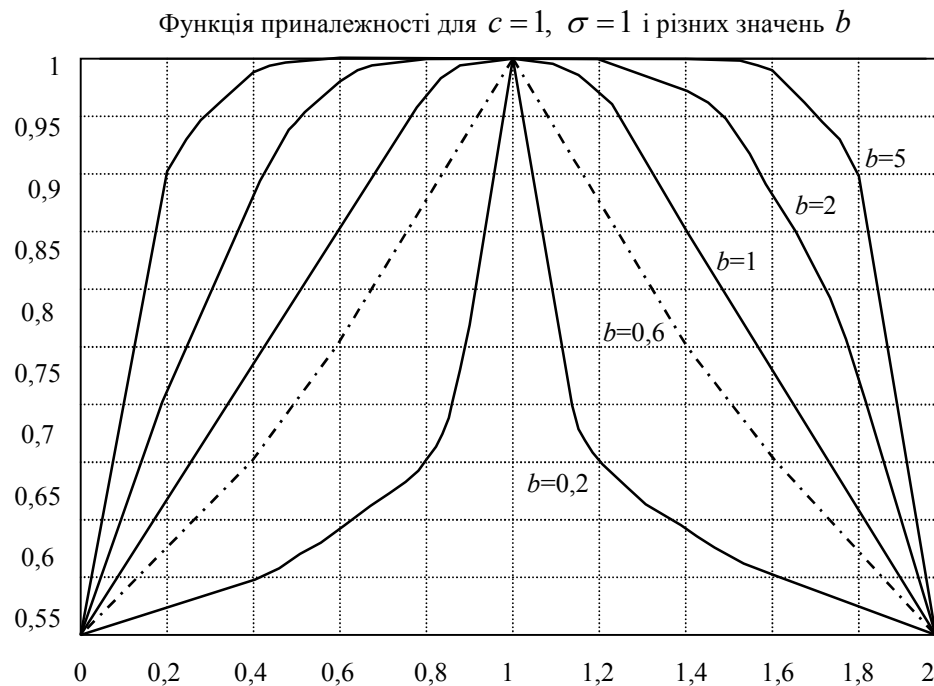


Рисунок А.2 – Ілюстрація впливу параметра b на форму функції гауса

На рисунку видно, що при відповідному підборі показника ступеня b (залежність (А.5)) вона може визначати як функцію Гауса, так і трикутну або трапеїдальну, функцію. Значення $b = 1$, очевидно, відповідає стандартній функції гауса. Узагальнена функція гауса також може бути представлена в раціональній формі:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^{2b}}, \quad (\text{A.6})$$

яка аналогічна описуваною виразом (А.5).

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

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x-c|}{d} & \text{для } x \in [c-d, c+d] \\ 0 & \text{для інших} \end{cases}. \quad (\text{A.7})$$

Інтерпретація центральної точки c і ширини d для трикутної функції представлена на рис. А.3 а. Ця функція теж нормована і приймає одиничне значення в центральній точці c .

Узагальненням трикутної функції є трапецеїдальна функція приналежності, форма і позначення якої представлені на рис. А.3 б.

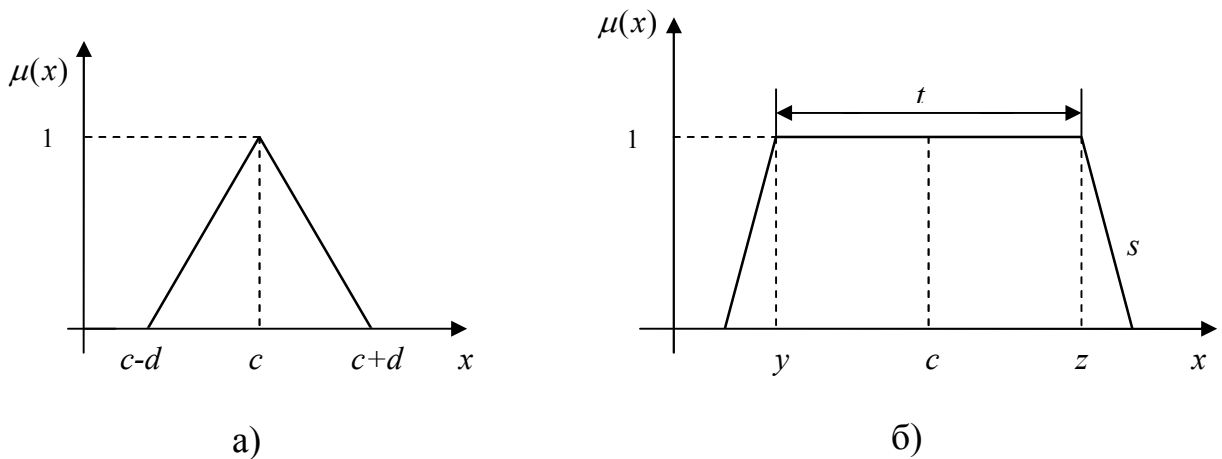


Рисунок А.3 – Трикутна а) і трапеціїдальна б) форми функцій приналежності

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

$$\mu_{A^{(1)}}(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{для } x > z \text{ або } x < y \\ 1 & \text{для } c - \frac{t}{2} \leq x \leq c + \frac{t}{2} \\ s(z-x) & \text{для } c + \frac{t}{2} \leq x \leq z \\ s(z-y) & \text{для } y \leq x \leq c - \frac{t}{2} \end{cases}. \quad (\text{A.8})$$

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

ДОДАТОК Б

ОПЕРАЦІЇ НАД НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ І ВІДНОСИНАМИ

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 $\forall x \in E \quad \mu_A(x) = 1 - \mu_B(x)$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Приклади. Нехай

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

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

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

Тут:

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

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

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

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

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

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

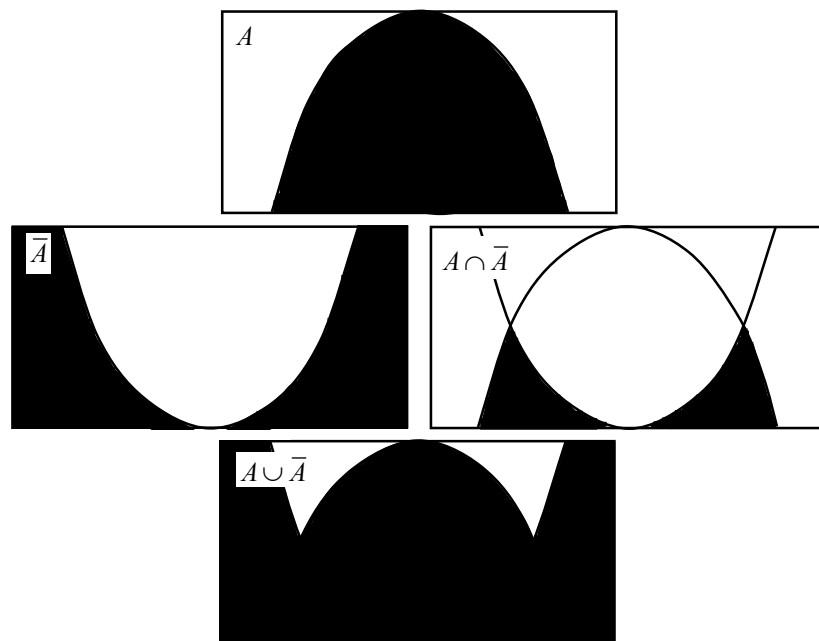


Рисунок Б.1 – Графічна інтерпретація логічних операцій

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

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

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

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

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

Простим випадком трикутних норм є:

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

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

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

Приклади *T* - конорм:

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

Б.2 Алгебраїчні операції 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) $\left. \begin{array}{l} \overline{A \cdot B} = \overline{A} \hat{+} \overline{B} \\ \overline{A \hat{+} B} = \overline{A} \cdot \overline{B} \end{array} \right\} - \text{теореми де Моргана}.$

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 $A \cdot \overline{A} = \emptyset, A \hat{+} \overline{A} = E.$

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 $\alpha \leq 1$.

Б.3 Нечіткі відношення

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. Б.1.

Таблиця Б.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».

Б.4 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 відносин R_1 і R_2 позначається $R_1 \oplus R_2$ і визначається виразом

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

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

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

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

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

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

називається (max-min) – композицією ((max-min)-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

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x_1 \cdot z_1) = (\mu_{R_1}(x_1 \cdot y_1) \wedge \mu_{R_2}(y_1 \cdot z_1)) \vee$$

$$\vee (\mu_{R_1}(z_1, y_2) \wedge \mu_{R_2}(y_2, z_1)) \vee (\mu_{R_1}(x_1, y_3) \wedge \mu_{R_2}(y_3, z_1)) =$$

$$= (0,1 \wedge 0,9) \vee (0,7 \wedge 0,3) \vee (0,4 \wedge 0,1) = 0,1 \vee 0,3 \vee 0,1 = 0,3$$

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 В

НЕЧІТКІ ВИСНОВКИ

В.1 Порядок формування нечітких висновків

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

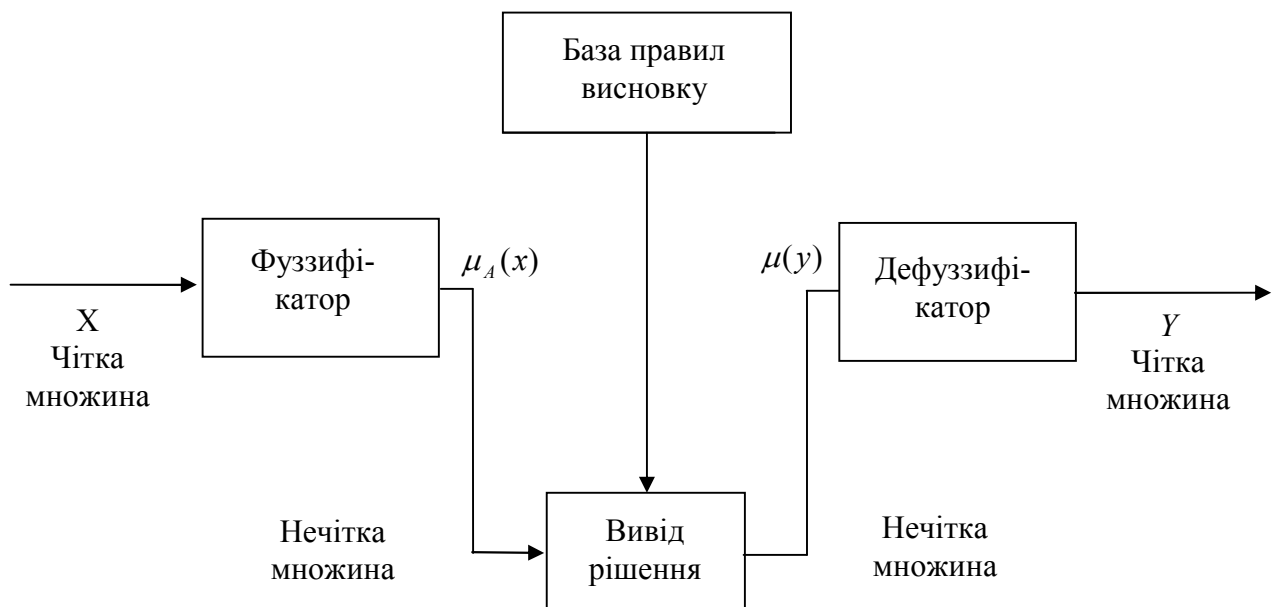


Рисунок В.1 – Структура нечіткої системи з фузифікатором і дефузифікатором

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

Необхідно відзначити, що також існують системи нечіткого висновку, у яких виконавчий механізм безпосередньо генерує чіткі значення, які вже не потрібно піддавати дефузифікації.

Узагальнена функціональна структура системи, приведена на рис.В.1, може бути представлена в розширеній формі, яка в явному вигляді демонструє правила нечіткого висновку так, як це зображено на рис. В.2.

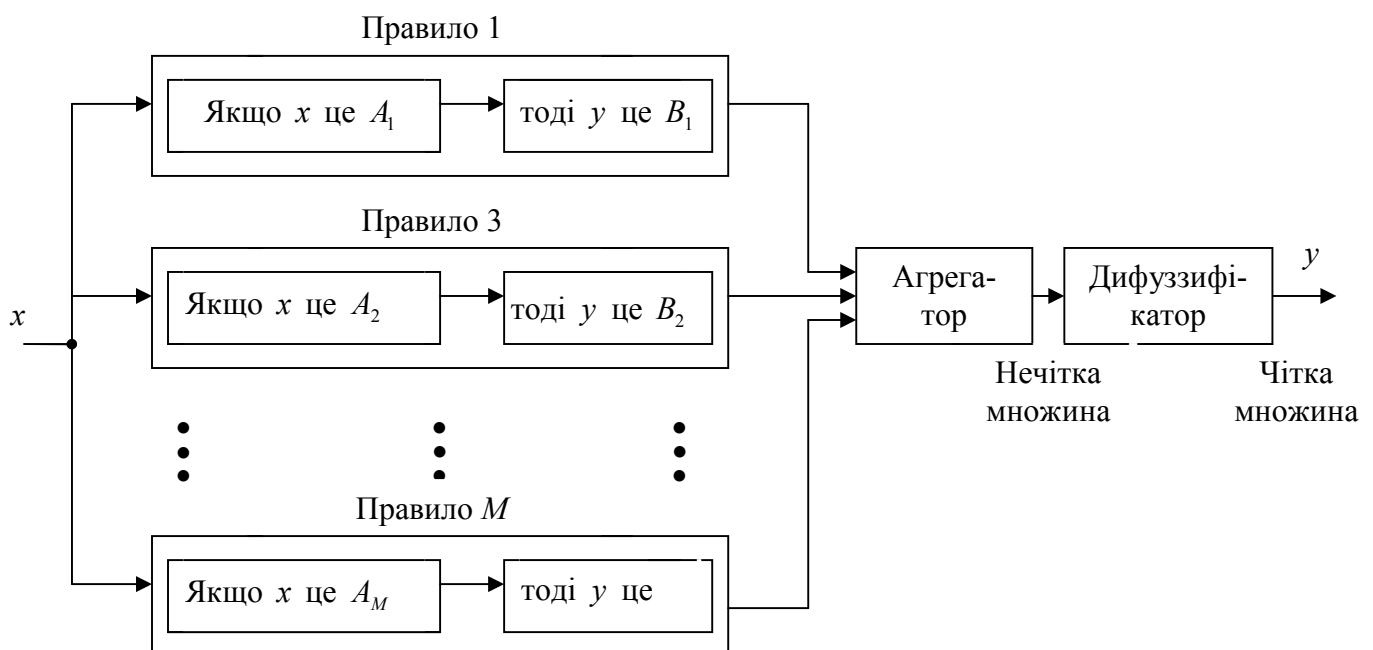


Рисунок В.2 – Організація висновку в нечіткій системі при наявності M правил висновку

Оскільки допускається застосування множини нечітких правил, в ній також передбачений блок агрегації, що найчастіше реалізовується у вигляді логі-

чного суматора (оператор Max). Описувана система висновку називається системою Мамдані-Заде. Вона дуже популярна в звичайних (неадаптивних) нечітких системах.

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:

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

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

....

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

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

Приклад подібного правила.

Якщо x – «низьке», то y – «високе».

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

$$R = A \rightarrow B,$$

де « $\rightarrow$ » називається нечіткою імплікацією.

Відношення R можна розглядати як нечітка підмножина прямого добутку $X \times Y$ повної множині передумов X і висновків Y . Таким чином, процес отримання (нечіткого) результату висновку B' з використанням даного спостереження A' і знання $A \rightarrow B$ можна представити у вигляді формули

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

де «•» – 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 входніх 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.

Приклад. Хай 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;

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.В.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. В.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 $\alpha(z_0)$.

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 .

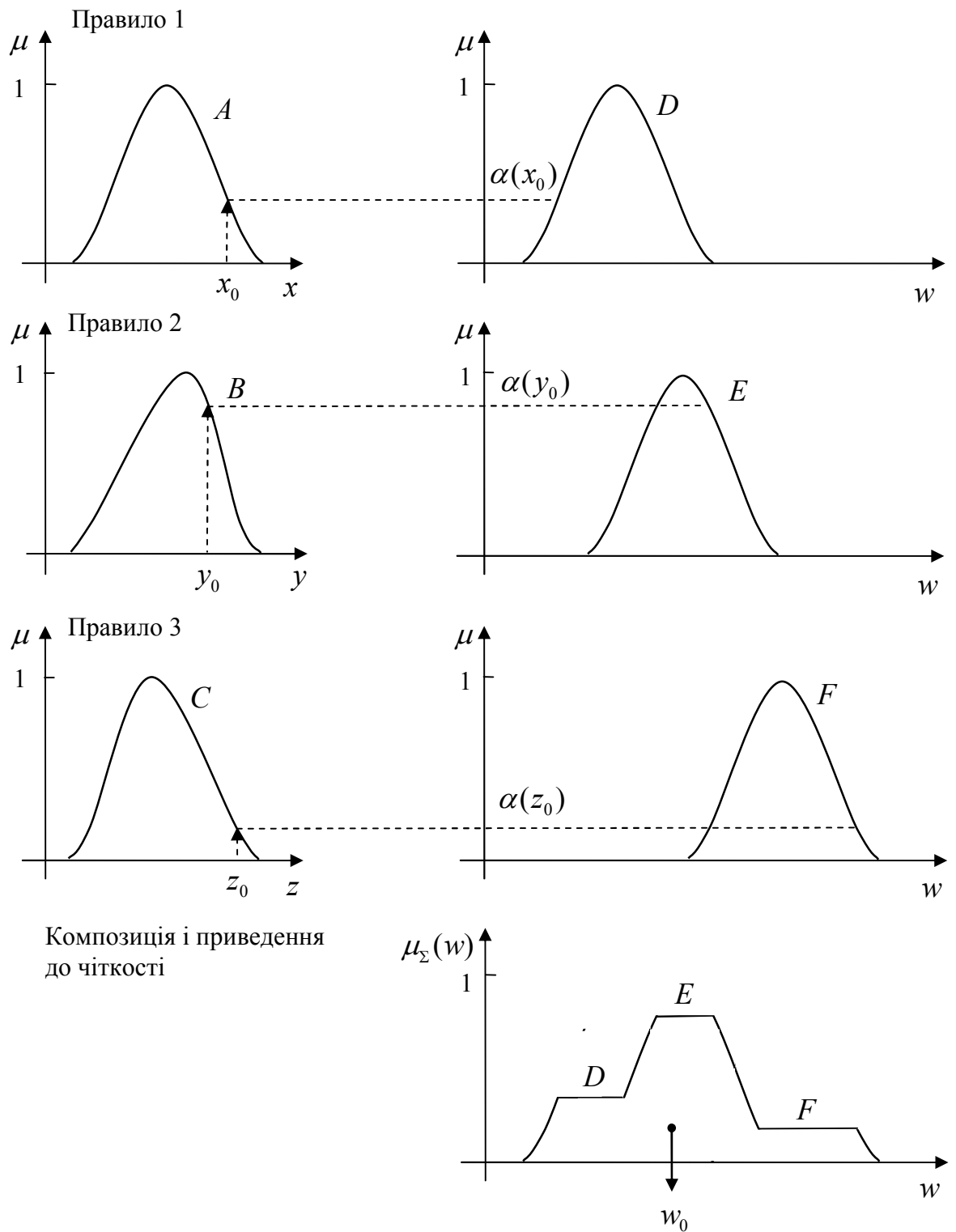


Рисунок В.3 – Ілюстрація до процедури логічного висновку

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

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

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 .

B.2 Алгоритм Mamdani

Одним з найбільш поширених алгоритмів нечіткого висновку є *алгоритм Мамдані* (Mamdani.). Даний алгоритм відповідає розглянутому прикладу і рис.В.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.

В.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):

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

у загальному випадку (дискретний варіант центроїдного методу)

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

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. В.4)

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

В.4 Алгоритм Sugeno

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

Π_1 : якщо $x \in A_1$ і $y \in B_1$, тоді $z_1 = \alpha_1 x + b_1 y$,

Π_2 : якщо $x \in A_2$ і $y \in B_2$, тоді $z_2 = \alpha_2 x + b_2 y$.

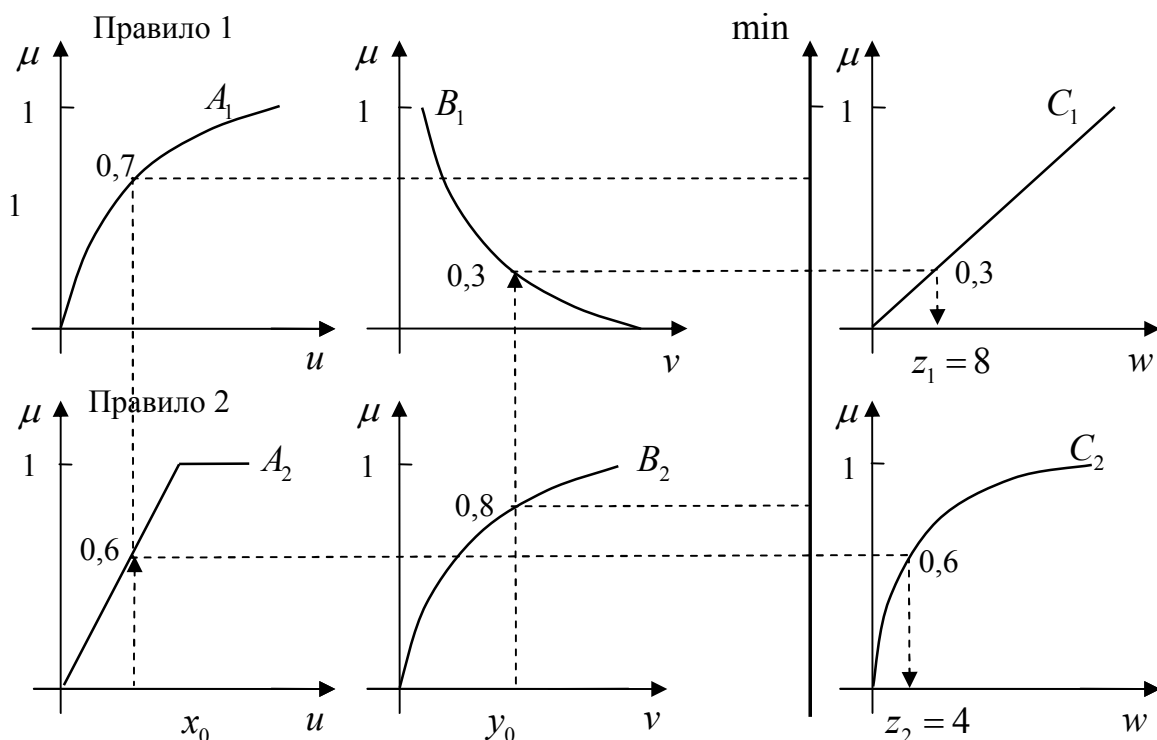


Рисунок В.4 – Ілюстрації до алгоритму Tsukamoto

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:

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

Ілюструє алгоритм рис. В.5.

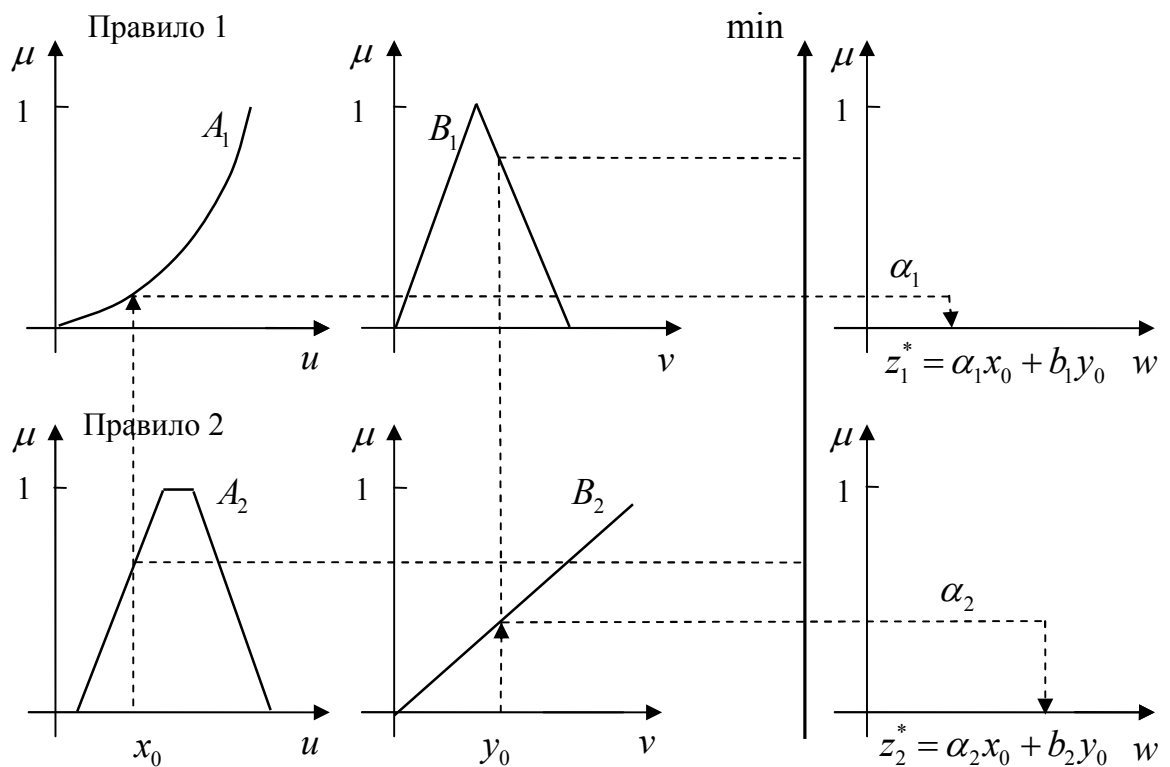


Рисунок В.5 – Ілюстрація до алгоритму Sugeno

В.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. В.6.

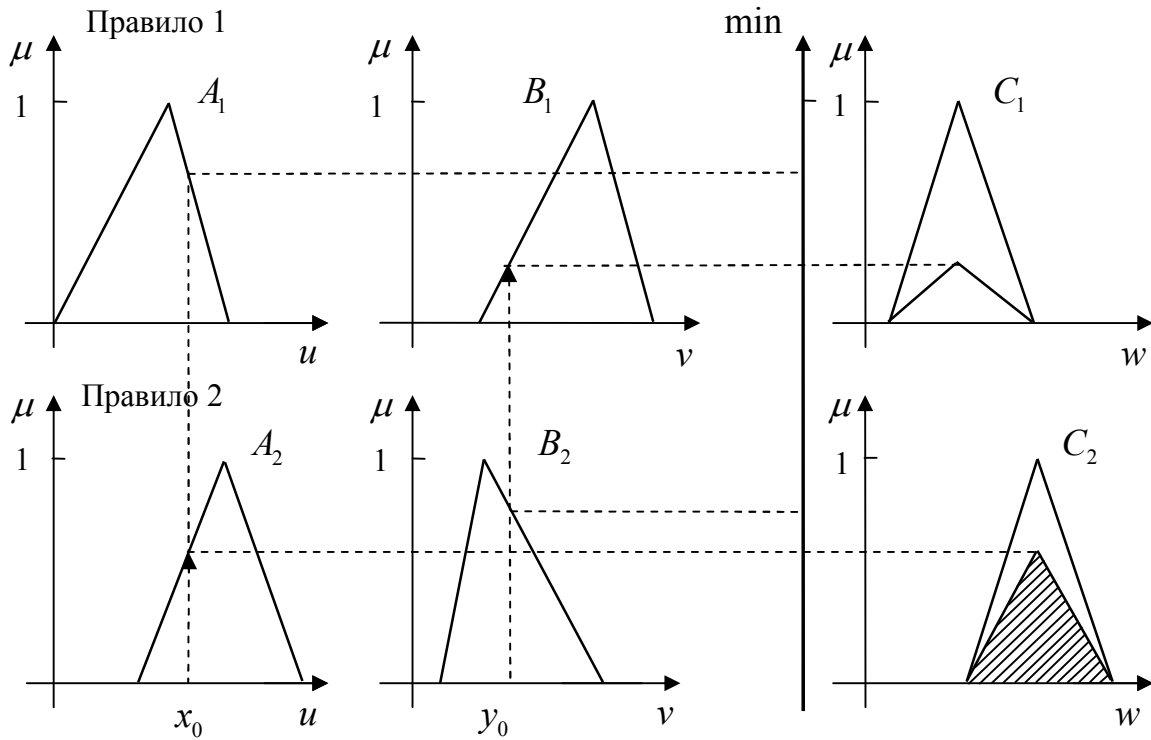


Рисунок В.6 – Ілюстрація алгоритму Larsen

В.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

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

або – в загальному випадку наявності n правил – по формулі

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i c_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}. \quad (\text{B.6})$$

Ілюстрація алгоритму приведена на рис. В.7.

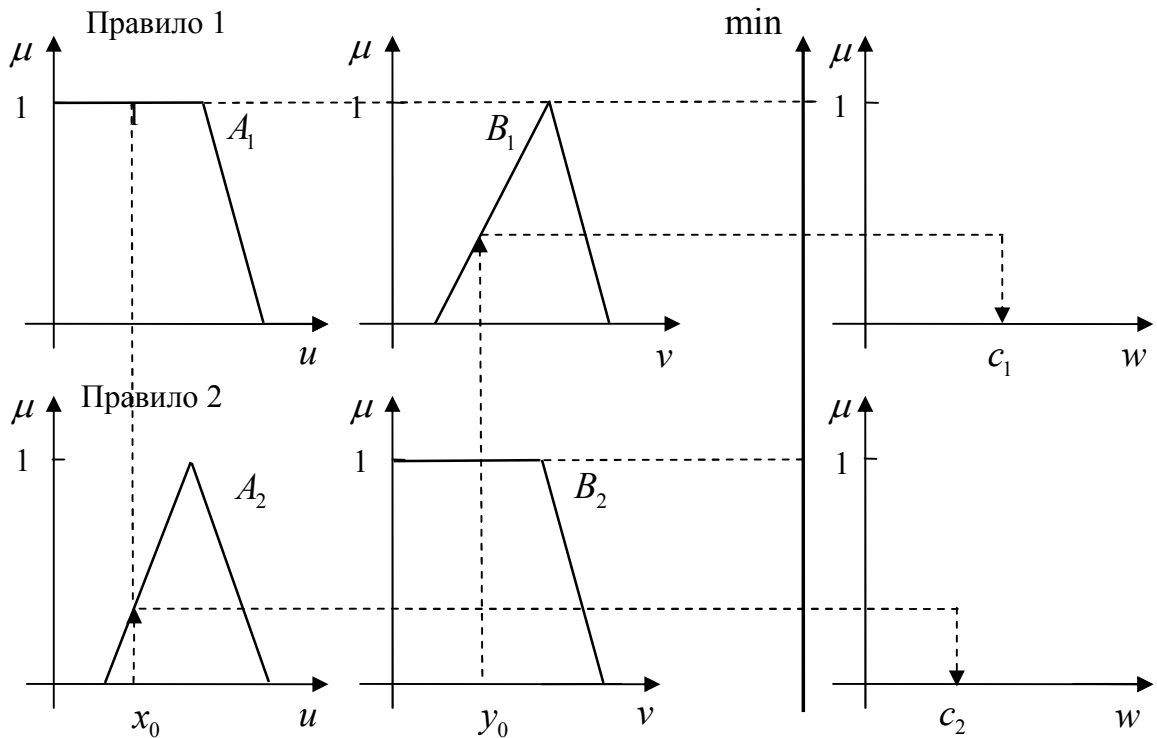


Рисунок В.7 – Ілюстрація спрощеного алгоритму нечіткого висновку

В.7 Методи приведення до чіткості

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

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

для дискретного варіанту:

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

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

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

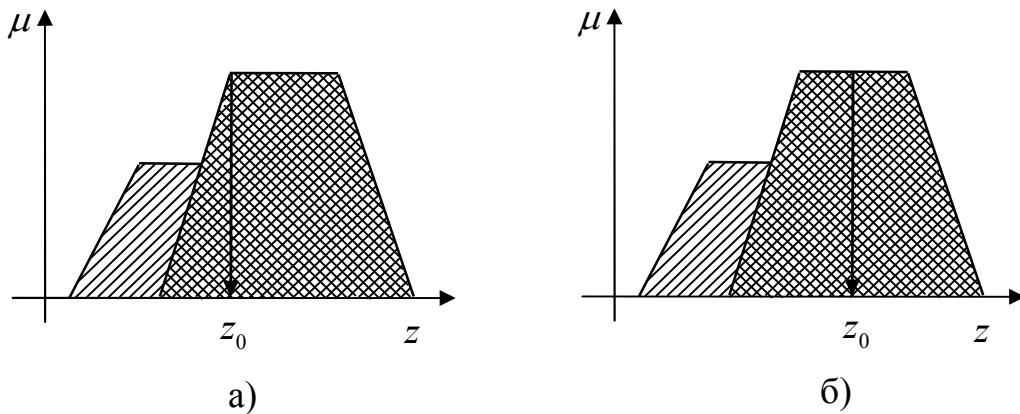


Рисунок В.8 – Ілюстрація до методів приведення до чіткості:

а – перший максимум; б – середній максимум

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

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

де G – підмножина елементів, що максимізували μ_Σ (див. рис. В.8 б).

Дискретний варіант (якщо μ_Σ – дискретне):

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

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

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

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

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

де C_α – нечітка множина α – рівня (див. вище).

ДОДАТОК Г

ФАЙЛ ВИХІДНИХ ДАНИХ

```
clear;clc;echo on;

% Система управління електроприводом
% розвороту роторного екскаватора
% 2024 рік

% Вихідні дані
ks=8.89;
Re=0.2519;
Rd=2*0.07344;
Rcp=0;
Rs=Rd+Rcp;
Ld=2*0.0057;
Lcp=0;
Ls=Ld+Lcp;
kzn=0.07;
CF=2*3.42;
Tzc=kzn*Ls;
Ttp=0.01;
Tg=Ttp;
Te=0.03;
kzv=kzn*CF;
In=192;
Mn=CF*In;
Jd=2*2.0;
Jm=31.8;
b12=0;
c12=30;
Js=Jd+Jm;
Uz=80.3;
ksx=ks/(CF*(1+ks*kzn));
k1=1.0;
k2=4;
k3=10.0;

% 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);
```