

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОСНОВНИМИ МЕХАНІЗМАМИ
МОСТОВОГО КРАНА З ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРОМ. ТЕМА
КОМПЛЕКСНА. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА. СИНТЕЗ І
ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
МЕХАНІЗМОМ ПІДЙОМУ З УРАХУВАННЯМ КІНЦЕВОЇ
ЖОРСТКОСТІ ПІДЙОМНОГО КАНАТУ

(тема кваліфікаційної роботи)

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

(код і найменування спеціальності)

_____ / Анастасія ЖУРАВЕЛЬ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Вікторія КНЯЗЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

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

«До захисту допущено»

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

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

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

Харків – 2024

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

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

« » 2024р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістрського рівня вищої освіти

студенту (ці) Анастасія ЖУРАВЕЛЬ
(ім'я, прізвище)

1. Тема роботи Системи управління основними механізмами мостового крана з фаззі-регулятором. Тема комплексна. Спеціальна частина. Синтез і дослідження нечіткої системи управління механізмом підйому з урахуванням кінцевої жорсткості підйомного канату
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 Вантажопідйомність крана $G_{\text{вп}}=51 \cdot 10^3$ кг; продуктивність крана $Q=128$ кг/с; маса моста без візка $m_{\text{м}}=40 \cdot 10^3$ кг; маса візка $m_{\text{в}}=12 \cdot 10^3$ кг; діаметр коліс моста $D_{\text{м}}=0,8$ м; діаметр коліс візка $D_{\text{в}}=0,5$ м; діаметр цапф коліс моста $d_{\text{м}}=0,155$ м; діаметр цапф коліс візка $d_{\text{в}}=0,115$ м; швидкість пересування моста $V_{\text{м}}=1,25$ м/с; швидкість пересування візка $V_{\text{в}}=0,65$ м/с; швидкість підйому $V_{\text{п}}=0,15$ м/с; маса вантажозахватного пристосування $m_0=1 \cdot 10^3$ кг; середня висота підйому і спуску $L_{\text{п}}=6$ м; середній шлях моста в одну сторону $L_{\text{м}}=50$ м; середній шлях візка в одну сторону $L_{\text{в}}=11,5$ м; діаметр барабана механізму підйому $D=0,75$ м. Перерегулювання швидкості по задаючій дії більше 15%, час регулювання до 10 с.
4. Зміст роботи (перелік питань, що їх належить розробити). Обґрунтувати перспективність застосування нечітких апроксимуючих систем для управління багатомасовою електро-механічною системою механізму підйому мостового крана. Розрахувати систему підлеглого регулювання з внутрішнім контуром струму і зовнішнім контуром ЕДС. Розробити математична 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 фаззі-регулятора на ЕОМ з застосуванням пакету Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB. Провести аналіз результатів моделювання системи з фаззі-регулятором.
5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал) 1. Магістерська кваліфікаційна робота. Формальні ознаки. 2. Механізм підйому. Схема кінематична. 3. Нечіткі множини. Функції приналежності. 4. Нечіткі системи. Алгоритми нечіткого висновку. 5. Нечіткі системи. Алгоритми нечіткого висновку (продовження). 6. Нечіткі системи. Методи приведення до чіткості. 7. Система управління. Перехідні процеси. 8. Двомасова система. Математична модель. 9. Двомасова система. Перехідні процеси 10. Система з фаззі-регулятором. Структурна схема. 11. Система з фаззі-регулятором. Вікна завдання параметрів. 12. Система з фаззі-регулятором. Перехідні процеси. 13-14. Магістерська кваліфікаційна робота. Висновки.

6. Консультант:

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

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

Керівник

(підпис)

Вікторія КНЯЗЄВА
(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Анастасія ЖУРАВЕЛЬ
(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 підйому мостового крана.	09.09.2024- 18.09.2024	
2	Розрахунок системи підлеглого регулювання координат електроприводу з оптимізацією контурів за модульним та симетричним критеріями. Моделювання системи на ЕОМ.	19.09.2024- 15.10.2024	
3	Дослідження системи з урахуванням пружних властивостей підйимального канату. 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)

Анастасія ЖУРАВЕЛЬ
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з: 162 сторінки, 48 рисункі, 2 таблиці, 62 використаних джерел, 4 додатки.

Мета роботи – розробка методів синтезу системи управління електроприводом механізму підйому мостового крана для підвищення показників якості функціонування системи на основі фаззі-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 фаззі-регулятор 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 підйому мостового крана. Розроблена система управління координат електроприводу підйому мостового крана. Розраховані параметри системи автоматичного управління. Проведено моделювання системи на ЕОМ.

Розроблена математична модель системи з урахуванням пружних властивостей підйимального канату Розраховані динамічні характеристики двомасової системи. Розглянута структура нечіткої системи управління і виконаний синтез фаззі-регулятора в системі MATLAB.

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

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

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

Ключові слова: НЕЧІТКІ МНОЖИНИ, НЕЧІТКІ ВИСНОВКИ, МОСТОВИЙ КРАН, ЕЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ, СИСТЕМА ПІДЛЕГЛОГО УПРАВЛІННЯ, ОДНОМАСОВА І ДВОМАСОВА СИСТЕМИ, НЕЧІТКІ СИСТЕМИ, FUZZY РЕГУЛЯТОР

ABSTRACT

An explanatory message consists of: 162 pages, 48 figures, 2 tables, 62 used sources, 4 additions.

The purpose of work is to develop methods for the synthesis of electric drive control system of the lifting mechanism of bridge crane 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 lifting mechanism of bridge crane. The control system of coordinates of electric drive of the lifting mechanism 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 properties of the lifting rope 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, BRIDGE CRANE, ELECTRIC DRIVE OF LIFTING MECHANISM, INFERIOR CONTROL SYSTEM, ONE-MASS AND TWO-MASS SYSTEM, 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	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА	
ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	15
1.1 Нечітка логіка в системах управління	15
1.2 Фактори, що обумовлюють ефективність використання систем нечіткого висновку в задачах управління	17
1.3 Сфери застосування нечіткої логіки	19
1.4 Структура систем нечіткого управління	21
1.5 Вимоги до систем управління електроприводами основних механізмів кранів	23
1.6 Обґрунтування вибору системи електроприводу механізму підйому мостового крана	26
1.7 Постановка задачі дослідження і шляхи її вирішення	28
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	31
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДЛЕГЛОГО	
РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	33
2.1 Технічні характеристики мостового крана. Вимоги до системи управління.....	33
2.2 Розрахунок потужності електроприводу механізму підйому і вибір приводного двигуна.....	34
2.3 Розрахунок і побудова швидкісної і навантажувальної діаграм. Перевірка правильності вибору двигуна	36
2.4 Вибір основного електроустаткування силового кола електроприводу	46
2.5 Розрахунок параметрів силового кола електроприводу	48
2.6 Вибір структури системи управління	52
2.7 Синтез послідовного коректуючого пристрою контура струму	53
2.8 Синтез послідовного коректуючого пристрою контура ЕРС	59

2.9 Дослідження динамічних характеристик системи	67
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	72
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДЙОМНОГО КАНАТА	74
3.1 Розрахункові схеми механічної частини електроприводу	74
3.2 Математична модель двомасової системи	80
3.3 Розрахунок перехідних процесів двомасової системи	88
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	94
РОЗДІЛ 4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ З FUZZY РЕГУЛЯТОРОМ	95
4.1 Процес нечіткого моделювання в середовищі MATLAB	96
4.2 Побудова і дослідження багатомасової системи з Fuzzy регулятором	96
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	116
ВИСНОВКИ	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	120
ДОДАТОК А. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ	126
A.1 Визначення нечіткої множини	126
A.2 Нечіткість і вірогідність	129
A.3 Функції приналежності нечіткої логіки	131
ДОДАТОК Б. ОПЕРАЦІЇ НАД НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ І ВІДНОСИНАМИ	135
Б.1 Логічні операції	135
Б.2 Алгебраїчні операції з нечіткими множинами	139
Б.3 Нечіткі відношення	142
Б.4 Операції над нечіткими відношеннями	143
ДОДАТОК В. НЕЧІТКІ ВИСНОВКИ	147
В.1 Порядок формування нечітких висновків	147
В.2 Алгоритм Mamdani	153
В.3 Алгоритм Tsukamoto	154

В.4 Алгоритм Sugeno	155
В.5 Алгоритм Larsen	157
В.6 Спрощений алгоритм нечіткого висновку.....	158
В.7 Методи приведення до чіткості	160
ДОДАТОК Г. ФАЙЛ ВИХІДНИХ ДАНИХ.....	162

ВСТУП

Актуальність теми. Технічний прогрес в різних галузях промисловості пов'язаний з технологією виробництва, що безперервно ускладнюється, з підвищенням вимог до точності виконання різних операцій, передбачених технологічним процесом виготовлення виробів. При цьому зростають вимоги до якості продукції, що випускається, при все більш складному процесі її виробництва. Разом з тим росте об'єм виробництва, що висуває вимоги підвищення продуктивності машин за рахунок збільшення як їх потужності, так і швидкості виконання різних дослідів технологічного процесу. Оскільки переважна більшість виробничих машин оснащуються електричними приводами, зростання вимог до цих машин веде до посилювання вимог до електроприводу, на який покладається завдання здійснення складних переміщень робочих органів механізму. В процесі реалізації цих переміщень виникає необхідність розгону, гальмування, реверсу електроприводу, підтримки постійності регульованої величини (координати), зміна її по певному закону і т.д.

Вантажопідйомні крани є механізмами, до яких повною мірою відносяться всі перераховані вимоги. Більшість вантажопідйомних кранів характеризуються постійно змінними умовами використання при переробці вантажів, і тому механізми кранів, електроприводи, що мають в своєму складі, повинні бути в максимальному ступені пристосовані до роботи з вантажами, що постійно змінюються, різноманітними по масі, розмірам, формі, і в умовах виробничих приміщень або на відкритих вантажних майданчиках.

Великий діапазон змін навантажень практично усіх електроприводів кранів є основним чинником, який вимагає особливого підходу до визначення параметрів розрахунку для електродвигунів, систем управління та захисту. Зростаючі вимоги до тактико-технічних характеристик і якості систем управління змушують нас шукати нові шляхи вдосконалення автоматичних систем. У результаті інтенсивних наукових досліджень, які проводилися в останнє десятиліття, широке поширення отримали методи адаптивного та робастного регулю-

вання. Ці методи забезпечують стійкість систем зі змінною динамікою, базуючись на відомій моделі об'єкту і не потребують точного знання його параметрів. Методи адаптивного регулювання стараються підлаштувати регулятор, опираючись на оцінку параметрів невідомого об'єкту, тоді як робастні регулятори залишаються постійними і забезпечують стійкість системи лише в діапазоні допустимих змін параметрів об'єкту. Однак проблема синтезу адаптивних систем регулювання для невідомих, нелінійних і змінних в часі об'єктів не є повністю вирішеною, незалежно від теоретичного або практичного підходу. Область застосування методів робастного регулювання є обмеженою, переважно в лінійних системах та окремих класах нелінійних систем. Таким чином, незважаючи на існуючі досягнення, слід визнати, що універсального та ідеального регулятора на даний момент не існує.

Одним з найбільш перспективних напрямків є розробка систем управління з застосуванням методів нечіткого управління. Методи побудови систем управління, засновані на теорії нечітких множин, істотно розширюють традиційні методи побудови автоматизованих систем управління [1-10]. Основні ідеї теорії нечітких множин були запропоновані американським математиком Лотфі Заді в 1965 році [11]. Ця теорія дає змогу описувати неточні, якісні поняття та наші уявлення про навколишній світ, а також використовувати ці знання для отримання нової інформації.

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

В області управління технічними системами, використання нечітких систем дозволяє отримувати більш адекватні результати порівняно з традиційними аналітичними моделями та алгоритмами управління. За час існування нечітких методів їх діапазон застосування постійно розширюється, охоплюючи такі сфери, як проектування промислових роботів та побутових електроприладів,

управління доменними печами і рухом метропотягів, автоматичне розпізнавання мови і зображень.

Нечітка логіка, яка стоїть в основі методів нечіткого управління, краще відображає характер людського мислення та процесу міркувань, ніж традиційні формально-логічні системи. Саме тому вивчення та застосування математичних засобів для вираження нечіткої початкової інформації дозволяє побудовувати моделі, які найбільш точно відтворюють різні аспекти невизначеності, що завжди присутня у реальному світі. При цьому використання нечітких систем дозволяє підвищити якість продукції за рахунок зменшення витрат ресурсів та енергії, а також забезпечує вищу стійкість до впливу факторів, які можуть перешкоджати, порівняно з традиційними системами автоматичного управління.

Математична теорія нечітких множин дозволяє описувати невизначені поняття та знання, працювати з ними та робити нечіткі висновки. Використання нечіткого управління особливо корисне в складних технологічних процесах, що не піддаються аналізу за допомогою звичайних кількісних методів або коли доступна інформація тлумачиться якісно, неоднозначно або невизначено. Нечітка логіка, що лежить в основі нечіткого управління, більшою мірою відповідає людському мисленню та природним мовам, ніж класичні логічні системи. Ця логіка головним чином надає зручні засоби для відображення невизначеностей та неточностей реального світу. Математичні засоби відображення нечіткості початкової інформації дозволяють побудувати модель, що найточніше відтворює реальність.

Застосування нечітких методів поширюється на різні сфери, такі як проектування промислових роботів, управління доменними печами, автоматичне розпізнавання мови і зображень, побудова нечітких систем управління і багато іншого. Тому розробка системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму підйому мостового крана, яка використовує теорію нечітких множин і нечітку логіку, є важливою науково-технічною задачею, а тема роботи актуальна.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка методів синтезу системи управління електроприводом механізму підйому мостового крана для підвищення показників якості функціонування системи на основі Fuzzy регуляторів.

Досягнення поставленої мети забезпечується розв'язанням таких основних завдань.

1. Аналіз факторів, що обумовлюють ефективність використання систем нечіткого висновку в задачах управління технічними системами.
2. Розробка системи підлеглого регулювання координат електроприводу механізму підйому мостового крана.
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 – є динамічні процеси в системі управління електроприводом механізму підйому мостового крана з урахуванням пружних властивостей підйимального канату.

Предмет дослідження – моделі і методи синтезу нечітких систем управління механізмом підйому мостового крана з урахуванням пружних властивостей підйимального канату.

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

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукова новизна результатів, здобутих у процесі виконання магістерської роботи, полягає в наступному:

1. Вперше науково обґрунтовано доцільність застосування нечіткого управління для багатомасової електромеханічної системи механізму підйому мостового крана.

2. Вперше запропонована і синтезована нечітка система управління двомасовою електромеханічною системою механізму підйому мостового крана, що задовольняє вимогам, які пред'являються до систем управління основними механізмами мостових кранів.

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 підйому мостового крана, що має високі показники якості функціонування.

Основні положення магістерської роботи можуть бути використані 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 автоматичного регулювання координат електроприводу; розроблена модель системи з урахуванням пружних елементів, розроблена структурна схема нечіткої системи з Fuzzy регулятором; синтезований Fuzzy регулятор з використанням пакету Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB; виконано моделювання нечіткої систем і проведено аналіз отриманих результатів.

У роботі під час використання відомих залежностей, експериментальних даних і наукових положень наведено посилання на авторів та відповідні джерела.

Апробація результатів роботи. Отримані результати та основні висновки були презентовані на науково-практичній конференції студентів УПА (Харків, 2024 р.), що підтверджує апробацію отриманих результатів

Структура і об'єм роботи. Робота складається з вступу, 4 розділи основної частини, висновків, додатків і списку використаних літературних джерел. Повний об'єм роботи складає 162 сторінки, серед них: 48 рисунків, з яких 28 рисунків за текстом, 20 рисунків на 20 окремих сторінках, 2 таблиці, 4 додатки на 37 сторінках, список літературних джерел з 62 найменувань на 6 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Нечітка логіка в системах управління

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

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

Однак, незважаючи на велику кількість теоретичних досліджень, практичне значення нечітких моделей довгий час було піддано сумнівам. Перші випробування нечітких моделей в промисловості мають відношення до середини 1970-х років. Саме в цей період у Великобританії Ебрахім Мамдані [23-26] використав нечітку логіку для керування парогенератором. Вирішення цієї задачі за допомогою звичайних методів включало в себе безліч обчислювальних труднощів. Запропонований Мамдані алгоритм, що базувався на нечіткому логічному висновку, дозволив уникнути великого обсягу обчислень і отримав високу

оцінку фахівців. Також у цей період нечіткі моделі використовувалися для управління печами для випалювання цементу. Однак ці рідкісні застосування, які користувалися нечіткою логікою, по суті приховували цей факт, оскільки саме вони використовували терміни "багатозначна логіка" або "безперервна логіка" замість терміну "нечітка логіка".

На початку 1980-х років XX сторіччя нечітка логіка та теорія нечітких множин зазнали значного прогресу через запровадження кількох програмних засобів, що сприяли процесам прийняття рішень та розвитку експертних систем для аналізу даних [27-31]. Хоча багато з цих програмних засобів лишилися в межах наукових лабораторій і інститутів, їх розробка принесла важливі емпіричні результати в моделюванні процесів людського мислення та ухвалення рішень за допомогою нечіткої логіки.

Японія виявила особливий інтерес до нечітких технологій після перших їх застосувань у Європі на початку 1970-х років. Швидко ця країна вийшла на чільне місце в світі за кількістю розроблених пристроїв і механізмів, в яких використовували нечіткі технології. За появи мікропроцесорів та мікроконтролерів настала ера різкого збільшення використання алгоритмів управління, побудованих на основі нечіткої логіки. Термін "фаззі" (fuzzy) став символом популярності й комерційного успіху нових промислових виробів в Японії.

У Японії з'явилися різноманітні "нечіткі" прилади: бритви, пілососи, фотокамери та інше [32-39]. Сам термін "fuzzy" став настільки поширеним, що на багатьох мовах його навіть не перекладають. Прогрес у розробці нечітких систем управління був величезним. Простота та доступність у їх розробці призвели до все більшого застосування цієї технології. Після успішного запуску нечітких систем в Японії [32, 33, 35, 36], багато розробників із США та Європи також почали застосовувати цю технологію. Однак Японія залишалася світовим лідером у сфері нечітких систем [36, 37], де до кінця 1980-х років було налагоджено випуск спеціалізованих нечітких контролерів, що використовувалися за технологією NBIC [37-39]. Корпорація Intel, маючи широкий асортимент різних контролерів від MCS-51 до MCS-96, вирішила створити засіб розробки додатків

для цих контролерів на базі нечіткої логіки. Це дозволило уникнути значних витрат на розробку власних нечітких контролерів, і система від Intel, під назвою fuzzy TECH, завоювала популярність не тільки в США та Європі, але й у всьому світі.

У додатках А-Г представлено основні поняття нечіткої логіки, операції з нечіткими множинами й відносинами, а також системи нечіткого висновку, які є основою для розуміння проведених у роботі досліджень.

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

Можливість застосування апарату нечіткої логіки ґрунтується на таких результатах:

1. У 1992 році Wang довів [40], що нечітка система, яка використовує набір правил

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

1) гаусівських функціях приналежності

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

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

2) композиції у вигляді добутку

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

3) імплікації у формі (Larsen)

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

4) центроїдному методі приведення до чіткості

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

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

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

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

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

1) симетричних трикутних функціях приналежності:

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

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

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

2) композиції з використанням операції min:

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

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

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

де c_i – центри C_i ; також є універсальним апроксиматором.

Системи, які використовують нечітку логіку, є відмінним варіантом для складних процесів, де відсутня проста математична модель, або коли експертні знання про об'єкт або процес можуть бути виражені лише мовними описами.

Проте, застосування таких систем може бути неефективним у випадках, коли потрібний результат може бути досягнутий іншими методами, або якщо для об'єкту чи процесу вже існує адекватна та добре вивчена математична модель.

Також важливо відзначити, що основні недоліки систем, які використовують нечітку логіку, пов'язані з тим, що:

- початковий набір нечітких правил формулюється експертом-людиною, що може призвести до неповноти чи суперечливості цих правил;
- форма та параметри функцій належності, які описують вхідні та вихідні змінні системи, вибираються суб'єктивно і можуть не повністю відображати реальну дійсність.

1.3 Сфери 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 класи-

чної 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.



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

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

Один з недоліків PID-контролерів полягає в тому, що вони базуються на припущенні про лінійний характер відношення між вхідними та вихідними параметрами управління, що обмежує їх адекватність у вирішенні конкретних 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 Вимоги до систем управління електроприводами основних механізмів кранів

Мостові крани широко використовуються у виробничих цехах машинобудівних підприємств та інших сферах промисловості. Вони використовуються для підйому, опускання тяжких заготовок, деталей та механізмів машин, а також для їх переміщення вздовж і поперек цеху. Хоча вид мостового крана головним чином залежить від специфіки цеху та його технології, багато складових устаткування, таких як механізми підйому та переміщення, є стандартними для різних типів кранів. Вантажозахватні пристрої, такі як крюки, магніти, грейфери, кліщі тощо, використовуються на мостових кранах в залежності від типу та характеру транспортованого вантажу. Найбільш популярними є крани з підвіскою крюка.

Згідно із чинними стандартами, всі крани за режимами механічного та електричного обладнання поділяються на чотири категорії, що визначають ступінь їх використання, типове навантаження та умови експлуатації: Л – легкий режим, З – середній режим, Т – важкий режим, ВТ – дуже важкий режим. Критеріями оцінки режиму роботи є час роботи двигуна механізму ПВ, кількість включень двигуна за годину та коефіцієнти використання механізмів у межах вантажопідйомності.

Механізми кранів працюють у режимі повторних короткочасних навантажень з великою кількістю включень на годину та у важких атмосферних умовах. Тому для них розробляються спеціальні електродвигуни з підвищеною навантажувальною здатністю. У всіх типах кранів основними механізмами для переміщення вантажів є підйомні лебідки, механізми переміщення крана і візок. Загальний вигляд мостового крана показаний на рисунку 1.3

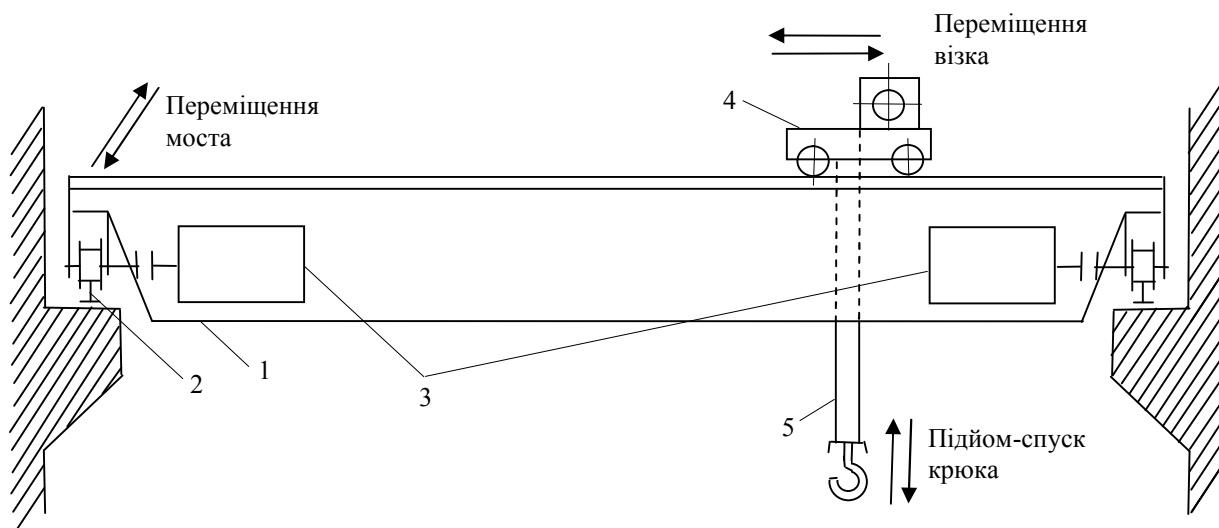


Рисунок 1.13 – Загальний вид мостового крана

1 – несуча ферма; 2 – рухомі опори; 3 – механізм пересування моста; 4 – механізм пересування візка; 4 – механізм підйому

Мостовий кран складається з несучої зварної конструкції, що включає дві головні балки коробчастого перетину або гратчасті ферми, що перекинуті через простір цеху і закінчуються кінцевими балками, на яких розміщені ходові колеса. Ці колеса рухаються по рейках, які закріплені на балках опорних конструкцій у верхній частині цеху. Привод ходових коліс забезпечується електродвигунами через редуктори. По всій довжині моста розташовані рейки, по яких рухається візок з підйомною лебідкою на колесах, які обертаються за допомогою електродвигуна через редуктор. На барабані лебідки намотується підйомний трос, з яким з'єднаний крюк для підвішування вантажу. Барабан також обертається за допомогою електродвигуна через редуктор.

Масовість застосування і вельми важкі умови роботи електроприводів механізмів кранів визначають вельми важкі вимоги відносно простоти їх експлуатації і високої надійності роботи. Тому при проектуванні електроприводів кранів конструктори прагнуть до використання максимально простих систем електроприводу і їх схем управління.

Оскільки підйомні крани управляються оператором на всіх стадіях роботи, основною технологічною вимогою, що впливає на вибір системи електроприводу, є потреба в регулюванні швидкості. Розмір діапазону регулювання швидкості D визначається співвідношенням між робочою швидкістю та мінімальною швидкістю, необхідною для нормальної роботи. Мінімальна швидкість для механізмів підйому обмежується умовою плавного спуску вантажу в призначене місце без надмірних поштовхів. Коли йдеться про управління механізмами переміщення, можливість регулювання швидкості сприяє точнішому налаштуванню механізмів оператором та зменшує кількість необхідних повторних включень приводу для досягнення цієї мети.

Умови, що визначають посадку та точність розміщення вантажів, залежать від функціонального призначення крана. Для монтажних кранів, які виконують точні операції або транспортують крихкі деталі, необхідна менша швидкість, порівняно з універсальними кранами, при рівних умовах. Отже, потрібний діапазон регулювання швидкості для спеціалізованих кранів зазвичай ширший і зростає зі збільшенням робочої швидкості механізму.

Контроль швидкості електроприводу має бути здійснений з урахуванням обмежень на прискорення, струм і момент. Робочі швидкості основних механізмів більшості кранів зазвичай призводять до того, що час перехідних процесів, за нормованих середніх значень прискорення, складає невелику частину загального часу циклу. Це означає, що вплив умов регулювання моменту та характеру перехідних процесів на продуктивність крана зазвичай не має значущого впливу, а точне відтворення оптимальних законів руху зазвичай не є необхідністю. Однак під час проектування варто оцінити вплив коливань вантажів, кінематичних зазорів тощо і, при необхідності, вживати додаткові заходи для обмеження динамічних навантажень.

1.6 Обґрунтування вибору системи електроприводу механізму підйому мостового крана

Система управління електроприводом – це комплекс, який складається з різних компонентів. Вона включає в себе перетворювач електричної енергії, засоби управління для комутації струму в ланцюгу електродвигуна, засоби ручного або автоматичного управління, а також елементи захисту електроустаткування та механізм, який діє на пристрої відключення електроприводу. Усі електричні ланцюги можна класифікувати за такими категоріями:

1. Головні ланцюги, через які проходить основний потік енергії для електроприводу та живлення вантажопідйомних магнітів.
2. Ланцюги збудження, в яких протікає струм збудження електричних машин постійного струму, синхронних електричних машин змінного струму або електромагнітів гальмівних пристроїв, а також струм двигунів електрогідравлічних товкачів.
3. Ланцюги управління, що передають команди до комутаційних пристроїв головних ланцюгів і ланцюгів збудження від органів управління. У цих ланцюгах також реалізується певна послідовність команд і перемикачів відповідно до заданої програми.
4. Ланцюги сигналізації, які передають інформацію про стан комутуючих елементів головних ланцюгів і ланцюгів управління або про значення конкретних параметрів електроприводу та механізму операторові чи контролюючому пристрою.

У системах електроприводу кранів застосовуються два типи перетворювачів електричної енергії: електромашинні та статичні. У випадку електромашинних перетворювачів дві або більше електричних машин перетворюють електроенергію, яка надходить від джерела живлення, у електроенергію з регульованими параметрами (напруга, частота, струм). Статичні перетворювачі, натомість, реалізують перетворення електричної енергії за допомогою безконтакт-

ної комутації ланцюгів постійного або змінного струму за допомогою керованих та некерованих напівпровідникових приладів.

Апаратура управління електроприводом складається з контактних та безконтактних пристроїв комутації в електродвигуні, перетворювача енергії та управління, а також елементів захисту електричних ланцюгів. Контактну апаратуру можна поділити на дві категорії:

1. Апаратура, управління якою здійснюється оператором або виконавчим механізмом (наприклад, контролери та кінцеві вимикачі).
2. Апаратура, де комутація відбувається за допомогою електромагнітних пристроїв (наприклад, контактори та реле

Якщо контактні елементи апаратури, яка приводиться в дію вручну, призначені для перемикання основних електричних ланцюгів, цей пристрій отримує назву силового кулачкового контролера. Якщо ж ці елементи використовуються для перемикання управляючих ланцюгів, це вже буде командоконтролер. У випадку, коли контактні елементи активуються через механізм, така апаратура отримує назву кінцевих або путніх вимикачів. Послідовність відкриття та закриття контактів, що активується через вал з кулачковими шайбами, залежно від положення обертання валу, називається діаграмою включень. Ця діаграма, яка представляється у вигляді таблиці, відома як таблиця включень. Кілька контактів і реле, а також різноманітні пристрої захисту, об'єднані в одному комплектному пристрої для управління електроприводом, отримують назву магнітних контролерів. Якщо у магнітному контролері процес перемикання відбувається без розірвання ланцюга під напругою, він називається магнітним контролером з бездуговою комутацією.

Оцінка ефективності систем управління повинна враховувати мінімізацію витрат, які включають в себе початкові вкладення, витрати на обслуговування та ремонт, а також енергозатрати, що використовуються під час запуску і зупинки механізмів кранів протягом експлуатаційного періоду до потреби в капітальному ремонті (10 років). Вибір системи здійснюється на основі найкращих економічних показників.

У випадку, коли економічні показники порівнянних систем є подібними, виконується додаткова оцінка на основі габаритних характеристик та умов розміщення електроустаткування. Ураховуючи, що розташування перетворювальних агрегатів або напівпровідникових перетворювачів на кранах пов'язане з певними технічними викликами, може стати необхідним застосування системи, яка може не мати оптимальних економічних показників.

Аналізуючи основні особливості роботи всіх існуючих електроприводів механізмів кранів вибираємо систему ТП-Д.

1.7 Постановка задачі дослідження і шляхи її вирішення

Аналіз наукової літератури вказує на перспективність використання теорії нечітких множин та нечіткої логіки у синтезі систем управління. Теорія нечітких множин дозволяє описати якісні, недостатньо точні концепції та наші уявлення про світ навколо нас, а також працювати з цими знаннями для отримання нової інформації. Методи створення інформаційних моделей на основі цієї теорії значно розширюють звичайні області застосування комп'ютерів і формують окремий напрямок наукових досліджень, відомий як "нечіткове моделювання".

Нечітка логіка, яка лежить в основі методів нечіткого управління, природніше відображає спосіб мислення людини та її розмірковування, порівняно з традиційними формально-логічними системами. Саме тому дослідження та використання математичних засобів для представлення нечіткої початкової інформації дозволяє створювати моделі, які найбільш точно відображають різні аспекти невизначеності, постійно присутні в реальному світі, що нас оточує. Ці нечіткі системи дозволяють підвищити якість продукції при зменшенні ресурсних та енергетичних затрат, забезпечуючи вищу стійкість до негативних впливів, порівняно з традиційними системами автоматичного управління.

Нові підходи розширюють можливості застосування систем автоматизації, виходячи за рамки класичної теорії. Цікава позиція Л. Заде вказує на те, що

занадто сильне прагнення до точності уповільнює розвиток теорії управління і систем, оскільки це спрямовує дослідження лише на проблеми, які можуть бути точно вирішені. Це призводить до ігнорування важливих питань, де дані, цілі і обмеження є складними або погано визначеними для точного математичного аналізу. Розвиток нечітких систем управління перейшов до практичних застосувань, викликавши потребу в новій архітектурі комп'ютерів для нечітких обчислень, базових елементах для нечітких комп'ютерів і контролерів, інструментах розробки, інженерних методах розрахунків та розробки нечітких систем управління.

Зсув центру досліджень нечітких систем у бік практичних застосувань привів до постановки цілого ряду проблем, таких як нова архітектура комп'ютерів для нечітких обчислень, елементна база нечітких комп'ютерів і контролерів, інструментальні засоби розробки, інженерні методи розрахунку і розробки нечітких систем управління і багато що інше.

Математична теорія нечітких множин відображає нечіткі поняття та знання, дозволяє працювати з цими даними та робити нечіткі висновки. Використання нечіткого управління особливо корисне при складних технологічних процесах, які складно аналізувати за допомогою загальноприйнятих кількісних методів або коли доступна інформація інтерпретується якісно, неточно або невизначено. Нечітка логіка, на якій базується нечітке управління, більш відповідає людському мисленню і природним мовам, ніж традиційні логічні системи. Вона ефективно відображає невизначеності й неточності реального світу. Математичні засоби, які відтворюють нечіткість початкової інформації, дозволяють створювати модель, яка краще відображає реальність.

Метою роботи є синтез нечіткої системи управління механізму переміщення моста мостового крана, що має високі динамічні характеристики. В об'єкті управління наявні пружні елементи, що призводить до необхідності розглядати його як багатомасову систему. Система повинна забезпечити високоякісне регулювання по задаючій і збурюючій діях при ступінчастому вхідному сигналі з випадковою амплітудою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

1. Виконати синтез системи регулювання параметрами електроприводу механізму підйому мостового крана, розглядаючи об'єкт управління як одномасову систему.
2. Розробити модель об'єкту управління з урахуванням пружних властивостей підйимального канату.
3. Синтезувати фаззфі-регулятор, що забезпечує високу швидкодію і якість управління двомасовою електромеханічною системою.
4. 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, такі як Mamdani, Tsukamoto, Sugeno та інші.

4. Одним з ключових напрямків практичного застосування систем нечіткого висновку є вирішення завдань керування різними об'єктами чи процесами. У таких сценаріях створення нечіткої моделі базується на формальному описі

характеристик досліджуваної системи у термінах лінгвістичних змінних. Оскільки, крім алгоритму управління, ключовими концепціями систем управління є вхідні та вихідні параметри, саме вони розглядаються як лінгвістичні змінні при створенні бази правил у системах нечіткого висновку.

5. Проведено аналіз сфер застосування сучасних технологій управління. Доведено, що класичні методи управління ефективно працюють при повністю детермінованих об'єктах управління та середовищі. Технології управління на основі штучних нейронних мереж є дуже ефективними і використовуються у випадках високої складності об'єкта управління та недостатньої інформації про нього. Для систем із неповною інформацією та високою складністю об'єкта найбільш оптимальними є нечіткі методи управління.

6. Проведено аналіз чинників, які визначають вибір системи управління електроприводом механізму підйому мостового крана. Показано, що через кінцеву жорсткість підйомного канату звичайні регулятори не можуть забезпечити прийнятні показники якості роботи системи, тому доцільно застосовувати нечітке управління, яке є однією з найбільш перспективних інтелектуальних технологій для створення високоякісних систем управління

7. Сформульовано завдання дослідження, яке полягає в розробці нечіткої систем управління багатомасовою електромеханічною системою управління механізмом підйому мостового крана, що забезпечують високу якість регулювання.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДЛЕГЛОГО РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Технічні характеристики мостового крана. Вимоги до системи управління

Вихідні дані для розрахунку електроприводу механізму підйому мостового крана і синтезу системи управління наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики мостового крана

Вантажопідйомність $G_{\text{вп}}$, кг	51000
Продуктивність крана Q , кг/с	128
Маса моста (без візка) $m_{\text{м}}$, кг	40000
Маса візка $m_{\text{в}}$, кг	12000
Діаметр коліс моста $D_{\text{м}}$, м	0,8
Діаметр коліс візка $D_{\text{в}}$, м	0,5
Діаметр цапф коліс моста $d_{\text{м}}$, м	0,155
Діаметр цапф коліс візка $d_{\text{в}}$, м	0,115
Швидкість пересування моста $V_{\text{м}}$, м/с	1,25
Швидкість пересування візка $V_{\text{в}}$, м/с	0,65
Швидкість підйому $V_{\text{п}}$, м/с	0,15
Маса вантажозахватного пристрою m_0 , кг	1000
Середній шлях візка в одну сторону $L_{\text{в}}$, м	11,5
Середній шлях моста в одну сторону $L_{\text{м}}$, м	50
Середня висота підйому і спуску $L_{\text{п}}$, м	6
Діаметр барабана механізму підйому D , м	0,75
Режими роботи електроприводів	4 м

Вимоги до показників якості функціонування системи управління.

Перерегулювання швидкості при ступінчастій вхідній дії не більше 15%, час регулювання не більше 10 с.

2.2 Розрахунок потужності електроприводу механізму підйому і вибір приводного двигуна

Статична потужність на валу електродвигуна підйомної лебідки при підйомі вантажу

$$P_{\text{ст.п}} = \frac{q \cdot (G_{\text{вп}} + m_0) \cdot V_{\text{п}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{н.п}}},$$

$$P_{\text{ст.п}} = \frac{9,8 \cdot (51 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3) \cdot 0,15 \cdot 10^{-3}}{0,83} = 90,6 \text{ кВт}.$$

де $G_{\text{вп}}$ – вантажопідйомність крана;

m_0 – маса вантажозахватного пристосування;

$V_{\text{п}}$ – швидкість підйому;

$\eta_{\text{н.п}}$ – ККД канатної системи і механізму при підйомі номінального вантажу.

$$\eta_{\text{н.п}} = \eta_{\text{к.п}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \mu_{\text{р}},$$

$\eta_{\text{к.п}}$ – ККД канатної передачі (0,98 – 0,99);

$\eta_{\text{к}}$ – ККД канатоукладчика (0,98);

$\mu_{\text{р}}$ – ККД регулятора: для двухступенчатого (0,86)

$$\eta_{\text{н.п}} = 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,86 = 0,83.$$

Визначаємо число циклів в годину Z і час циклу $T_{\text{ц}}$, який повинне бути не більш 10 хв: для двигуна вантажопідйомного механізму

$$Z = \frac{Q}{G_{\text{вп}}},$$

де Q – продуктивність крана

$$Z = \frac{128}{51 \cdot 10^3} = 0,00251,$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{1}{Z},$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{1}{0,00251} = 398 \text{ с}$$

Визначаємо час роботи механізму підйому $t_{\text{п.п}}$

$$t_{\text{п.п}} = 4 \cdot \frac{L_{\text{п}}}{V_{\text{п}}}$$

$$t_{\text{п.п}} = 4 \cdot \frac{6}{0,15} = 160 \text{ с}.$$

де $L_{\text{п}}$ – середня висота підйому і спуску,

Відносна тривалість в %

$$ПВ_{\text{п}} = \frac{t_{\text{п.п}}}{T_{\text{ц}}} \cdot 100\%,$$

$$ПВ_{\text{п}} = \frac{160}{398} \cdot 100 = 40,2\%.$$

Потужність двигуна підйому приведена до найближчої більшої тривалості включення стандартного ряду $ПВ_{\text{ст}}$

$$P_{\text{п}} = P_{\text{ст.п}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\text{п}}}{ПВ_{\text{ст}}}},$$

$$P_{\text{п}} = 90,3 \cdot \sqrt{\frac{40,2}{40}} = 90,31 \text{ кВт}.$$

У двигунах кранів за номінальний режим прийнятий режим при $PB_{\text{ст}} = 40 \%$.

Відповідно до рекомендацій [42] двигун вибирається з умови $P_{\text{дв}} \geq 0,8 P_{\text{п}} = 0,8 \cdot 90,3 = 72,24 \text{ кВт}$

По каталогу вибираємо двигун постійного струму незалежного збудження Д816 з наступними технічними даними:

$$P_{\text{н}} = 85 \text{ кВт}; \quad I_{\text{н}} = 175 \text{ А}; \quad U_{\text{н}} = 440 \text{ В}; \quad n_{\text{н}} = 540 \text{ об / хв};$$

$$R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} = 0,0324 \text{ Ом}; \quad J_{\text{дв}} = 16,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$N = 1008; \quad 2a = 8; \quad 2p = 4; \quad \Phi_{\text{н}} = 102,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

2.3 Розрахунок і побудова швидкісної і навантажувальної діаграм. Перевірка правильності вибору двигуна

Виконаємо перевірку правильності вибору двигуна по нагріву і перевантажувальній спроможності. Для цього розрахуємо швидкісну діаграму і діаграму навантаження механізму.

Передавальне число механізму підйому

$$i_{\text{п}} = i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}} = \frac{\omega_{\text{н}} \cdot D}{V_{\text{п}}},$$

де $\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова швидкість обертання двигуна

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

$$\omega_{\text{н}} = \frac{540 \cdot 3,14}{30} = 56,55 \text{ с}^{-1}.$$

$i_{\text{ред}}$ – передавальне число редуктора;

$i_{\text{пол}}$ – кратність полиспаста, $i_{\text{пол}} = 3 \div 4$

$$i_{\text{п}} = \frac{56,55 \cdot 0,75}{0,15} = 282,7.$$

Передавальне число редуктора

$$i_{\text{ред}} = \frac{i_{\text{п}}}{i_{\text{пол}}}$$

$$i_{\text{ред}} = \frac{282,7}{4} = 70,75.$$

Момент двигуна при підйомі граничного вантажу

$$M_{\text{ст.п}} = \frac{(G_{\text{вп}} + m_0) \cdot q \cdot D}{2 \cdot i_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{н.п}}},$$

$$M_{\text{ст.п}} = \frac{(51 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3) \cdot 9,8 \cdot 0,75}{2 \cdot 282,7 \cdot 0,83} = 801 \text{ Нм}.$$

Момент двигуна при підйомі порожнього вантажозахватного пристосування

$$M_{\text{ст.п.0}} = \frac{m_0 \cdot q \cdot D}{2 \cdot i_{\text{п}} \cdot \eta_{0,\text{п}}},$$

де $\eta_{0,\text{п}}$ – ККД підйомного механізму при завантаженні, визначуваний по кривим залежності ККД механізму від коефіцієнта завантаження [42, рис. 2.2];

де коефіцієнт завантаження

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{m_0}{G_{\text{вп}} + m_0},$$

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{1 \cdot 10^3}{51 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} = 0,019,$$

$$M_{\text{ст.п.0}} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,75}{2 \cdot 282,7 \cdot 0,29} = 44 \text{ Нм}.$$

Момент при спуску граничного вантажу

$$M_{\text{ст.с}} = \frac{(G_{\text{вп}} + m_0) \cdot q}{2 \cdot i_{\text{п}}} \cdot D \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta_{\text{н.п}}} \right),$$

$$M_{\text{ст.с}} = \frac{51 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,75}{2 \cdot 282,7} \cdot \left(2 - \frac{1}{0,83} \right) = 52 \text{ Нм}.$$

Момент при спуску захватного пристосування

$$M_{\text{ст.с.0}} = M_{\text{ст.п.0}} - \frac{M_{\text{ст.п.0}} - M_{\text{ст.с}}}{2 \cdot m_0 + G_{\text{зр}}} \cdot 2m_0,$$

$$M_{\text{ст.с.0}} = 44,8 - \frac{44,8 - 527}{1000 \cdot 2 + 51000} \cdot 2 \cdot 1000 = 62 \text{ Нм}.$$

Електропривод механізму підйому працює в замкнутій системі регулювання, тому швидкість підйому і спуску з вантажем і без вантажу вважаємо рівними $V_{\text{п}}$ (механічна характеристика абсолютно жорстка).

Приведений момент інерції механізму підйому при підйомі номінального вантажу

$$J_{\text{пр.п(с)}} = \delta \cdot J_{\text{дв}} + \frac{(G_{\text{вп}} + m_0) \cdot V_{\text{п}}^2}{\omega_{\text{н}}^2},$$

де δ – коефіцієнт момент інерції елементів, що враховує, механічний частині системи, жорстко пов'язаних з валом двигуна $\delta = 1,2$

$$J_{\text{пр.п(с)}} = 1,2 \cdot 16,25 + \frac{(51 + 1) \cdot 10^3 \cdot 0,15^2}{56,55^2} = 19,56 + 0,36 = 20 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Приведений момент інерції при підйомі вантажозахватного пристрою

$$J_{\text{пр.0}} = \delta \cdot J_{\text{дв}} + \frac{m_0 + V_{\text{п}}^2}{\omega_{\text{н}}^2},$$

$$J_{\text{пр.0}} = 1,2 \cdot 16,25 + \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 0,15^2}{56,55^2} = 19,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Динамічні моменти приводу при пуску і гальмуванні визначимо в припущенні, що двигун на даних ділянках розвиває подвійний номінальний момент

$$M_{\text{дв п (г)}} = 2M_{\text{н}},$$

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}},$$

$$M_{\text{н}} = \frac{85 \cdot 10^3}{56,55} = 1503 \text{ Нм},$$

$$M_{\text{дв п (г)}} = 2 \cdot 1503 = 3006 \text{ Нм}.$$

Динамічний момент при пуску в процесі підйому вантажу

$$M_{\text{дин.п.п}} = |M_{\text{дв.п}} - M_{\text{ст.п}}|,$$

$$M_{\text{дин.п.п}} = |3006 - 801| = 2205 \text{ Нм}$$

Динамічний момент при гальмуванні в процесі підйому вантажу

$$M_{\text{дин.п.г}} = |M_{\text{дв.п}} + M_{\text{ст.п}}|,$$

$$M_{\text{дин.п.г}} = |3006 + 801| = 3801 \text{ Нм}.$$

Динамічний момент при пуску в процесі підйому грузозахватного пристрою

$$M_{\text{дин.п.п 0}} = |M_{\text{дв.п}} - M_{\text{ст.п 0}}|,$$

$$M_{\text{дин.п.п } 0} = |3006 - 44| = 2962 \text{ Нм}.$$

Динамічний момент при гальмуванні в процесі підйому вантажозахватного пристрою

$$M_{\text{дин.п.г } 0} = |M_{\text{дв.п}} + M_{\text{ст.п } 0}|,$$

$$M_{\text{дин.п.г } 0} = |3006 + 44| = 3052 \text{ Нм}.$$

Динамічний момент при пуску в процесі спуску вантажу

$$M_{\text{дин.с.п}} = |-M_{\text{дв.п}} - M_{\text{ст.с}}|,$$

$$M_{\text{дин.с.п}} = |-3006 - 527| = 3533 \text{ Нм}.$$

Динамічний момент при гальмуванні в процесі спуску вантажу

$$M_{\text{дин.с.г}} = |-M_{\text{дв.п}} + M_{\text{ст.с}}|,$$

$$M_{\text{дин.с.г}} = |-3006 + 527| = 2479 \text{ Нм}.$$

Динамічний момент при пуску в процесі спуску вантажозахватного пристрою

$$M_{\text{дин.с.п } 0} = |M_{\text{дв.п}} - M_{\text{ст.с}0}|,$$

$$M_{\text{дин.с.п } 0} = |3006 - 62| = 2944 \text{ Нм}$$

$$M_{\text{дин.с.г } 0} = |M_{\text{дв.п}} + M_{\text{ст.с}0}|,$$

$$M_{\text{дин.с.г } 0} = |3006 + 62| = 3068 \text{ Нм}.$$

Розраховуємо час пуску і гальмування електроприводу підйому на різних ділянках робіт.

Час пуску в процесі підйому вантажу

$$t_{п.п} = \frac{J_{пр.п} \cdot \omega_n}{M_{дин.п.п}},$$

$$t_{п.п} = \frac{20 \cdot 56,55}{2205} = 0,5 \text{ с.}$$

Час гальмування в процесі підйому вантажу

$$t_{п.г} = \frac{J_{пр.п} \cdot \omega_n}{M_{дин.п.г}},$$

$$t_{п.г} = \frac{20 \cdot 56,55}{3801} = 0,3 \text{ с.}$$

Час пуску в процесі підйому вантажозахватного пристрою

$$t_{п.п.0} = \frac{J_{пр.0} \cdot \omega_n}{M_{дин.п.п.0}},$$

$$t_{п.п.0} = \frac{19,7 \cdot 56,55}{3533} = 0,29 \text{ с.}$$

Час гальмування в процесі підйому вантажозахватного пристрою

$$t_{п.г.0} = \frac{J_{пр.0} \cdot \omega_n}{M_{дин.п.г.0}},$$

$$t_{п.г.0} = \frac{19,7 \cdot 56,55}{2479} = 0,47 \text{ с.}$$

Час пуску в процесі спуску вантажу

$$t_{с.п} = \frac{J_{пр.п} \cdot \omega_n}{M_{дин.с.п}},$$

$$t_{с.п} = \frac{20 \cdot 56,55}{2962} = 0,38 \text{ с} .$$

Час гальмування в процесі спуску вантажу

$$t_{с.г} = \frac{J_{пр.п} \cdot \omega_n}{M_{дин.с.г}} ,$$

$$t_{с.г} = \frac{20 \cdot 56,55}{3052} = 0,37 \text{ с} .$$

Час пуску в процесі спуску вантажозахватного пристрою

$$t_{с.п.0} = \frac{J_{пр.0} \cdot \omega_n}{M_{дин.с.п.0}} ,$$

$$t_{с.п.0} = \frac{19,7 \cdot 56,55}{2944} = 0,36 \text{ с} .$$

Час гальмування в процесі спуску вантажозахватного пристрою

$$t_{с.г.0} = \frac{J_{пр.0} \cdot \omega_n}{M_{дин.с.г.0}} ,$$

$$t_{с.г.0} = \frac{19,7 \cdot 56,55}{3068} = 0,38 \text{ с}$$

Для забезпечення допустимого прискорення в перехідних режимах мінімальний час пуску і гальмування не повинен перевищувати:

$$t_{\min} \approx 5V_{\Pi} ,$$

$$t_{\min} = 5 \cdot 0,15 = 0,75 \text{ с} .$$

Приймаємо $t_{\min} = 1 \text{ с} .$

Шляхи, що проходить механізм за час розгону і гальмування

$$l = \frac{V_{\text{п}}}{2} \cdot t_{\text{min}} ,$$

$$l = \frac{0,15}{2} \cdot 1 = 0,075 \text{ м} .$$

Час роботи електроприводу із усталеною швидкістю

$$t_y = \frac{L_{\text{п}} - 2 \cdot l}{V_{\text{п}}} ,$$

$$t_y = \frac{6 - 2 \cdot 0,075}{0,15} = 39 \text{ с} .$$

Уточнюється тривалість включення механізму підйому

$$ПВ_{\text{п}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^4 t_{\text{п}i} + \sum_{i=1}^4 t_{\text{р}i} + \sum_{i=1}^4 t_{\text{у}i} \right)}{T_{\text{ц}}} ,$$

де $t_{\text{п}i}$, $t_{\text{р}i}$ – час роботи при пуску і гальмуванні на відповідній ділянці швидкісної діаграми

$$ПВ_{\text{п}} = \frac{4 \cdot 1 + 4 \cdot 1 + 4 \cdot 39}{398} = 0,412 .$$

Уточнюємо значення динамічного моменту при підйомі і спуску вантажу

$$M_{\text{дин. п(р)}} = J_{\text{пр.п}} \frac{\omega_{\text{н}}}{t_{\text{min}}} ,$$

$$M_{\text{дин. п(р)}} = 20 \cdot \frac{56,55}{1} = 1131 \text{ Нм} .$$

Динамічний момент при підйомі і спуску вантажозахватного пристрою:

$$M_{\text{дин. п(г) 0}} = J_{\text{пр.0}} \frac{\omega_{\text{н}}}{t_{\text{min}}},$$

$$M_{\text{дин. п(г) 0}} = 19,7 \cdot \frac{56,55}{1} = 1114 \text{ Нм}.$$

Швидкісна і навантажувальна діаграми показані на рис. 2.1.

Перевірка електродвигуна по нагріву проводиться шляхом визначення еквівалентного моменту $M_{\text{екв}}$ і виконання співвідношення

$$M_{\text{н}} \geq M_{\text{екв}} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{п}}}{ПВ_{\text{ст}}}},$$

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 M_{\text{екв}} \cdot t_{\text{pi}}}{\sum_{i=1}^4 t_{\text{pi}}}},$$

де $M_{\text{дв.і}}$ – момент двигуна на i -тій ділянці роботи;

t_{pi} – час роботи електроприводу на i -тій ділянці циклу.

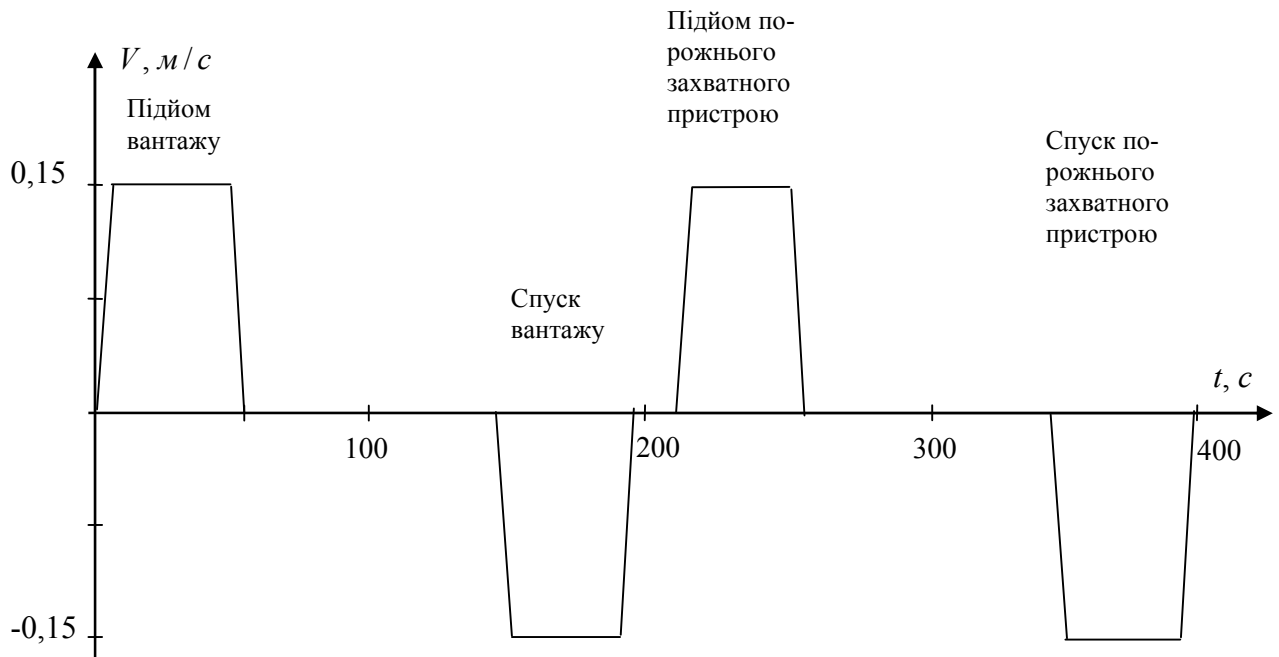
Підставляючи значення $M_{\text{дв.і}}$ і t_{pi} з діаграми навантаження, отримуємо

$$M_{\text{екв}} = 1263 \text{ Нм}$$

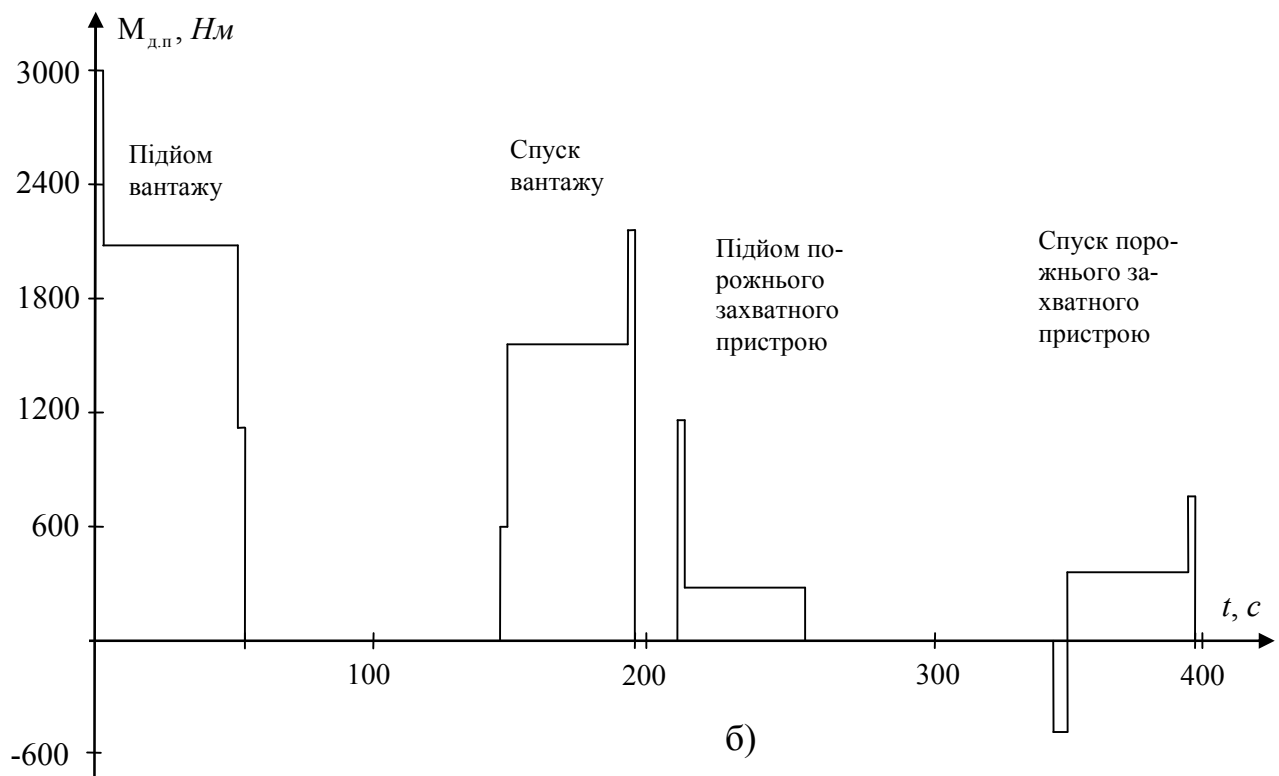
$$M_{\text{н}} > 1281 \cdot \sqrt{\frac{0,412}{0,4}} = 1287 \text{ Нм}.$$

Таким чином, за умовами нагріву двигун відповідає вимогам.

Відповідно до діаграми навантаження $M_{\text{max}} < 2M_{\text{н}}$, отже по перевантажувальній швидкості двигун вибраний правильно.



а)



б)

Рисунок 2.1 – Швидкісна а) і навантажувальна б) діаграма електроприводу механізму підйому мостового крана

2.4 Вибір основного електроустаткування силового кола електроприводу

Основний параметр при виборі силового перетворювача – потужність електроприводу. Вона повинна бути не менше, чим на 5-10% більш за потужність заданого двигуна постійного струму.

ЕРС перетворювач вибирають з урахуванням динамічного запасу, що потрібне для форсування процесу зміни струму, необхідність в якому виникає при технічній реалізації оптимальної настройки контура струму. ЕРС перетворювача

$$E_{\text{пр}} = E_{\text{д}} + \Delta U ,$$

де ΔU – запас по напрузі перетворювача

$$\Delta U = I_{\text{н}} R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{dI_{\text{н}}}{dt} \approx k_{\phi} I_{\text{н}} R_{\Sigma} ,$$

R_{Σ} – сумарний опір якірного ланцюга;

$I_{\text{д}}$ – номінальний струм електродвигуна;

k_{ϕ} – коефіцієнт форсування.

При настройки контура струму по модульному оптимуму

$$k_{\phi} = \frac{1}{1 - \exp\left(-3,26 \frac{T_{\text{е}}}{T_{\mu\text{т}}}\right)} ,$$

де $T_{\text{е}} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}$ – електромагнітна постійна силовому ланцюгу електроприводу;

$T_{\mu\text{т}}$ – мала некомпенсуєма постійна часу контура струму.

Величину k_{ϕ} можна визначити по залежностях $k_{\phi} = f(T_{\text{е}} / T_{\mu\text{т}})$, приведених в [55].

Оскільки значення L_{Σ} , R_{Σ} , $T_{\mu\text{т}}$ ще не відомі, скористаємося спрощеною методикою, згідно якої сумарний опір якірному ланцюгу приймаємо

$$R_{\Sigma} \cong 2 \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{дп}}),$$

$$R_{\Sigma} = 2 \cdot 0,0324 = 0,0648 \text{ Ом}.$$

Коефіцієнт форсування приймаємо $k_{\text{ф}} = (3...6)$.

Номинальний струм двигуна $I_{\text{н}} = 175 \text{ А}$

Номинальна ЕРС двигуна

$$E_{\text{н}} = \frac{pN\omega_{\text{н}}}{2\pi a} \Phi_{\text{н}},$$

$$E_{\text{н}} = \frac{2 \cdot 1008 \cdot 56,55}{2 \cdot \pi \cdot 4} \cdot 102,5 \cdot 10^{-3} = 432 \text{ В}$$

У даній формулі p , N , $\omega_{\text{н}}$, a , $\Phi_{\text{н}}$ – технічні дані двигуна, приведені вище.

Таким чином, потрібна ЕРС перетворювача

$$E_{\text{пр}} = 432 + 3 \cdot 175 \cdot 0,0648 = 466 \text{ В}.$$

По [42] користуючись одержаним значенням $E_{\text{пр}}$ і величиною номінального струму двигуна $I_{\text{н}} = 175 \text{ А}$ вибираємо комплектний тиристорний перетворювач типу ТПЕ-200/200-460 з наступними технічними даними: номінальна випрямлена напруга $U_{\text{дн}} = 460 \text{ В}$, номінальний випрямлений струм $I_{\text{дн}} = 200 \text{ А}$.

Перетворювач отримує живлення через токообмежуючий реактор. Схема випрямлення трифазна мостова з двома стрічно-паралельними групами. Управління групами роздільне. До складу ТП входять також регульований випрямляч для ланцюгів збудження, зібраний по однофазній мостовій схемі.

Вибираємо токообмежуючий реактор РТСТ-265-0,156 УЗ з технічними характеристиками: номінальна лінійна напруга живлячої мережі $U_{\text{р}} = 410 \text{ В}$, номінальна сила фазного струму $I_{\text{р}} = 265 \text{ А}$ (для трифазної мостової схеми випрямлення діюче значення струму реактора рівне 0,85 випрямленого струму); номінальна індуктивність фази $L_{\text{р}} = 0,156 \text{ мГн}$, активний опір обмоток $R_{\text{р}} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$.

2.5 Розрахунок параметрів силового кола електроприводу

Проти ЕРС двигуна визначена раніше, і складає $E_d = 432 \text{ В}$.

Опір якірного ланцюга двигуна для нагрітого стану машини

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

де $\alpha_t = 1,36$ – коефіцієнт зміни температури при нагріванні, для машин з класами ізоляції B, F, H

$$R_{\text{як}} = 1,36 \cdot 0,0324 = 0,04406 \text{ Ом}$$

Конструктивний коефіцієнт електродвигуна

$$k_{\text{дв}} = \frac{pN}{2\pi a},$$

$$k_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot 1008}{2 \cdot \pi \cdot 4} = 73,03.$$

Постійна проти-ЕРС двигуна

$$c = k_{\text{дв}} \Phi_n,$$

$$c = k_{\text{дв}} \Phi_n = 73,03 \cdot 102,5 \cdot 10^{-3} = 7,6$$

Передавальний коефіцієнт двигуна

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

$$k_d = \frac{1}{7,6} = 0,13.$$

Обертаючий момент двигуна

$$M_{\text{н}} = k_{\text{дв}} \Phi_{\text{н}} I_{\text{н}},$$

$$M_{\text{н}} = 7,6 \cdot 175 = 1330 \text{ Нм}.$$

Індуктивність якірного ланцюга двигуна

$$L_{\text{як}} = k \cdot \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} \cdot \frac{1}{\omega_{\text{н}} p},$$

де k – коефіцієнт, для некомпенсованих двигунів $k = 0,6$

$$L_{\text{як}} = 0,6 \cdot \frac{440}{175 \cdot 56,55 \cdot 4} = 0,0032 \text{ Гн}.$$

Індуктивність раніше вибраного токообмежуючого реактора складає $L_{\text{р}} = 0,156 \text{ мГн}.$

Сумарна індуктивність силового ланцюга, необхідна для згладжування пульсацій струму до заданого рівня.

$$L_{\text{с}} = \frac{l_{\text{п}} \cdot E_{\text{д0}}}{i_{\text{е}} \cdot \Omega \cdot I_{\text{н}}},$$

де $l_{\text{п}}$ – коефіцієнт визначуваний по графіку $l_{\text{п}} = f(\alpha)$ [55] для $\alpha_{\text{max}} = 60^\circ$ $l_{\text{п}} = 0,19.$

$E_{\text{д0}}$ – максимальне значення випрямленої ЕРС при куті управління тиристорами $\alpha = 0$

$$E_{\text{д0}} = \frac{m}{\pi} \sqrt{2} U_{\text{л}} \sin \frac{\pi}{m},$$

m – число фаз тиристорного перетворювача, для трифазної мостової схеми $m = 6$;

$U_{\text{л}}$ – діюче значення лінійної напруги живлення $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$

$$E_{\text{д0}} = \frac{6}{\pi} \sqrt{2} \cdot 380 \sin \frac{3,14}{6} = 514 \text{ В},$$

i_e – відносна величина пульсацій першої гармоніки випрямленого струму,
приймаємо $i_e = 0,02$;

Ω – кутова частота першої гармоніки випрямленого струму

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot m ,$$

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 6 = 1884 \text{ } c^{-1} ,$$

$$L_c = \frac{0,19 \cdot 514}{0,02 \cdot 1884 \cdot 175} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} .$$

Індуктивність згладжуючого реактора

$$L_{зр} = L_c - L_{як} - 2L_p$$

$$L_{зр} = 2,9 \cdot 10^{-3} - 0,0032 - 2 \cdot 0,156 \cdot 10^{-3} = -0,61 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Отже згладжуючий реактор не потрібний.

Таким чином, сумарна індуктивність якірного ланцюга складе

$$L_{\Sigma} = L_{як} + 2 \cdot L_p ,$$

$$L_{\Sigma} = 3,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,156 \cdot 10^{-3} = 0,0042 \text{ Гн} .$$

Еквівалентний активний опір перетворювача

$$R_{епр} = m \cdot f \cdot L_p ,$$

$$R_{епр} = 6 \cdot 50 \cdot 0,156 \cdot 10^{-3} = 0,0468 \text{ Ом} .$$

Сумарний активний опір якірного ланцюга

$$R_{\Sigma} = R_{як} + 2 \cdot R_{епр} + R_p ,$$

$$R_{\Sigma} = 0,04406 + 2 \cdot 0,0468 + 0,3 \cdot 10^{-3} = 0,138 \text{ Ом} .$$

Електромагнітна постійна якірного ланцюга

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

$$T_e = \frac{0,0032}{0,138} = 0,031 \text{ с}.$$

Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга двигуна

$$T_a = \frac{L_{\text{як}}}{R_{\text{як}}},$$

$$T_a = \frac{0,0027}{0,04406} = 0,052 \text{ с}.$$

Електромеханічна постійна часу електроприводу

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

де $J_{\Sigma} = J_{\text{прп}} = 19,56 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

$$T_m = 19,56 \cdot \frac{0,138}{(7,6)^2} = 0,048 \text{ с}.$$

Коефіцієнт посилення перетворювача тиристора спільно з СІФУ

$$k_{\text{тп}} = \frac{E_{\text{д0}}}{U_m},$$

де U_m – максимальне значення управляючої напруги на вході СІФУ. Для даного типу перетворювача максимальне значення вхідної напруги $\pm 15 \text{ В}$

$$k_{\text{тп}} = \frac{514}{10} = 51,4$$

2.6 Вибір структури системи управління

Показники якості перехідного процесу залежать від співвідношення постійних часу елементів системи, тому для формування високоякісних перехідних процесів необхідно забезпечити потрібні значення цих співвідношень шляхом впровадження коректувальних регуляторів. Загальний підхід до створення систем автоматичного управління, незалежно від типу електроприводу, полягає у складанні структурних схем на основі виразів для окремих елементів і введенні відповідних регуляторів у систему. У практиці побудови систем автоматичного регулювання (САР) електроприводів, включаючи крани, широко використовуються системи підлеглого регулювання параметрів. У таких системах застосовується принцип компенсації основних інерційних характеристик об'єкта управління через послідовне включення регулятора. Кількість послідовно включених регуляторів дорівнює кількості регульованих параметрів, а кожен контур системи автоматичного управління структурно складається з двох елементів: об'єкта регулювання та регулятора.

Згідно з рекомендаціями [42], обираємо двоконтурну систему автоматичного управління з дворазовою інтеграцією, яка включає внутрішній контур струму та зовнішній контур, замкнутий по електрорушійній силі (ЕРС) двигуна. Системи регулювання швидкості із зворотним зв'язком за ЕРС використовуються для електроприводів у випадках, коли вимоги до точності регулювання швидкості не надто високі. Серед електроприводів загальнопромислових механізмів, зокрема мостових кранів, електроприводи такого типу є найбільш поширеними.

Характерною особливістю електроприводів з роздільним управлінням тиристорних перетворювачів (ТП) є наявність зони нечутливості при роботі груп тиристорів, а також поява переривистих струмів при малих навантаженнях. Для мінімізації негативного впливу цих особливостей у контур регулювання струму додається підлеглий контур регулювання напруги ТП.

2.7 Синтез послідовного коректуючого пристрою контура струму

Контур струму є внутрішнім контуром системи підлеглого регулювання, тому розрахунок параметрів системи починається з контура струму. Оскільки швидкодія системи в цілому визначається внутрішнім контуром, то правильний вибір параметрів даного контура є одним з найбільш відповідальних етапів проектування системи управління електроприводом.

Згідно рекомендаціям [42], для контура регулювання напруги ТП вживаний П-регулятор, а для контура струму – ПІ-регулятор; відповідно контур струму оптимізуємо по модульному критерію.

Спрощена принципова схема контура струму з внутрішнім контуром напруги показана на рис. 2.2. На рисунку прийняті наступні позначення:

М – двигун постійного струму.

ДН, ДТ – датчики напруги і струму відповідно.

ТП – перетворювач тиристора.

R_d – дільнийник напруги.

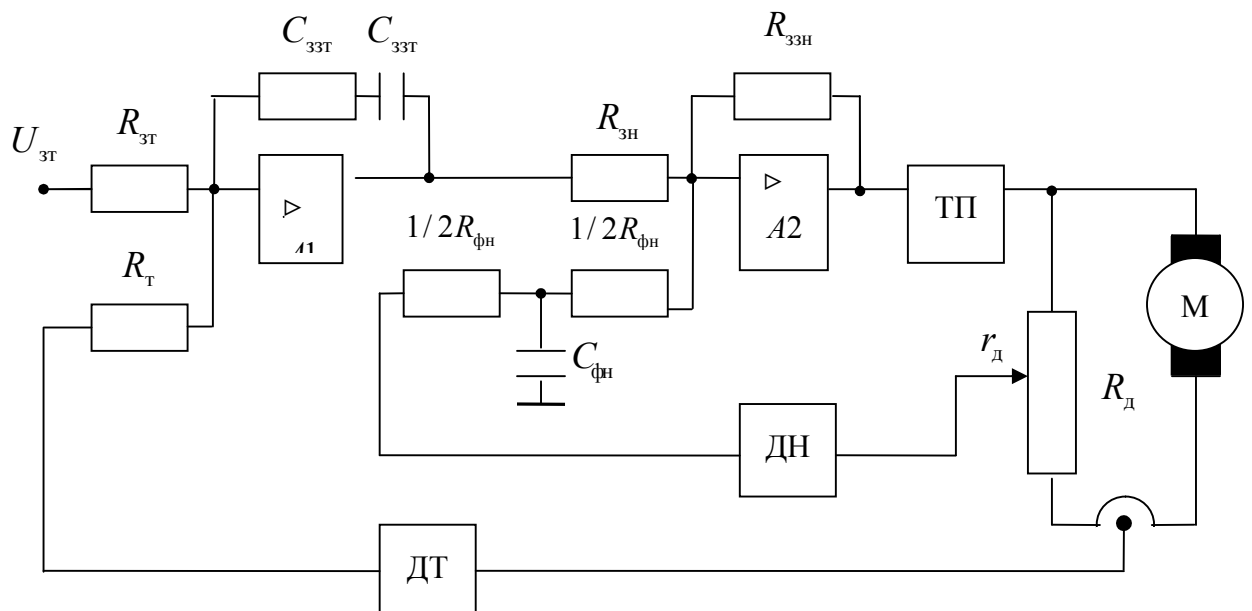


Рисунок 2.2 – Спрощена принципова схема контура струму

Алгоритмічна схема контура струму приведена на рис. 2.3, де $W_{pn}(p)$ і $W_{pt}(p)$ – передавальні функції регулятора напруги і струму відповідно.

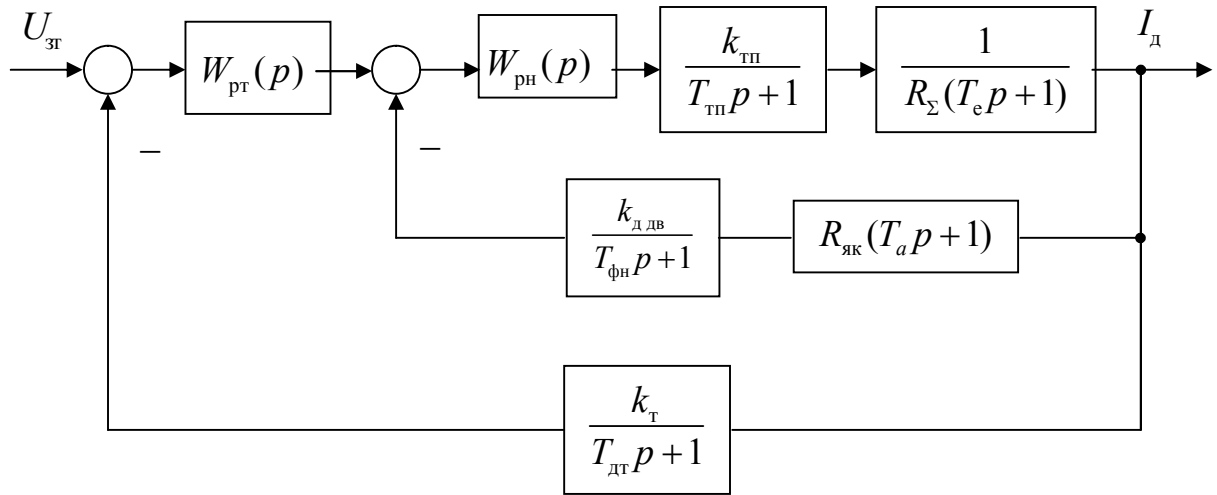


Рисунок 2.3 – Алгоритмічна схема контура струму

Визначаємо величину коефіцієнта діляника напруги двигуна виходячи з умови отримання 24 В на вході датчика напруги при максимальній напрузі двигуна.

$$k_{\text{д дв}} = \frac{24}{U_{\text{дв max}}},$$

$$k_{\text{д дв}} = \frac{24}{440} = 0,05454.$$

Критичний коефіцієнт посилення контура напруги визначається відповідно до методики [53]:

$$k_{\text{н кр}} = \frac{\pi^2 T_e T_t}{2T_0^2 \left(1 - \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_e}\right)},$$

де $T_t = 2T_{\mu\Gamma}$;

$T_{\mu\Gamma}$ – мала постійна, що не компенсується, контура струму, яка складається з постійної часу датчика струму з фільтром на вході і постійної часу тири-

торного перетворювача. Оскільки таке визначення $T_{\mu T}$ є досить складним завданням, то величиною $T_{\mu T}$ у практичних розрахунках зазвичай задаються, виходячи зі встановлених практикою меж $(4 \div 10) \cdot 10^{-3} \text{ c}$. Приймаємо $T_{\mu T} = 0,005 \text{ c}$; тоді $T_T = 2 \cdot 0,005 = 0,01 \text{ c}$.

T_1 – період першою гармонікою випрямленої напруги

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi}{2\pi \cdot m \cdot f} = \frac{1}{m \cdot f},$$

$$T_1 = \frac{1}{6 \cdot 50} = \frac{1}{300} \text{ c}.$$

Граничний коефіцієнт посилення контура напруги:

$$k_{\text{кн кр}} = \frac{3,14^2 \cdot 0,031 \cdot 0,01}{2 \cdot \left(\frac{1}{300}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{0,01}{0,031}\right)} = 203.$$

Приймаємо згідно рекомендаціям [53] $k_{\text{кн}} = 50$.

Сумарний коефіцієнт посилення контура напруги:

$$k_{\text{кн}} = k_{\text{рн}} k_{\text{тп}} k_{\text{д дв}} \frac{R_{\text{як}}}{R_{\Sigma}}.$$

З даного співвідношення визначаємо величину коефіцієнта посилення регулятора контура напруги (П-регулятора).

$$W_{\text{рн}}(p) = k_{\text{рн}} = \frac{R_{\text{зн}}}{R_{\Sigma}} = \frac{k_{\text{кн}} R_{\Sigma}}{k_{\text{тп}} k_{\text{д дв}} R_{\text{як}}},$$

$$W_{\text{рн}}(p) = k_{\text{рн}} = \frac{50 \cdot 0,133}{51,4 \cdot 0,05454 \cdot 0,04406} = 53,8.$$

Приймаємо: $R_{\text{зн}} = 8 \cdot 10^3 \text{ Ом}$, тоді

$$R_{\text{зн}} = R_{\text{зн}} \cdot k_{\text{рн}} ,$$

$$R_{\text{зн}} = 8 \cdot 53,8 = 430,4 \cdot 10^3 \text{ Ом} .$$

Постійну часу фільтру $T_{\text{фн}}$ в цепи зворотному зв'язку по напрузі приймаємо рівною T_a . Параметри фільтру визначаються із співвідношення:

$$\frac{R_{\text{фн}}}{4} \cdot C_{\text{фн}} = T_{\text{фн}} = T_a = 0,052 \text{ с} .$$

Приймаємо $R_{\text{фн}} = R_{\text{зн}}$, тоді значення ємності:

$$C_{\text{фн}} = \frac{4T_a}{R_{\text{зн}}} ,$$

$$C_{\text{фн}} = \frac{4 \cdot 0,052}{8 \cdot 10^3} = 26 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} .$$

Передавальна функція замкнутого контура напруги:

$$W_{\text{н}}(p) = \frac{k_{\text{рн}} k_{\text{тп}}}{R_{\Sigma}(1 + k_{\text{кн}})} \cdot \frac{1}{\left(\frac{T_{\text{е}}}{1 + k_{\text{кн}}} p + 1 \right) \cdot (T_{\text{тп}} p + 1)} . \quad (2.1)$$

Алгоритмічна схема контура струму з урахуванням (2.1) має вигляд, показаний на рис. 2.4.

Для того, щоб можна було скористатися загальноприйнятою методикою синтезу послідовних коректуючи пристроїв, необхідно цю схему перетворити до алгоритмічної схеми з одиничним зворотним зв'язком (рис. 2.5). Форсуюча ланка $(T_{\text{дт}} p + 1)$ у блоці, що стоїть на вході замкнутого контура струму з одиничним зворотним зв'язком, згідно загальноприйнятій методиці, не враховується.

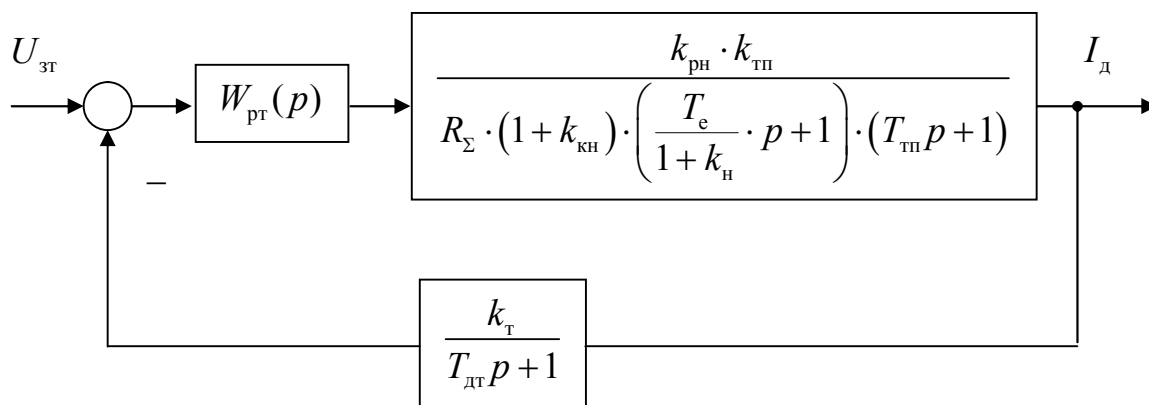


Рисунок 2.4 – Алгоритмічна схема контура струму з перетвореним контуром напруги

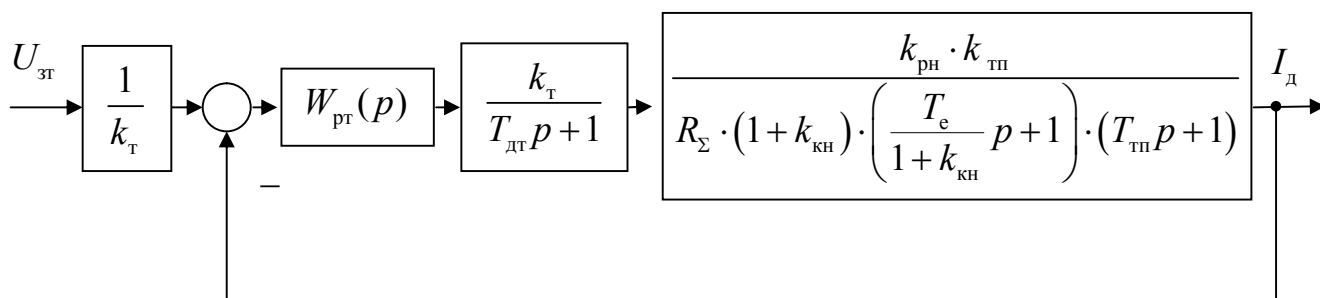


Рисунок 2.5 – Алгоритмічна схема контура струму з одиничним зворотним зв'язком

Передавальна функція розімкненого контура струму, оптимізованого по модульному критерію, повинна мати наступний вид:

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

Для отримання такої передавальної функції необхідно включити в контур струму ПІ-регулятор з наступною передавальною функцією.

$$W_{\text{рґ}}(p) = \frac{T_{\text{рґ}}p + 1}{T'_{\text{рґ}}p},$$

де

$$T_{\text{рт}} = C_{\text{ззт}} \cdot R_{\text{ззт}} = \frac{T_{\text{е}}}{1 + k_{\text{кн}}}, \quad (2.2)$$

$$T'_{\text{рт}} = R_{\text{зт}} \cdot C_{\text{ззт}} = \frac{2T_{\text{лт}} k_{\text{рн}} k_{\text{тп}} k_{\text{т}}}{R_{\Sigma}(1 + k_{\text{кн}})}. \quad (2.3)$$

У виразі (2.3) $k_{\text{т}}$ – коефіцієнт посилення ланцюга зворотного зв'язку по струму

$$k_{\text{т}} = k_{\text{дт}} k_{\text{ш}} \frac{R_{\text{зт}}}{R_{\text{т}}},$$

де $k_{\text{ш}}$ – коефіцієнт посилення шунта.

$$k_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{н ш}}}{I_{\text{н ш}}}.$$

Приймаємо номінальний струм шунта $I_{\text{н ш}}$ рівним максимальному значенню струму робочого перевантаження двигуна, $I_{\text{н ш}} = I_{\text{max}} = 2,5I_{\text{н}}$, падіння напруги на шунті при номінальному струмі $U_{\text{нш}} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ В}$.

$$k_{\text{ш}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 175} = 0,171 \cdot 10^{-3} \text{ В / А}.$$

$k_{\text{дт}}$ – коефіцієнт посилення датчика струму.

Як датчик струму використовуємо операційний підсилювач з коефіцієнтом посилення 320. В цьому випадку при рівності опорів $R_{\text{зт}}$ і $R_{\text{т}}$ при струмі максимального робочого перевантаження, рівному $2,5I_{\text{н}}$ максимальна вихідна напруга датчика струму $U_{\text{дт max}}$ не перевищує 24 В. Таким чином:

$$k_{\text{т}} = 0,171 \cdot 10^{-3} \cdot 320 = 0,0549 \text{ В / А}.$$

Із співвідношення (2.2) визначаємо значення опору R_{33T}

$$R_{33T} = \frac{T_e}{(1 + k_{KH}) \cdot C_{33T}}.$$

Приймаємо $C_{33T} = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, тоді

$$R_{33T} = \frac{0,031}{(1 + 50) \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 6 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Із співвідношення (2.3) визначаємо значення опору R_{3T}

$$R_{3T} = \frac{2T_{\mu T} k_{PH} k_{TP} k_T}{R_{\Sigma} (1 + k_{KH}) \cdot C_{33T}},$$

$$R_{3T} = \frac{2 \cdot 0,005 \cdot 53,8 \cdot 51,4 \cdot 0,0549}{0,138 \cdot (1 + 50) \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 2,16 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

$$R_T = R_{3T} = 2,16 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Передавальна функція замкнутого контура струму, оптимізованого згідно модульного критерію:

$$W_{3T}(p) = \frac{1/k_T}{2T_{\mu T}^2 p^2 + 2T_{\mu T} p + 1}. \quad (2.4)$$

2.8 Синтез послідовного коректуючого пристрою контура ЕРС

На рис. 2.6 показана принципова схема системи із зворотним зв'язком по ЕРС двигуна. Як вузол вимірювання ЕРС використовується датчик ЕРС, на вході якого відбувається підсумовування сигналів, пропорційних напрузі двигуна і падінню напруги в активному опорі якорного ланцюга (сигнал струмової компенсації).



Рисунок 2.6 – Принципова схема системи управління із зворотним зв'язком по ЕРС двигуна

Сигнал, пропорційний напрузі двигуна, знімається з двигуна R_d і подається на один з входів датчика ЕРС ДЕ через фільтр $R_n C_n$, що виконує функцію аперіодичної ланки з постійною часу T_a у ланцюзі зворотного зв'язку по напрузі. На другий вхід ДЕ подається сигнал струмової компенсації.

Як датчик ЕРС застосовуємо операційний підсилювач з гальванічно розділеним входом і виходом. Цей підсилювач має два виходи, один з яких служить для обхвату підсилювача зворотним зв'язком з вбудованим опором R_{os} . Другий вихід підсилювача, гальванічно відокремлений від першого, призначений для зв'язку з системою регулювання.

На вході системи встановлений фільтр $R_{ze} C_{ze}$ що виконує функцію аперіодичної ланки з постійною часу T_a . Цей фільтр необхідний для усунення підвищеного перерегулювання струму при збуренні за завданням.

На рис. 2.7 показана алгоритмічна схема системи. Оптимізований по модульному критерію контур струму представлений аперіодичною ланкою з передавальною функцією

$$W_T(p) = \frac{1/k_T}{2T_{\mu T}p + 1},$$

яка виходить при зневазі доданками $2T_{\mu T}^2 p^2$ у знаменнику передавальної функції контура струму (2.4).

Коефіцієнт посилення ланцюга струмової компенсації вибирається таким чином:

$$k_{TK} = k_n R_{як}$$

де k_n – коефіцієнт посилення ланцюга зворотного зв'язку по напрузі.

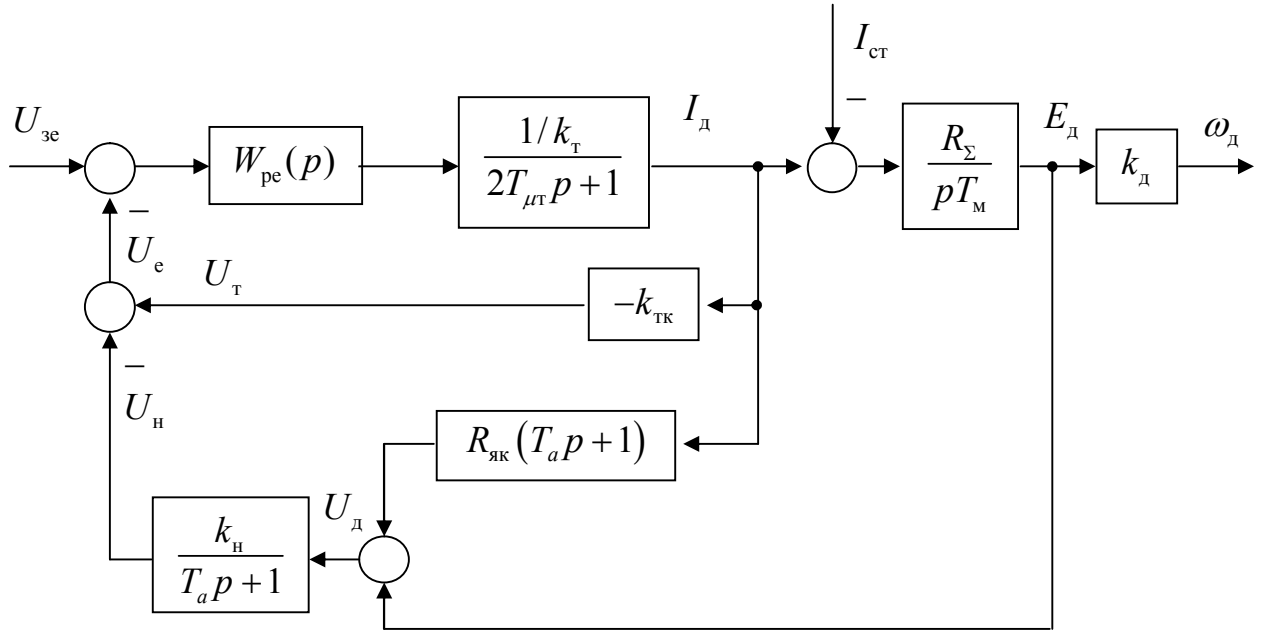


Рисунок 2.7 – Алгоритмічна схема системи регулювання швидкості із зворотним зв'язком по ЕРС

Сигнал на вході датчика ЕРС рівний:

$$U_e = U_H - U_T = \frac{k_H}{T_a p + 1} E_d.$$

Алгоритмічна схема рис. 2.7 шляхом еквівалентних перетворень перетвориться в схему рис. 2.8. На рис.2.9 показана розрахункова схема з одиничним зворотним зв'язком.

Для оптимізації контура ЕРС по симетричному критерію необхідно використовувати ПІ-регулятор з передавальною функцією.

$$W_{pe}(p) = \frac{T_M k_T}{2T_{\mu e} k_H R_\Sigma} \cdot \frac{1 + 4T_{\mu e} p}{4T_{\mu e} p}, \quad (2.5)$$

$T_{\mu e}$ – мала постійна, що не компенсується, контура ЕРС

$$T_{\mu e} = 2T_{\mu T} + T_a,$$

$$T_{\mu e} = 2 \cdot 0,005 + 0,052 = 0,062 \text{ с.}$$

Оскільки в склад $T_{\mu e}$ входить, T_a , то швидкодія системи із зворотним зв'язком по ЕРС нижче, ніж в системі з використанням тахогенератора.

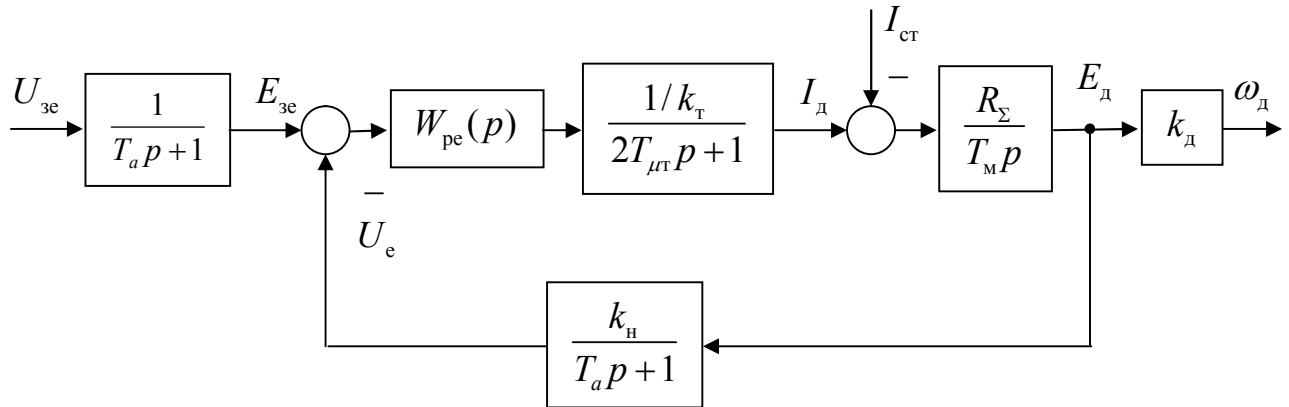


Рисунок 2.8 – Перетворена алгоритмічна схема системи

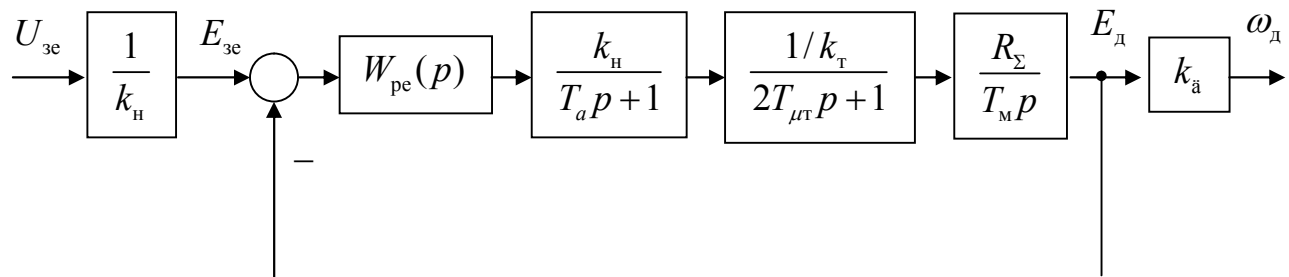


Рисунок 2.9 – Розрахункова алгоритмічна схема системи
з одиничним зворотним зв'язком

Коефіцієнт посилення k_h рівний

$$k_h = \frac{U_{ze \max}}{E_{d \max}},$$

де $E_{d \max}$ – ЕРС двигуна;

$U_{ze \max}$ – напруга завдання, відповідна $E_{d \max}$; приймаємо $U_{ze \max} = 24 \text{ В}$.

У якості $E_{д \max}$ приймемо ЕРС двигуна в режимі ідеального холостого ходу, тобто $E_{д \max} = U_{н} = 440 В$, тоді

$$k_{н} = \frac{24}{440} = 0,05454.$$

Зіставляючи передавальну функцію (2.5) з передавальною функцією типового ПІ-регулятора, отримуємо наступні рівняння

$$R_{ззе} C_{ззе} = 4T_{\mu e}, \quad (2.6)$$

$$\frac{R_{ззе}}{R_{зе}} = \frac{T_{\text{м}} k_{\text{т}}}{2T_{\mu e} k_{н} R_{\Sigma}}. \quad (2.7)$$

Задаємося величиною ємності $C_{ззе} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, тоді з (2.6) отримуємо

$$R_{ззе} = \frac{4T_{\mu e}}{C_{ззе}},$$

$$R_{ззе} = \frac{4 \cdot 0,062}{6 \cdot 10^{-6}} = 41,3 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

З виразу (2.7) визначаємо $R_{зе}$

$$R_{зе} = \frac{R_{ззе} 2T_{\mu e} k_{н} R_{\Sigma}}{T_{\text{м}} k_{\text{т}}},$$

$$R_{зе} = \frac{41,3 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0,062 \cdot 0,05454 \cdot 0,138}{0,052 \cdot 0,0549} = 13,4 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Приймаємо $R_{едс} = R_{зе} = 13,4 \cdot 10^3 \text{ Ом}$.

З виразу для коефіцієнта посилення ланцюга зворотного зв'язку по напрузі.

$$k_{н} = k_{\text{длв}} \cdot \frac{R_{зе}}{R_{н}} \cdot \frac{R_{де}}{R_{едс}}$$

Визначаємо

$$R_{\text{н}} = \frac{k_{\text{д дв}}}{k_{\text{н}}} \cdot \frac{R_{\text{зе}} R_{\text{де}}}{R_{\text{едс}}}.$$

Тут $R_{\text{де}}$ – вбудований опір; $R_{\text{де}} = 50 \text{ кОм}$.

$$R_{\text{н}} = \frac{0,05454}{0,05454} \cdot \frac{54 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^3}{54 \cdot 10^3} = 50 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Коефіцієнт посилення ланцюга струмової компенсації:

$$k_{\text{тк}} = k_{\text{н}} R_{\text{як}},$$

$$k_{\text{тк}} = 0,05454 \cdot 0,04406 = 2,4 \cdot 10^{-3}.$$

З іншого боку.

$$k_{\text{тк}} = k_{\text{ш}} \cdot \frac{R_{\text{зе}}}{R_{\text{тк}}} \cdot \frac{R_{\text{де}}}{R_{\text{едс}}},$$

звідки

$$R_{\text{тк}} = \frac{k_{\text{ш}}}{k_{\text{тк}}} \cdot \frac{R_{\text{зе}} R_{\text{де}}}{R_{\text{едс}}},$$

$$R_{\text{тк}} = \frac{0,171 \cdot 10^{-3}}{2,4 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{13,4 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^3}{13,4 \cdot 10^3} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Параметри фільтрів на вході системи і в ланцюзі зворотного зв'язку по напрузі визначаються з рівнянь.

$$\frac{R_{\text{зе}}}{4} C_{\text{зе}} = \frac{R_{\text{н}}}{4} C_{\text{н}} = T_a,$$

$$C_{\text{зе}} = \frac{4T_a}{R_{\text{зе}}},$$

$$C_{\text{зе}} = \frac{4 \cdot 0,052}{13,4 \cdot 10^3} = 15,5 \cdot 10^{-6} \Phi,$$

$$C_{\text{н}} = \frac{4T_a}{R_{\text{н}}},$$

$$C_{\text{н}} = \frac{4 \cdot 0,052}{50 \cdot 10^3} = 4,16 \cdot 10^{-6} \Phi.$$

Передавальні функції системи, оптимізованої по симетричному критерію, мають вигляд:

$$W_{\omega_{\text{д}}, U_{\text{зе}}}(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{U_{\text{зе}}(p)} = \frac{k_{\text{д}}}{k_{\text{н}}} \cdot \frac{B(p)}{A(p)};$$

$$W_{\omega_{\text{д}}, I_{\text{ст}}}(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)} = -\frac{8T_{\mu\epsilon}^2 k_{\text{д}} R_{\Sigma}}{T_{\text{м}}} \cdot \frac{p(1 + T_{\mu\epsilon} p)}{A(p)};$$

$$W_{I_{\text{д}}, U_{\text{зе}}}(p) = \frac{I_{\text{д}}(p)}{U_{\text{зе}}(p)} = \frac{T_{\text{м}}}{k_{\text{н}} R_{\Sigma}} \cdot \frac{pB(p)}{A(p)};$$

$$W_{I_{\text{д}}, I_{\text{ст}}}(p) = \frac{I_{\text{д}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)} = \frac{B(p)}{A(p)}$$

де $A(p)$ і $B(p)$ – поліноми від p що мають наступний вид:

$$A(p) = 8T_{\mu\epsilon}^3 p^3 + 8T_{\mu\epsilon}^2 p^2 + 4T_{\mu\epsilon} p + 1;$$

$$B(p) = 4T_{\mu\epsilon} p + 1.$$

Алгоритмічна схема системи показана на рисунку 2.10.

2.9 Дослідження динамічних характеристик системи

Для побудови перехідних процесів системи була розроблена на ЕОМ за допомогою пакету MATLAB в режимі SIMULINK. Схема моделі показана на рисунку 2.11. Перехідні процеси досліджувалися також по векторно-матричному рівнянню системи, порядок складання якого дається в подальших розділах. На рисунку 2.12 приведені графіки перехідних процесів швидкості і струму двигуна по задаючій дії. При настроюванні системи на симетричний оптимум є значне (43,3%) перерегулювання швидкості. Для зменшення перерегулювання на вихід системи доцільно включити фільтр з постійною часу, рівною $4T_{\mu e}$, унаслідок чого перерегулювання знижується до 8,1%, проте при цьому збільшується час першого узгодження. Криві $\omega_d = f(t)$ і $I_d = f(t)$ з фільтром і без фільтру позначені 1 і 2 відповідно.

На рисунку 2.13 показані графіки перехідних процесів швидкості і струму електроприводу по збурюючій дії.

Як видно з графіків, при використанні фільтру на вході системи перехідні процеси для даних випадків мають задовільний характер.

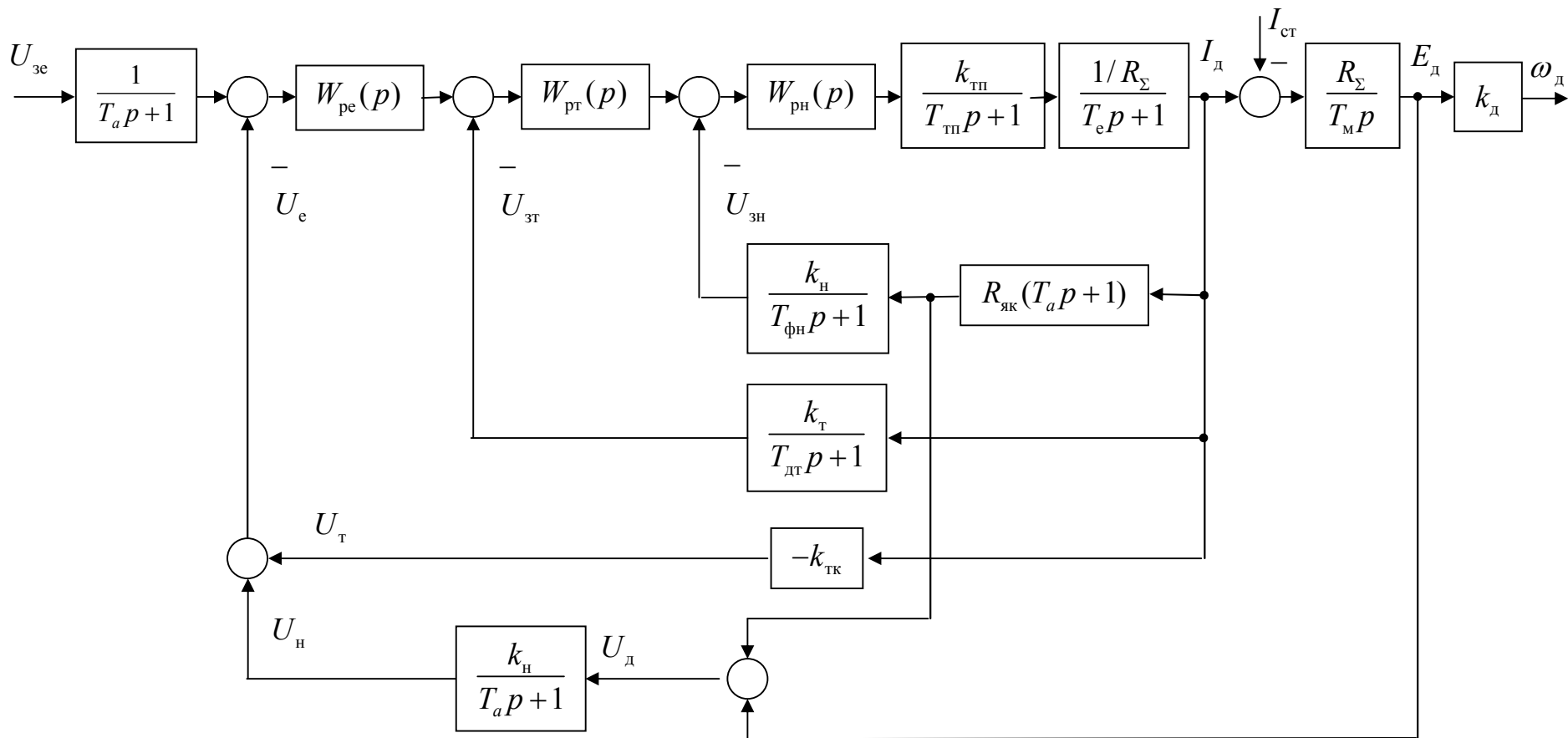


Рисунок 2.10 – Алгоритмічна схема системи

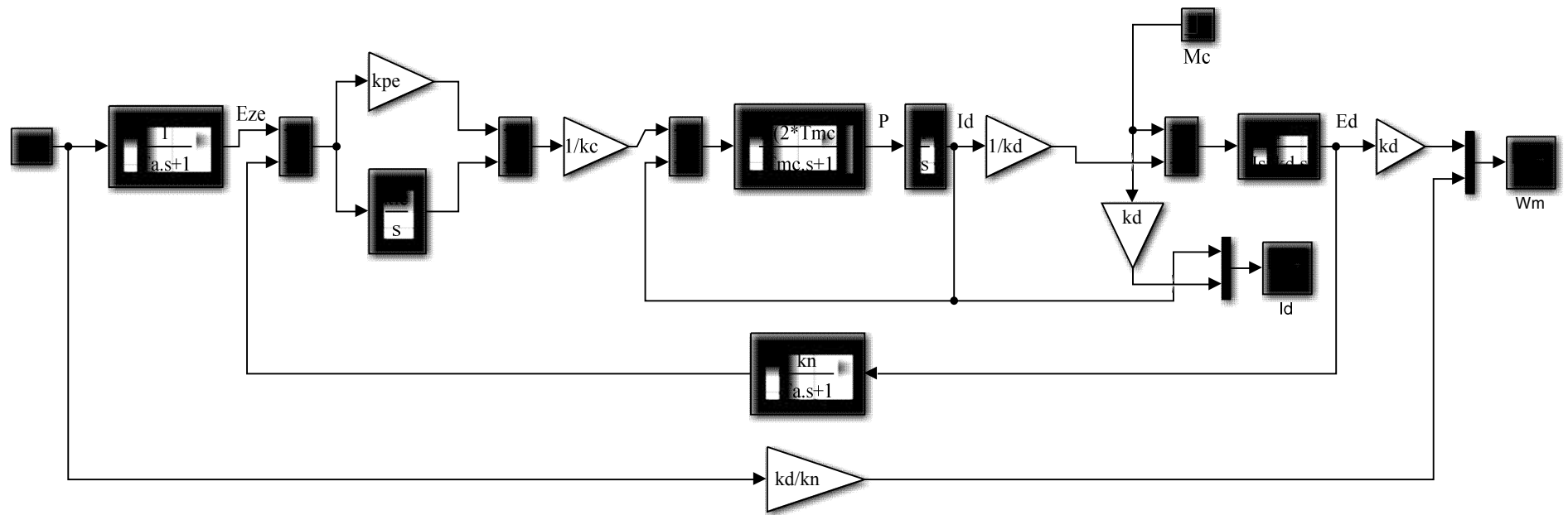


Рисунок 2.11 – Схема системи, розроблена на ЕОМ

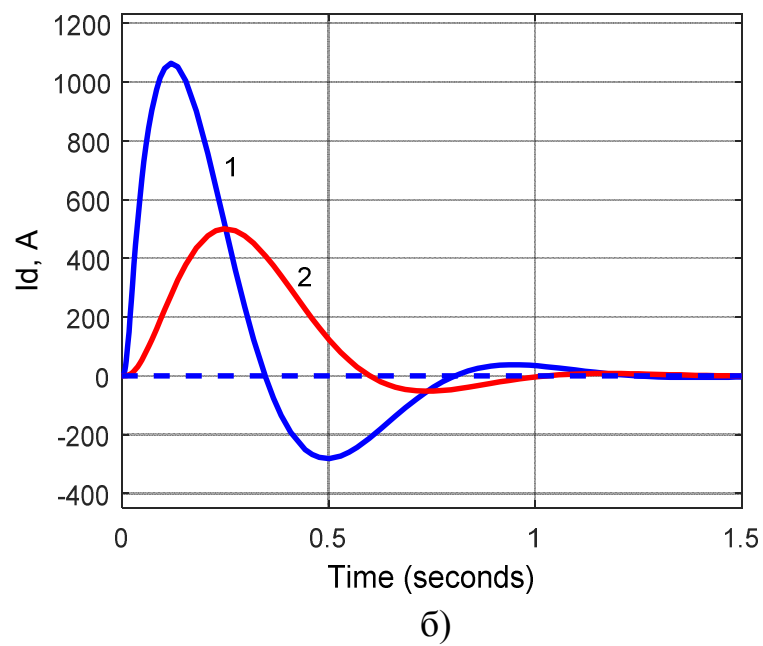
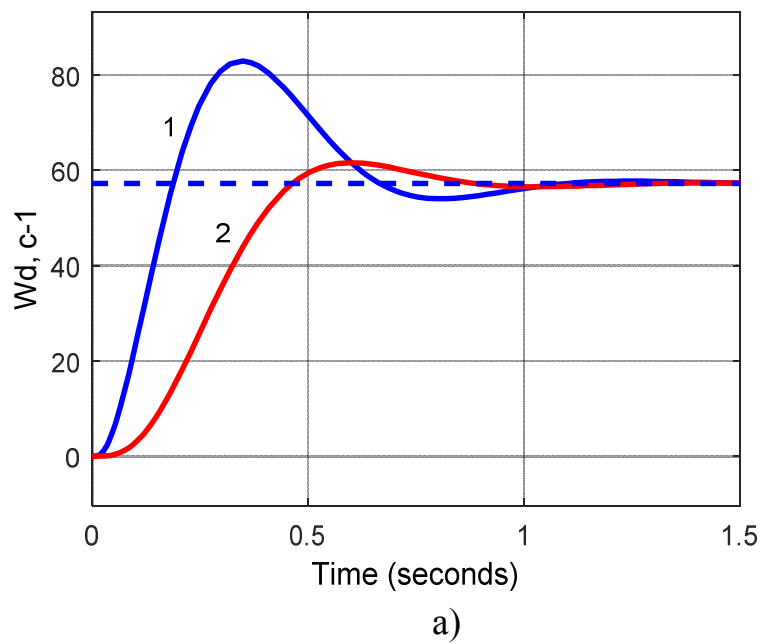


Рисунок 2.12 – Графіки перехідних процесів швидкості а)
і струму б) по задаючій дії

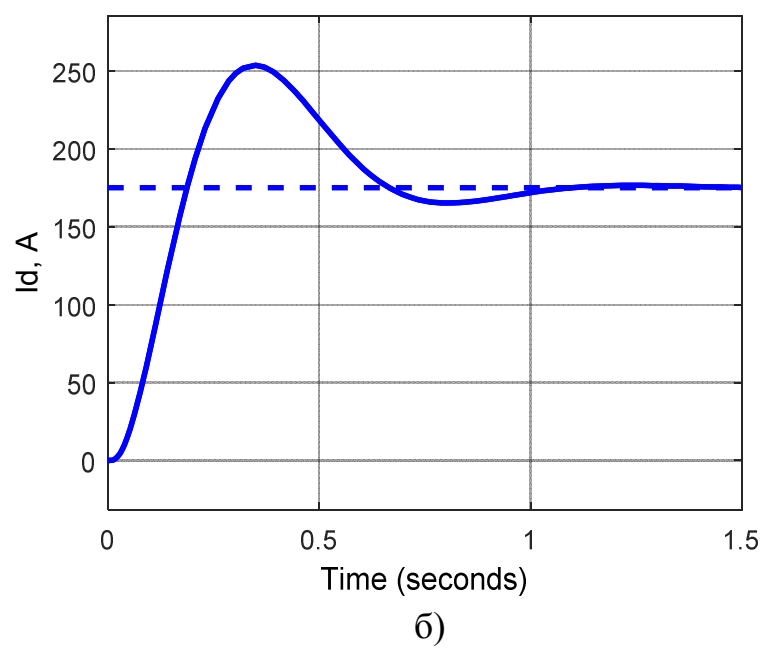
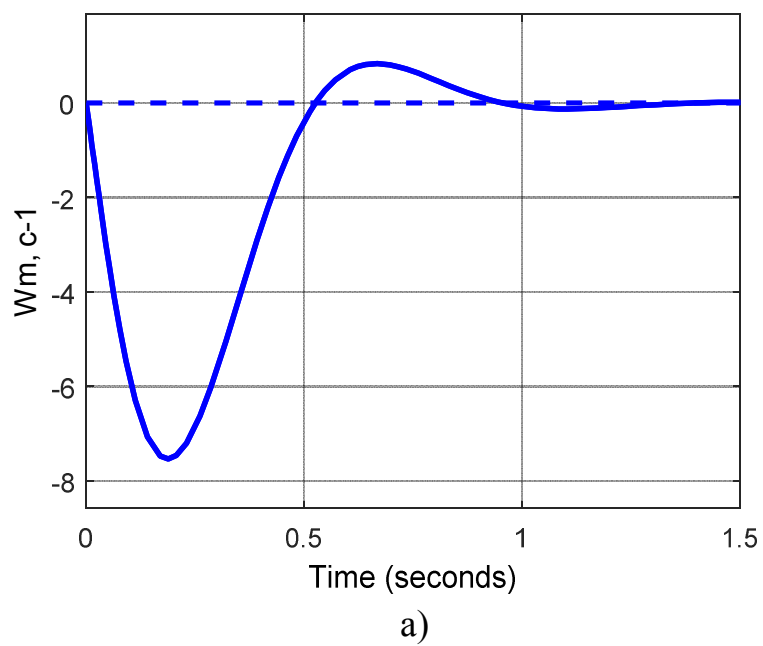


Рисунок 2.13 – Графіки перехідних процесів швидкості а)
і струму б) по збурюючій дії

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. На підставі аналізу вимог до систем електроприводів основних механізмів мостових кранів для електроприводу механізму підйому вибраний електропривод постійного струму, виконаний за системою ТП–Д. Для управління координатами електроприводу застосована система підлеглого регулювання.

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. Обрано структуру системи автоматичного управління, метою якої є забезпечення необхідних механічних характеристик електроприводу як у статиці, так і в динаміці. Також вона має забезпечити високу якість перехідних процесів та оптимізацію роботи електроприводу в різних режимах механізму. Тому для електроприводу механізму підйому мостового крану була вибрана двоконтурна система підлеглого регулювання. Ця система включає в себе внутрішній контур струму та зовнішній контур швидкості, які замкнуті по ЕРС двигуна. Щоб покращити динамічні характеристики системи, був введений підлеглий контур регулювання напруги тиристорного перетворювача у контурі регулювання струму.

5. Проведений синтез послідовних коректуючи пристроїв контурів. Оскільки характер перехідного процесу залежить від відношення постійних часу елементів системи, утворення високоякісних перехідних процесів пов'язане з досягненням відповідних значень цих відношень шляхом застосування коригуючих регуляторів. Для контура напруги синтезований П-регулятор, а для кон-

турів струму і ЕРС – ПІ-регулятори, унаслідок чого контур струму оптимізований по модульному критерію, а контур ЕРС – по симетричному критерію.

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 перехідних процісів в системі по задаючій і збурюючій діях. Перехідні процеси досліджувалися також по векторно-матричному рівнянню системи і з використанням передатних функцій системи. При настроюванні системи на симетричний оптимум є значне (43,3%) перерегулювання швидкості. Для зменшення перерегулювання на вихід системи включено фільтр з постійною часу, рівною $T_{\mu\epsilon}$, унаслідок чого перерегулювання знижене до 8,1%.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ КІНЦЕВОЇ ЖОРСТКОСТІ ПІДЙОМНОГО КАНАТА

3.1 Розрахункові схеми механічної частини електроприводу

У розділі 2 проведено розрахунок системи регулювання, враховуючи нескінченну жорсткість всіх компонентів механічної частини системи, у тому числі підйомного каната, припускаючи одномасову систему. У реальних системах всі зв'язки між елементами мають обмежену жорсткість, а підйомний канат функціонує як пружний елемент із розподіленими параметрами. Тому механізм підйому мостового крана є багатомасовою системою, що складається з різних мас, які рухаються поступально та обертально.

Кінематичної схеми електроприводу механізму підйому мостового крана представлена на рис. 3.1,а. Тут двигун через сполучну муфту $СМ1$, клиноременну передачу $КРП$, ряд зубчатих передач $ЗП_1$..., $ЗП_i$ і сполучну муфту $СМ2$ приводить в обертання барабан $Б$, що перетворює обертальний рух в поступальний переміщення ряду зв'язаних мас. У даній схемі передбачається, що робочим органом механізму є вантажозахватний пристрій, що переміщає вантаж $В$, що має масу m_B , яка рухається зі швидкістю V_B і на яку діє сила тяжіння F_B .

Ця схема показує, що в загальному випадку механічна частина електроприводу складається з взаємопов'язаних мас, які рухаються з різними швидкостями - або обертаються, або рухаються прямолінійно. Коли систему навантажують, компоненти системи (вали, опори, передачі руху за допомогою ременів чи шестерень, канати тощо) починають деформуватися, оскільки механічні зв'язки не є абсолютно жорсткими. При змінах у навантаженні маси можуть пересуватися, і цей рух залежить від жорсткості зв'язку при даному збільшенні навантаження.

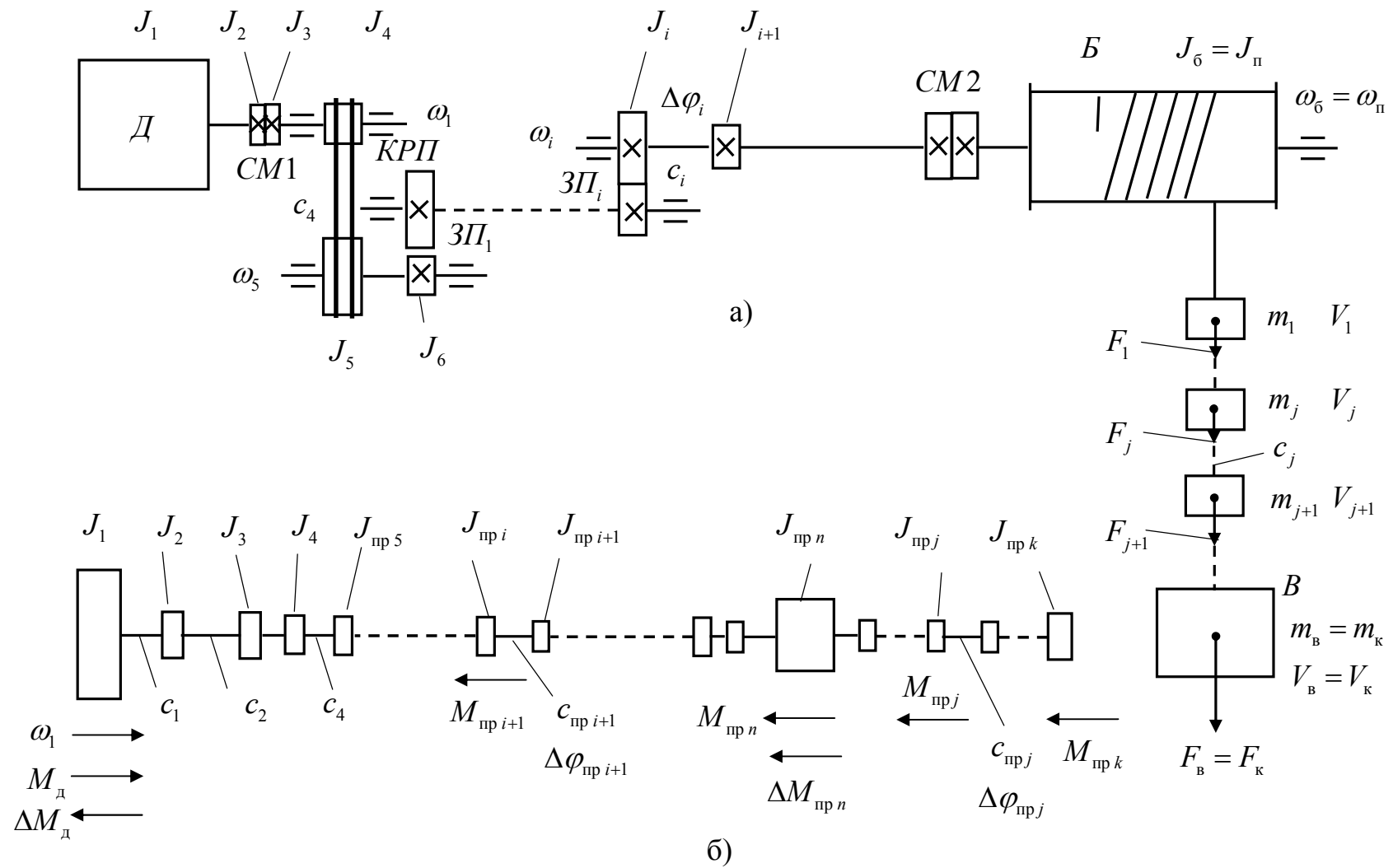


Рисунок 3.1 – Кінематична (а) і розрахункова (б) схеми механічної частини електроприводу

При побудові даної кінематичної схеми прийнято, що механічна частина приводу складається з обертально рухомих централізованих мас та поступально рухомих, і не враховується механічна інерція елементів, які з'єднують ці маси. Кожен обертально рухомий елемент має свій момент інерції та зв'язаний з -м елементом механічного зв'язку, що має певну жорсткість. Відповідно, кожен поступально рухомий елемент має масу та зв'язаний з наступним механічним зв'язком, що має свою жорсткість. У межах деформацій пружних механічних зв'язків, які підкоряються закону Гука, жорсткості можна визначити за відповідними взаємозв'язками.

$$c_i = M_{\text{пр}i} \Delta \varphi_i, \quad c_j = F_{\text{пр}j} \Delta S_j, \quad (3.1)$$

де $M_{\text{пр}i}$ і $F_{\text{пр}j}$ – навантаження пружного механічного зв'язку;

$\Delta \varphi_i$; і ΔS_j – деформація пружного елемента при обертальній і поступальній ході.

Маси окремих елементів та жорсткості їх зв'язків у кінематичному ланцюгу приводу різняться. Найбільший вплив на рух системи мають найбільші маси і найменші жорсткості зв'язків. Саме тому однією з ключових завдань при розробці та вивченні електроприводів є складання спрощених розрахункових схем для механічної частини, що враховують можливі відхилення через пружність достатньо жорстких зв'язків та наближене урахування впливу малих рухомих мас. Важливо зауважити, що у зв'язку з наявністю різних передач різні елементи системи рухаються з різними швидкостями, тому просто порівняти їх маси, моменти інерції, жорсткості зв'язків та переміщення не можливо. В результаті для розробки розрахункових схем механічної частини електроприводу необхідно привести всі параметри елементів кінематичного ланцюга до однієї відповідної швидкості. Зазвичай, найзручніше проводити таке приведення до швидкості двигуна, але варто зазначити, що це можливо зробити для будь-якого елемента. Особливо корисним є приведення до швидкості механізму при вирішенні ряду задач, особливо якщо мова йде про поступальний рух його органу.

Приведена розрахункова схема відповідає реальній механічній системі тоді, коли дотримується принцип збереження енергії. Під час приведення важливо забезпечити, щоб кінетична та потенційна енергія системи, а також елементарна робота всіх сил і моментів, що впливають на систему, залишалися сталими на всіх можливих переміщеннях.

Відповідно, формули приведення моменту інерції елементу системи, рухомого обертально зі швидкістю ω_i , або маси, поступально рухомої з швидкістю V_j до розрахункової швидкості ω_1 мають вид:

$$J_{\text{пр}i} = J_i / i_{1i}^2, \quad J_{\text{пр}j} = m_j / \rho_{1j}^2, \quad (3.2)$$

де $i_{1i} = \omega_1 / \omega_i$ – передавальне число від валу приведення до i -го валу;

$\rho_{1j} = V_j / \omega_1$ – радіус приведення до валу з швидкістю ω_1 .

При врахуванні приведених обертальних φ_i і поступальних S_j переміщень слід мати на увазі, що передавальне число і радіус приведення визначаються залежностями між швидкостями. Формули, які описують приведення переміщень, мають такий вигляд:

$$\Delta\varphi_{\text{пр}i} = \varphi_i i_{1i}, \quad \varphi_{\text{пр}j} = S_j / \rho_{1j}. \quad (3.3)$$

При приведенні жорсткостей механічних зв'язків повинна виконуватися умова рівності запасу потенційної енергії. Відповідно формули приведення

$$c_{\text{пр}i} = c_i / i_{1i}^2, \quad c_{\text{пр}j} = c_j / \rho_{1j}^2. \quad (3.4)$$

Приведення моментів і сил, що припадають на навантаження елементів кінематичного ланцюга, виконується шляхом забезпечення рівності елементарної роботи на можливих переміщеннях, іншими словами, на основі такої умови:

$$M_{\text{пр}i} = M_i / i_{1i}, \quad M_{\text{пр}j} = F_j \rho_{1j}. \quad (3.5)$$

При розробці та аналізі електроприводів зазвичай відомі моменти інерції, маси та жорсткості реальних елементів, а сили, які діють у системі, або задані, або розраховані на основі вхідних даних механізму і його умов функціонування. Після приведення цих параметрів до розрахункової швидкості, здається можливим порівняти приведені значення моментів інерції та жорсткостей, обрати основні маси і основні пружні зв'язки і на цій підставі скласти приблизну розрахункову схему механічної частини. Для більш наочного порівняння результатів приведення можна побудувати початкову приведену розрахункову схему, де маси представлені у формі прямокутників, площа яких пропорційна приведеним моментам інерції, а жорсткості зв'язків між ними у вигляді з'єднань, довжина яких обернено пропорційна жорсткості (прямо пропорційна гнучкості зв'язків).

Для кінематичної схеми на рис. 1.1,а приведена розрахункова схема може мати вид, показаний на рис. 1.1,б. Для прикладу в ній виділені три найбільш значні маси – ротор двигуна з моментом інерції J_1 , барабан з приведеним моментом інерції $J_{пр\ n}$ і грузнук $J_{пр\ k}$. Розглядаючи цю схему, можна бачити, що унаслідок незначної величини решти моментів інерції її можна істотно спростити. Для цього слід малі маси додати до найближчих великих, а потім визначити еквівалентні жорсткості зв'язків між отриманими масами по загальній формулі:

$$1/c_{екв} = 1/c_1 + 1/c_2 + 1/c_3 + \dots \quad (3.6)$$

На початковій розрахунковій схемі (рис. 1.1,б) стрілками показані прикладені до окремих мас системи приведені моменти зовнішніх сил, що діють в системі $M_{пр\ i}$ і $M_{пр\ j}$. До ротора двигуна J_1 прикладений електромагнітний момент двигуна M_d і момент механічних втрат ΔM_d , причому для правильного урахування знаку моментів, що діють, вказаний позитивний для всієї приведенної схеми напрям швидкості ω_1 . При переході до спрощеної розрахункової схе-

ми необхідно підсумувати всі зовнішні прикладені до мас сили, зв'язки між якими приймаються жорсткими.

Дослідження динаміки електроприводів показують, що спрощені розрахункові механічні моделі, завдяки виділенню основних мас і жорсткостей, у більшості практичних випадків перетворюються на трьохмасові (рис. 3.2, а) та двомасові (рис. 3.2, б) розрахункові схеми..

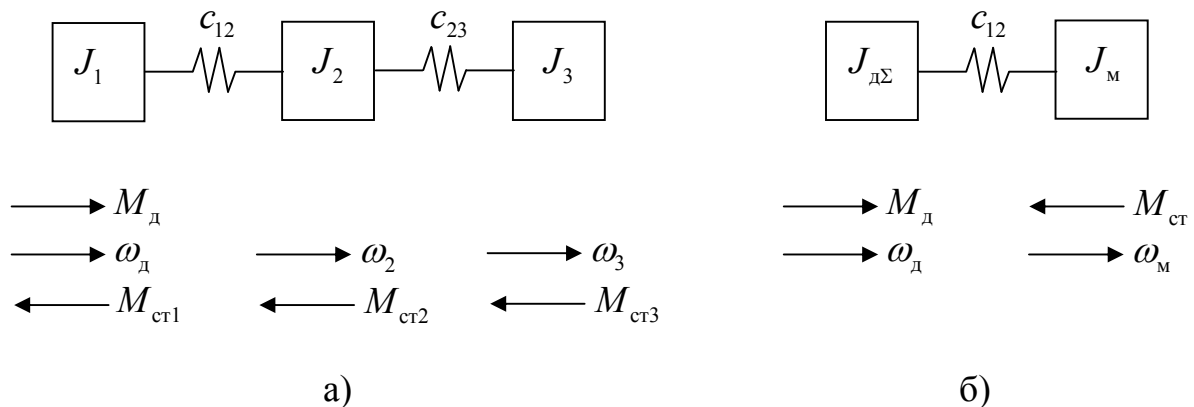


Рисунок 3.2 – Розрахункові схеми механічної частини електроприводу

а) – схема трьохмасової системи; б) – схема двомасової системи

Параметрами узагальненої трьохмасової механічної системи (розрахункової схеми на рис. 3.2, а) є сумарні приведені моменти інерції мас J_1 , J_2 і J_3 , які утворені приведеними масами, причому зв'язки між ними вважаються жорсткими. Також враховуються еквівалентні приведені жорсткості механічних пружних зв'язків між J_1 і J_2 – c_1 , а також між J_2 і J_3 – c_2 . Перша маса представляє ротор двигуна і елементи, які жорстко з ним з'єднані; до цієї маси прикладені електромагнітний момент двигуна M і момент статичного навантаження $M_{ст1}$ який зазвичай є сумарним моментом втрат на валу двигуна і в жорстко з ним зв'язаних елементах.

До проміжної маси механізму (J_2) прикладений момент опору $M_{ст2}$ а до третьої (J_3) – момент зовнішнього навантаження цієї маси $M_{ст3}$.

Під час аналізу систем автоматизованого електроприводу використову-

ється трьохмасова пружна система у випадках, коли необхідно докладніше вивчити рух мас механізму. Для вирішення цієї задачі зазвичай використовується математичне моделювання на обчислювальних машинах. Для розгляду окремих фізичних аспектів, трьохмасова розрахункова схема може бути зведена до двомасової.

У узагальненій двохмасовій пружній системі (рис. 3.2,б) сумарний приведений момент інерції елементів, жорстко пов'язаних з двигуном позначений J_{Σ} . Сумарний приведений момент інерції елементів, жорстко пов'язаних з робочим органом механізму, позначений J_m . Швидкість механізму позначена ω_m . Безінерційний пружний зв'язок між цими масами характеризується приведеною еквівалентною жорсткістю c_{12} . Сумарний момент навантажень на валу двигуна $M_{\Sigma 1}$, який є сумарним моментом втрат на валу двигуна і в жорстко з ним зв'язаних елементах, в подальших розрахунках не враховуємо. Сумарний момент навантажень на валу механізму позначений M_{Σ} .

Електромеханічна система з двомасовою пружною механічною частиною є простою моделлю електроприводу, найбільш зручною для вивчення впливу пружних механічних зв'язків, тому в даному розділі є основним об'єктом дослідження.

3.2 Математична модель двомасової системи

Кінематична схема механічної частини електроприводу механізму підйому, приведена до двомасової системи, в загальному випадку з урахуванням моменту внутрішнього в'язкого тертя, описується рівняннями:

$$\begin{cases} J_m \frac{d\omega_m}{dt} = M_{\Sigma} - M_{\Sigma 1}; \\ \frac{dM_{np}}{dt} = c_{12}(\omega_d - \omega_m); \\ J_{\Sigma} \frac{d\omega_d}{dt} = M_d - M_{\Sigma}. \end{cases} \quad (3.1)$$

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

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

β – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя; у розрахунках приймаємо $\beta = 0$.

Розглянемо двомасову систему підлеглого регулювання швидкості з контуром струму, настроєним по модульному критерію і контуро ЕРС і, настроєним по симетричному критерію. Алгоритмічна схема двомасової системи показана на рис. 3.3.

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

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

Одномасова система підлеглого регулювання швидкості з контуром струму, настроєним по модульному критерію і контуро ЕРС і, настроєним по симетричному критерію описується наступною системою диференціальних рівнянь, записаних у формі Коші:.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{1}{J_{\text{д}\Sigma}} M_{\text{д}} - \frac{1}{J_{\text{д}\Sigma}} M_{\text{ст}}; \\ \frac{dM_{\text{д}}}{dt} = \frac{1}{k_{\text{д}}} P; \\ \frac{dP}{dt} = \frac{k_{\text{пе}}}{2T_{\mu\Gamma}^2 k_{\Gamma}} E_{\text{зе}} - \frac{k_{\text{пе}}}{2T_{\mu\Gamma}^2 k_{\Gamma}} U_{\text{ззе}} - \frac{k_{\text{д}}}{2T_{\mu\Gamma}^2} M_{\text{д}} - \frac{1}{T_{\mu\Gamma}} P + \frac{1}{T_{\mu\Gamma}^2 k_{\Gamma}} U_{\text{іе}}; \\ \frac{dE_{\text{зе}}}{dt} = \frac{1}{T_{\text{а}}} U_{\text{зе}} - \frac{1}{T_{\text{а}}} E_{\text{зе}}; \\ \frac{dU_{\text{ззе}}}{dt} = \frac{k_{\text{н}}}{T_{\text{а}} k_{\text{д}}} \omega_{\text{д}} - \frac{1}{T_{\text{а}}} U_{\text{ззе}}; \\ \frac{dU_{\text{іе}}}{dt} = k_{\text{іе}} E_{\text{зе}} - k_{\text{іе}} U_{\text{ззе}}. \end{array} \right. \quad (3.4)$$

При записі системи (3.4) прийняті наступні позначення.

$U_{\text{іе}}$ – напруга на виході інтегральної частини регулятора ЕРС;

P – ривок.

$k_{\text{пе}}, k_{\text{іе}}$ – коефіцієнти підсилення пропорційної і інтегральної частин регулятора ЕРС; значення указаних параметрів можуть бути отримані з виразу передатної функції регулятора ЕРС:

$$W_{\text{пе}}(p) = \frac{T_{\text{м}} k_{\Gamma}}{2T_{\mu\epsilon} k_{\text{н}} R_{\Sigma}} \cdot \frac{4T_{\mu\epsilon} p + 1}{4T_{\mu\epsilon} p} = \frac{T_{\text{м}} k_{\Gamma}}{2T_{\mu\epsilon} k_{\text{н}} R_{\Sigma}} + \frac{T_{\text{м}} k_{\Gamma}}{8T_{\mu\epsilon}^2 k_{\text{н}} R_{\Sigma}} \frac{1}{p} = k_{\text{пе}} + \frac{k_{\text{іе}}}{p},$$

$$k_{\text{пе}} = \frac{T_{\text{м}} k_{\Gamma}}{2T_{\mu\epsilon} k_{\text{н}} R_{\Sigma}}, \quad k_{\text{іе}} = \frac{T_{\text{м}} k_{\Gamma}}{8T_{\mu\epsilon}^2 k_{\text{н}} R_{\Sigma}}.$$

При записі системи (3.4) замість $T_{\text{м}}$ записано відповідний вираз

$$T_{\text{м}} = \frac{R_{\Sigma} \cdot J_{\text{д}\Sigma}}{c^2} = R_{\Sigma} J_{\text{д}\Sigma} \cdot k_{\text{д}}^2; \quad k_{\text{д}} = 1/c.$$

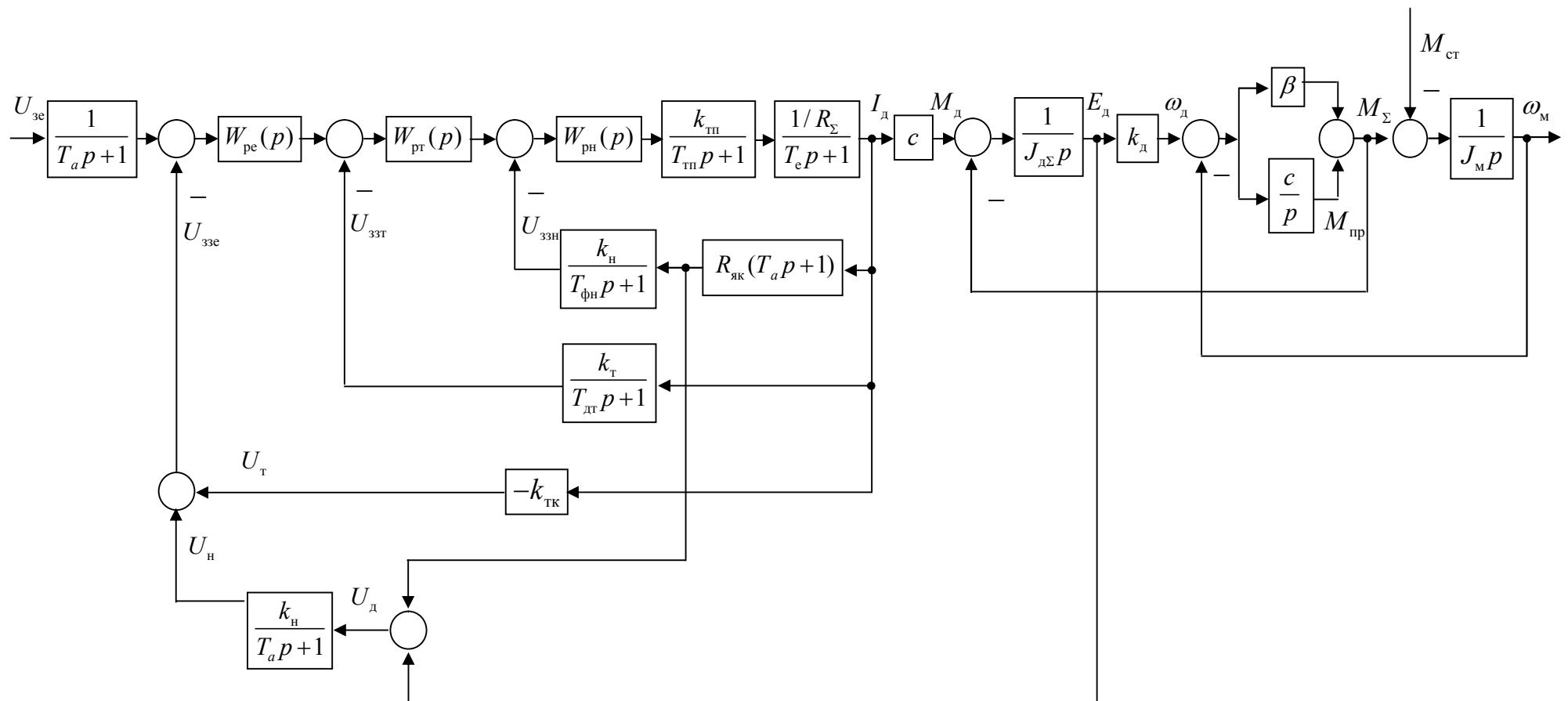


Рисунок 3.3 – Алгоритмічна схема двомасової системи

Об'єднаємо системи (3.3) і (3.4), одержимо наступну систему рівнянь стану двомасової системи підлеглого регулювання швидкості із зворотним зв'язком по ЕРС двигуна:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} = \frac{1}{J_{\text{м}}} M_{\text{пр}} + \frac{\beta}{J_{\text{м}}} \omega_{\text{д}} - \frac{\beta}{J_{\text{м}}} \omega_{\text{м}} - \frac{1}{J_{\text{м}}} M_{\text{ст}}; \frac{dM_{\text{пр}}}{dt} = c_{12} \omega_{\text{д}} - c_{12} \omega_{\text{м}}; \\ \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{1}{J_{\text{д}\Sigma}} M_{\text{д}} - \frac{1}{J_{\text{д}\Sigma}} M_{\text{пр}} - \frac{\beta}{J_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{д}} - \frac{\beta}{J_{\text{д}\Sigma}} \omega_{\text{м}}; \\ \frac{dM_{\text{д}}}{dt} = \frac{1}{k_{\text{д}}} P; \\ \frac{dP}{dt} = \frac{k_{\text{пе}}}{2T_{\mu\Gamma}^2 k_{\Gamma}} E_{\text{зе}} - \frac{k_{\text{пе}}}{2T_{\mu\Gamma}^2 k_{\Gamma}} U_{\text{ззе}} - \frac{k_{\text{д}}}{2T_{\mu\Gamma}^2} M_{\text{д}} - \frac{1}{T_{\mu\Gamma}} P + \frac{1}{T_{\mu\Gamma}^2 k_{\Gamma}} U_{\text{іе}}; \\ \frac{dE_{\text{зе}}}{dt} = \frac{1}{T_{\text{а}}} U_{\text{зе}} - \frac{1}{T_{\text{а}}} E_{\text{зе}}; \\ \frac{dU_{\text{ззе}}}{dt} = \frac{k_{\text{н}}}{T_{\text{а}} k_{\text{д}}} \omega_{\text{д}} - \frac{1}{T_{\text{а}}} U_{\text{ззе}}; \\ \frac{dU_{\text{іе}}}{dt} = k_{\text{іе}} E_{\text{зе}} - k_{\text{іе}} U_{\text{ззе}}. \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Алгоритмічна схема двомасової системи, яка відповідає рівнянням (3.5), зображена на рисунку (3.4). У цій схемі оптимізований контур струму відображений як послідовне з'єднання аперіодичної і інтегруючої ланки, які обидві охоплені одиничним зворотнім зв'язком. Сигнал на виході першої ланки пропорційний прискоренню електроприводу P .

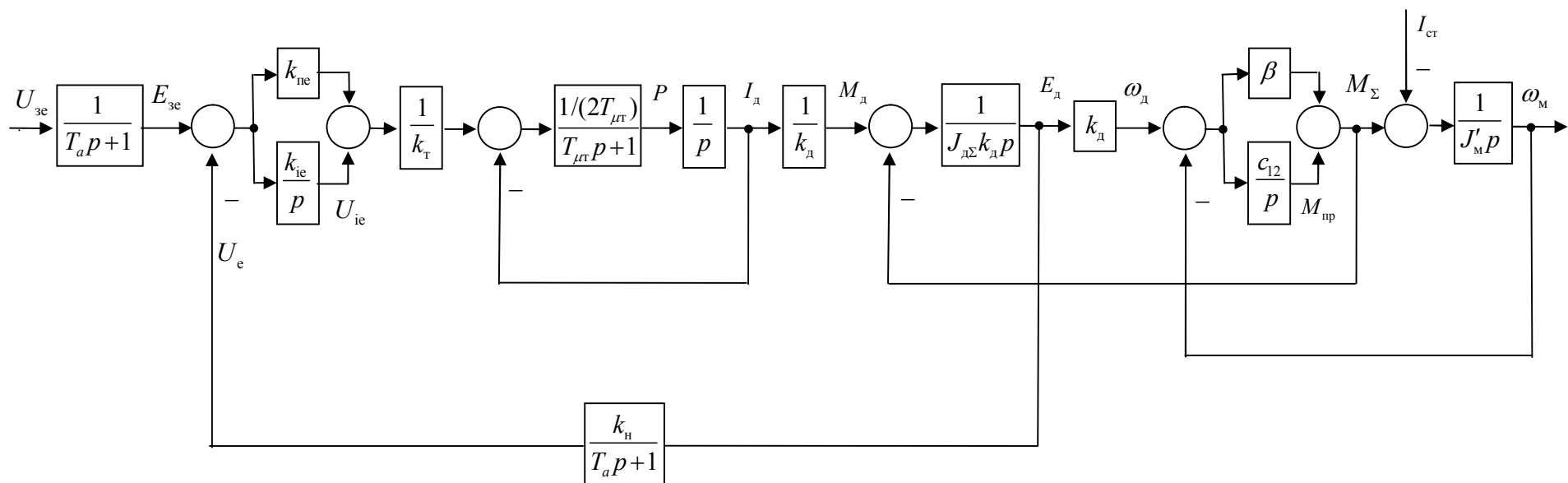


Рисунок 3.4 – Спрощена алгоритмічна схема двомасової системи

Запишемо результуючу систему у векторному – матричній формі, доповнивши її рівнянням виходу системи.

Введемо вектор стану системи $\vec{X}(t)$ і вектор управління $\vec{U}(t)$

$$\vec{X}(t) = \{ \omega_m(t), M_{\text{пр}}(t), \omega_d(t), M_d(t), P(t), E_{\text{зе}}(t), U_{\text{зе}}(t), U_{\text{іе}}(t) \}^T,$$

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

де T – знак транспонування.

Рівняння стану системи і рівняння виходу має вигляд

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

де $\mathbf{A}$ – матриця стану;

$\mathbf{B}$ – матриця управління;

$\mathbf{C}$ – матриця виходу;

$\vec{Y}(t)$ – вектор виходу.

Матриці стану $\mathbf{A}$ і управління $\mathbf{B}$ мають вид, показаний нижче.

Матриці стану **A** і управління **B**

$$\mathbf{A} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} \omega_{\text{м}} & M_{\text{пр}} & \omega_{\text{д}} & M_{\text{д}} & P & E_{\text{зе}} & U_{\text{ззе}} & U_{\text{іе}} \end{array} \\ \left| \begin{array}{cccccccc} -\frac{\beta}{J_{\text{м}}} & \frac{1}{J_{\text{м}}} & \frac{\beta}{J_{\text{м}}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c & & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta}{J_{\text{д}}} & -\frac{1}{J_{\text{д}}} & -\frac{\beta}{J_{\text{д}}} & \frac{1}{J_{\text{д}}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{k_{\text{д}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{k_{\text{д}}}{2T_{\text{мт}}^2} & -\frac{1}{T_{\text{мт}}} & \frac{k_{\text{пе}}}{2T_{\text{мт}}^2 k_{\text{т}}} & -\frac{k_{\text{пе}}}{2T_{\text{мт}}^2 K_{\text{т}}} & \frac{1}{2T_{\text{мт}}^2 k_{\text{т}}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_{\text{н}}}{T_a K_{\text{д}}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_a} & 0 \\ 0 & & 0 & 0 & 0 & k_{\text{іс}} & -k_{\text{іс}} & 0 \end{array} \right| \end{array}$$

$$\mathbf{B} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} U_{\text{зе}} & M_{\text{ст}} \end{array} \\ \left| \begin{array}{cc} 0 & -\frac{1}{J_{\text{м}}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{T_a} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right| \end{array}$$

3.3 Розрахунок перехідних процесів двомасової системи

Сумарний момент інерції двигуна і жорстко пов'язаних з ним елементів системи приймаємо $J_{\Sigma} = 1,2J_d = 1,2 \cdot 16,25 = 19,56 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Момент інерції вантажу визначаємо як

$$J_m = \frac{(G_{\text{вп}} + m_0) \cdot V_{\text{п}}^2}{\omega_{\text{н}}^2},$$

$$J_m = \frac{(51000 + 1000) \cdot 0,15^2}{56,55^2} = 0,36 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Значення інших параметрів системи визначені в попередніх розділах.

Розрахунок перехідних процесів проводився з використанням пакету прикладних програм MATLAB. Дана система дозволяє проводити розрахунок перехідних процесів по передавальних функціях системи, по векторно-матричному рівнянню, з використанням схеми моделі системи, показаної на рис. 3.5.

У додатку А приведений текст програми розрахунку, в якому містяться початкові дані, матриці **A**, **B** і **C** одномасової і двомасової системи, а також записаний ряд інших команд, про які мова йтиме далі.

Графіки перехідних процесів двомасової системи показані на рис. 3.6-3.9. Для зменшення інформації, що виводиться, на ЕОМ були виведені на екран монітора, і відповідно роздруковані перші чотири змінні стану. Як видно з графіків характер перехідних процесів швидкості механізму (вантаж) і моменту пружності по задаючій дії і перехідні процеси всіх змінних стану по збурюючій дії мають характер слабо затухаючих коливань.

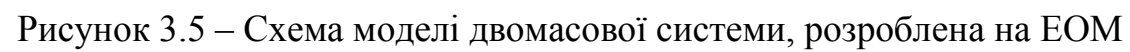
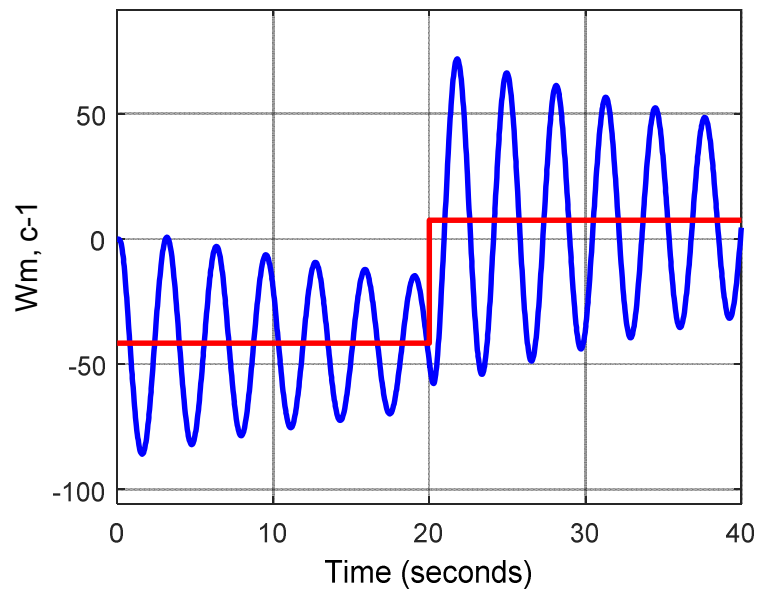
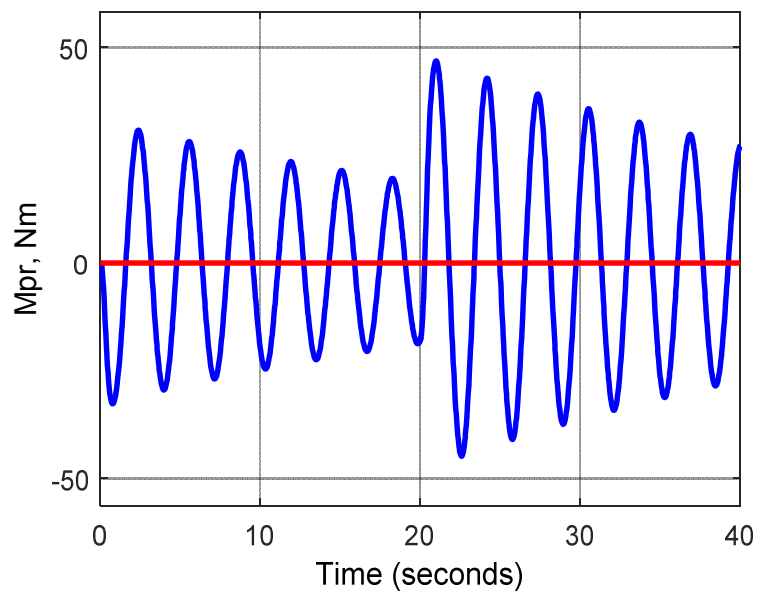


Рисунок 3.5 – Схема моделі двомасової системи, розроблена на ЕОМ



a)



б)

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

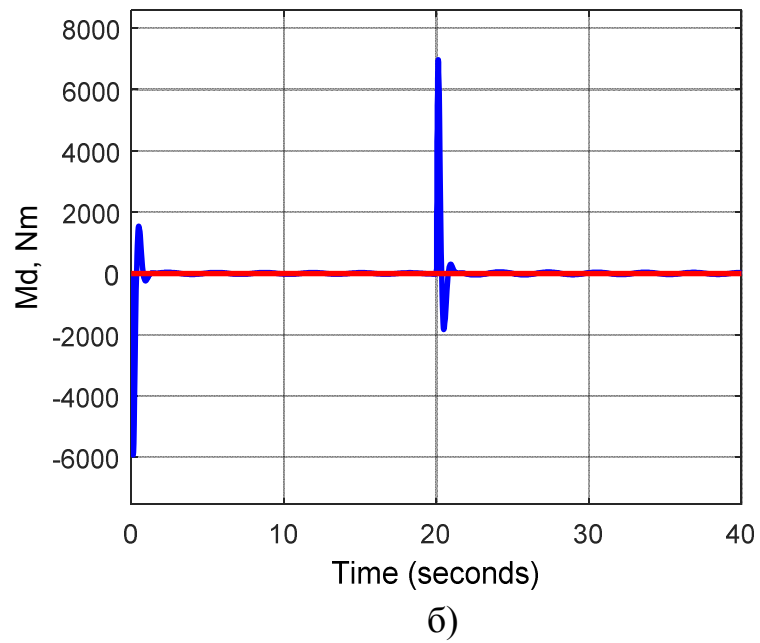
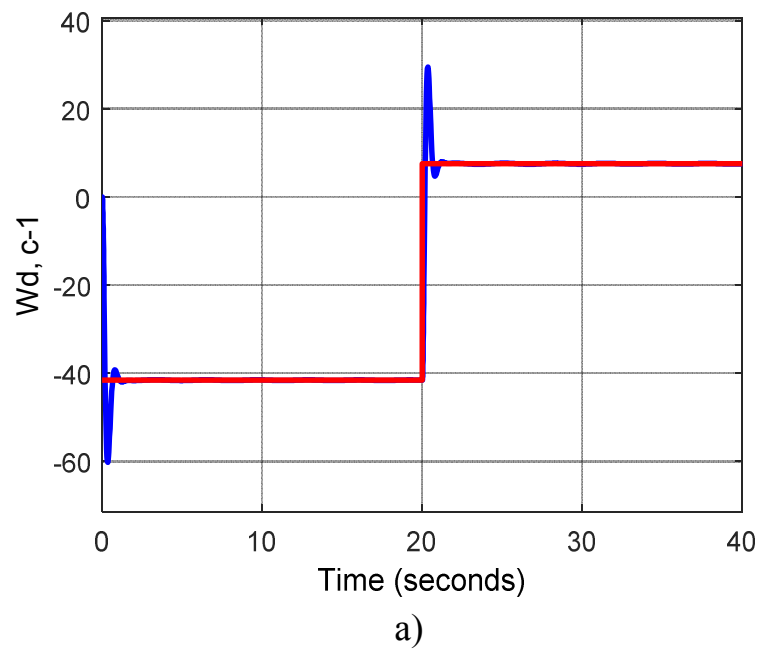


Рисунок 3.7 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і моменту двигуна $M_d = f(t)$ (б) двомасової системи по задаючій дії

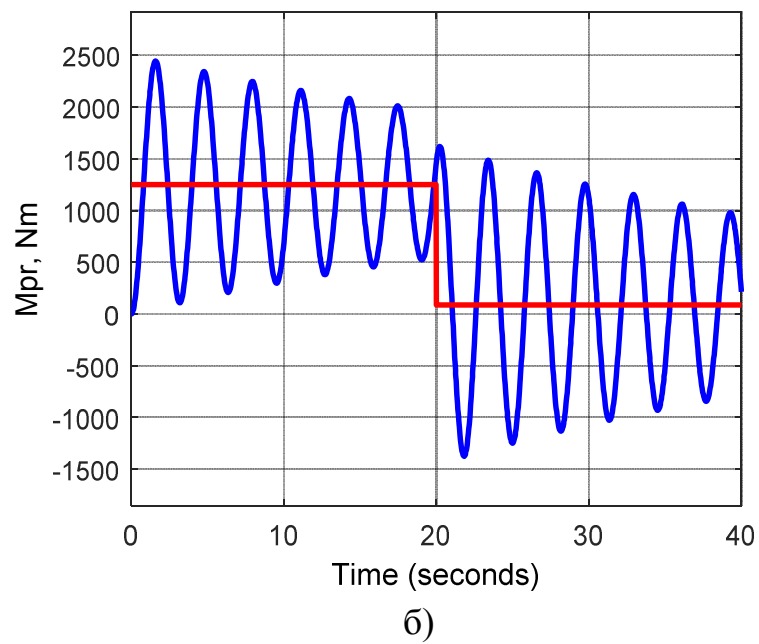
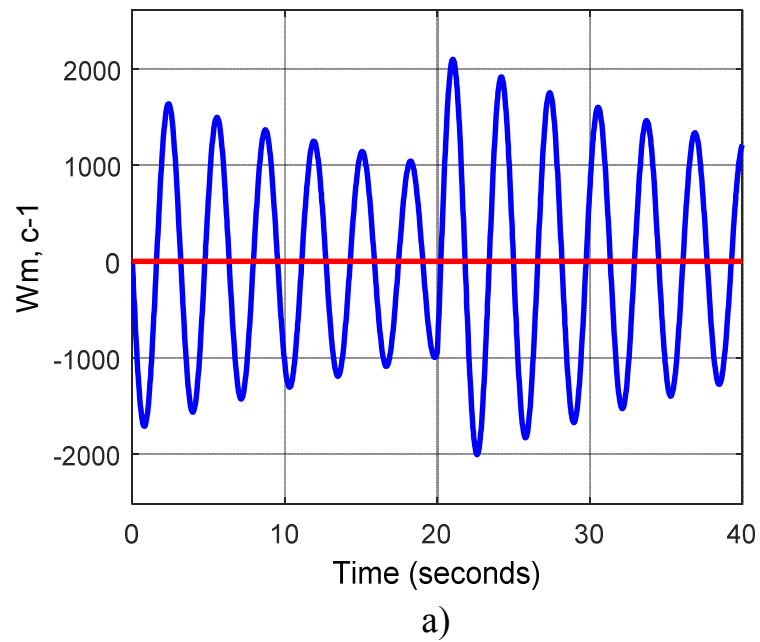


Рисунок 3.8 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{пр} = f(t)$ (б) двомасової системи по збурюючій дії

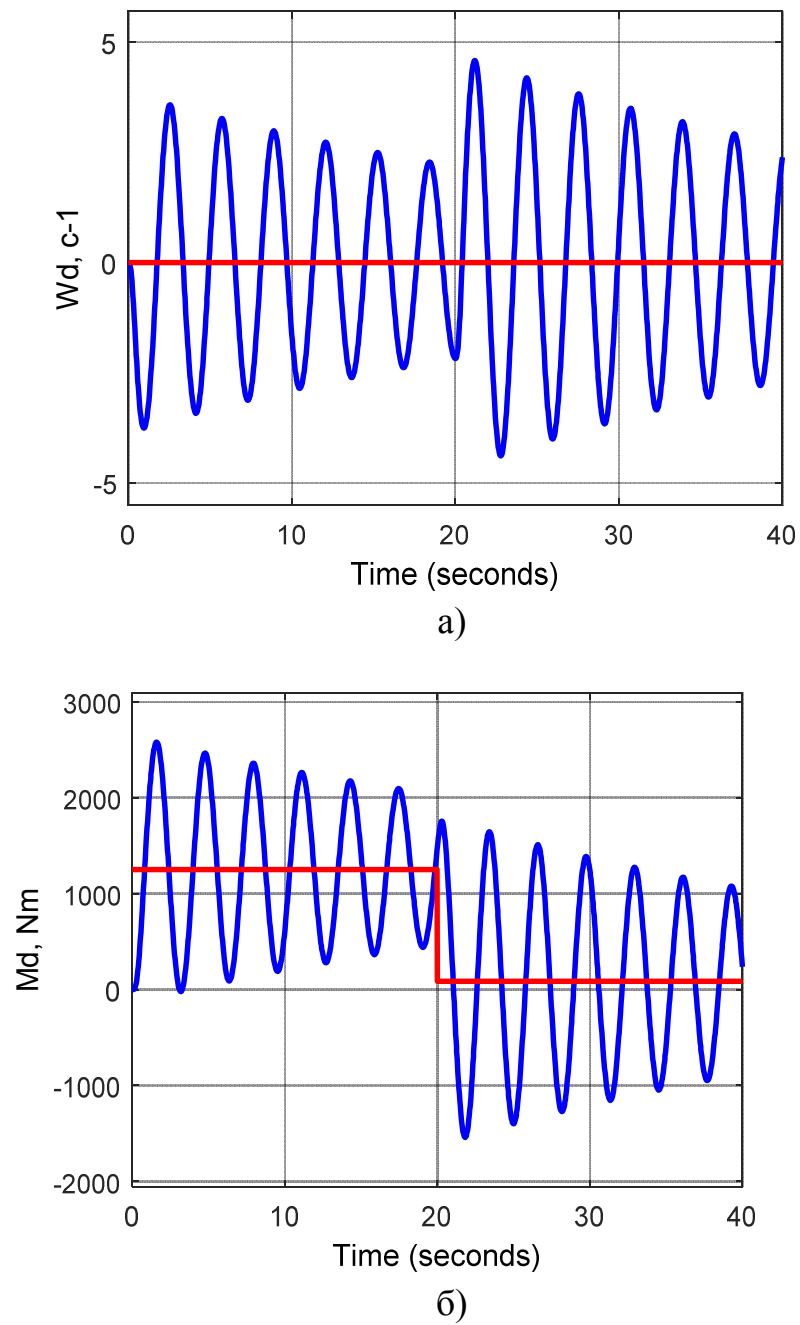


Рисунок 3.9– Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і моменту двигуна $M_d = f(t)$ (б) двомасової системи по збурюючій дії

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Проведено аналіз функціонування механізму підйому мостового крана, враховуючи кінцеву жорсткість підйомного канату. Розглянута кінематична структура електроприводу цього механізму, вказавши, що в загальному випадку його механічна частина складається зі зв'язаних мас, які рухаються з різними швидкостями, будь то обертально або поступально. Під час навантаження ці елементи піддаються деформації через не абсолютно жорсткі механічні зв'язки. При змінах навантаження маси можуть переміщуватись взаємно, що визначається жорсткістю зв'язку при певному зростанні навантаження. Дослідження динаміки роботи електроприводу механізму підняття показали, що під час аналізу механічних схем в розрахунках виділення головних мас і жорсткостей дозволяє звести їх до трьохмасових або двомасових моделей. Використання електромеханічної системи з двомасовою пружною механічною частиною представляє собою просту модель електроприводу, яка є найзручнішою для дослідження впливу пружних механічних зв'язків, тому ця модель є основним об'єктом у проведенні досліджень.

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 $+24B$ до $-24B$, 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 входних лінгвістичних змінних можна використовувати. помилку регулювання $\varepsilon(t)$: ε – "помилка регулювання", а у якості другої входної лінгвістичної змінної $M_{пр}$ – "момент пружності". Як вихідна лінгвістична змінна використовується напруга на виході регулятора $U(t)$, що алгебраїчно підсумовується з напругою завдання і діє на систему управління: U – "напруга регулятора".

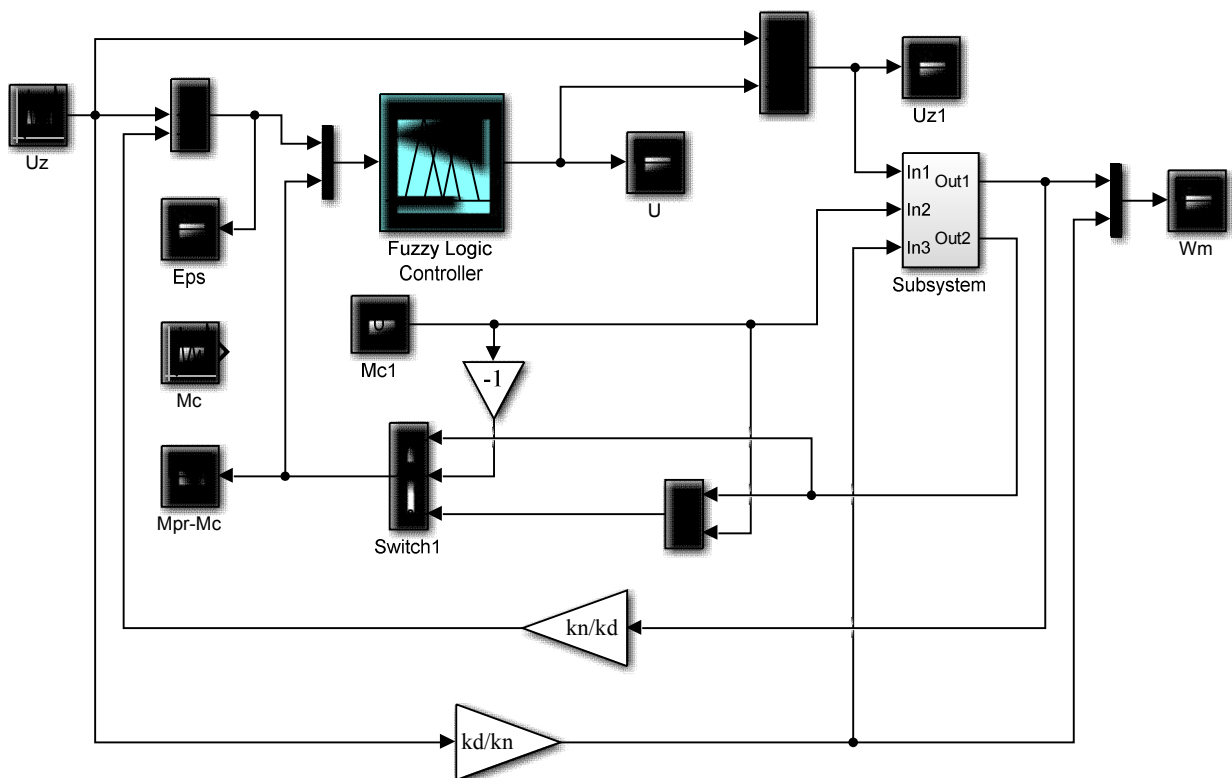


Рисунок 4.1 – Схема системи з Fuzzy регулятором

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

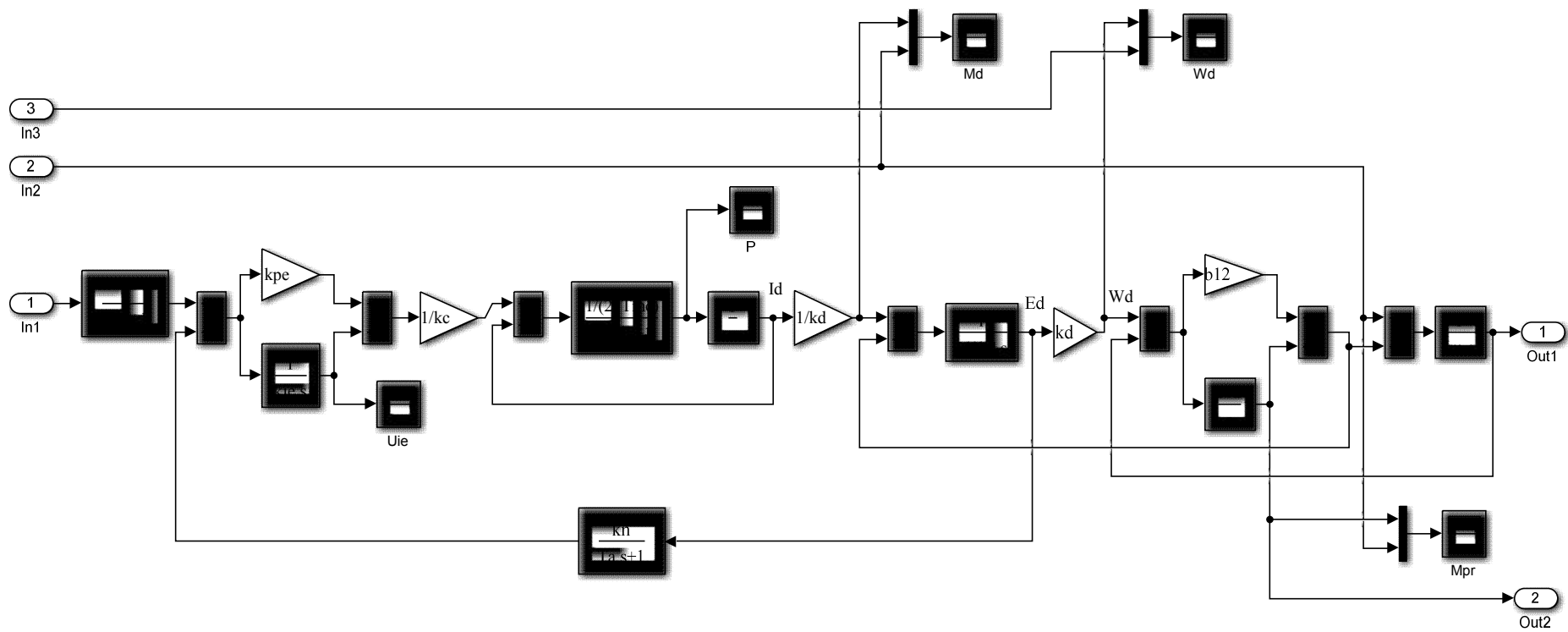


Рисунок 4.2 – Схема моделі об'єкту управління

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.

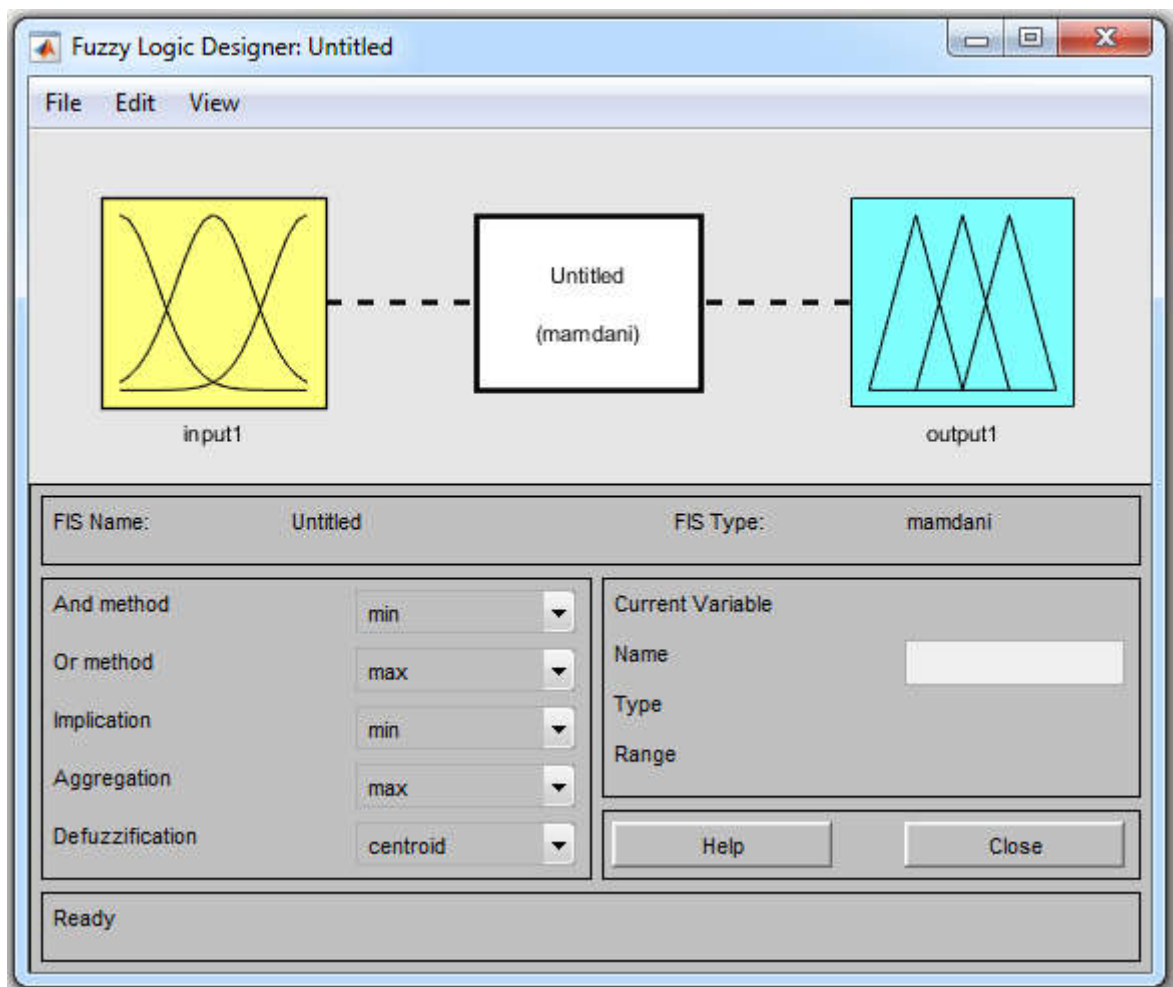


Рисунок 4.3 – Вид вікна FIS Editor

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

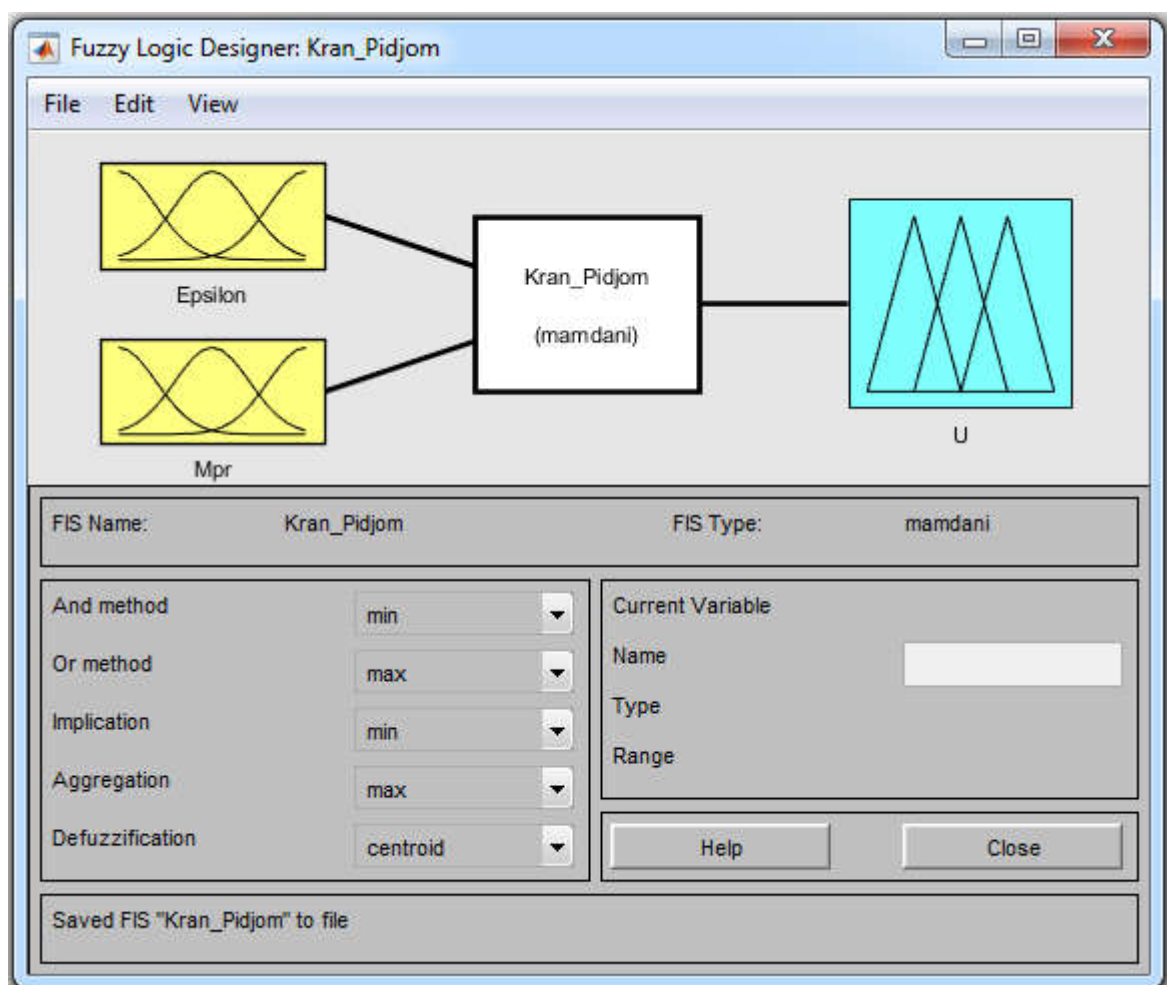


Рисунок 4.4 – Вид вікна FIS Editor після завдання структури системи

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).

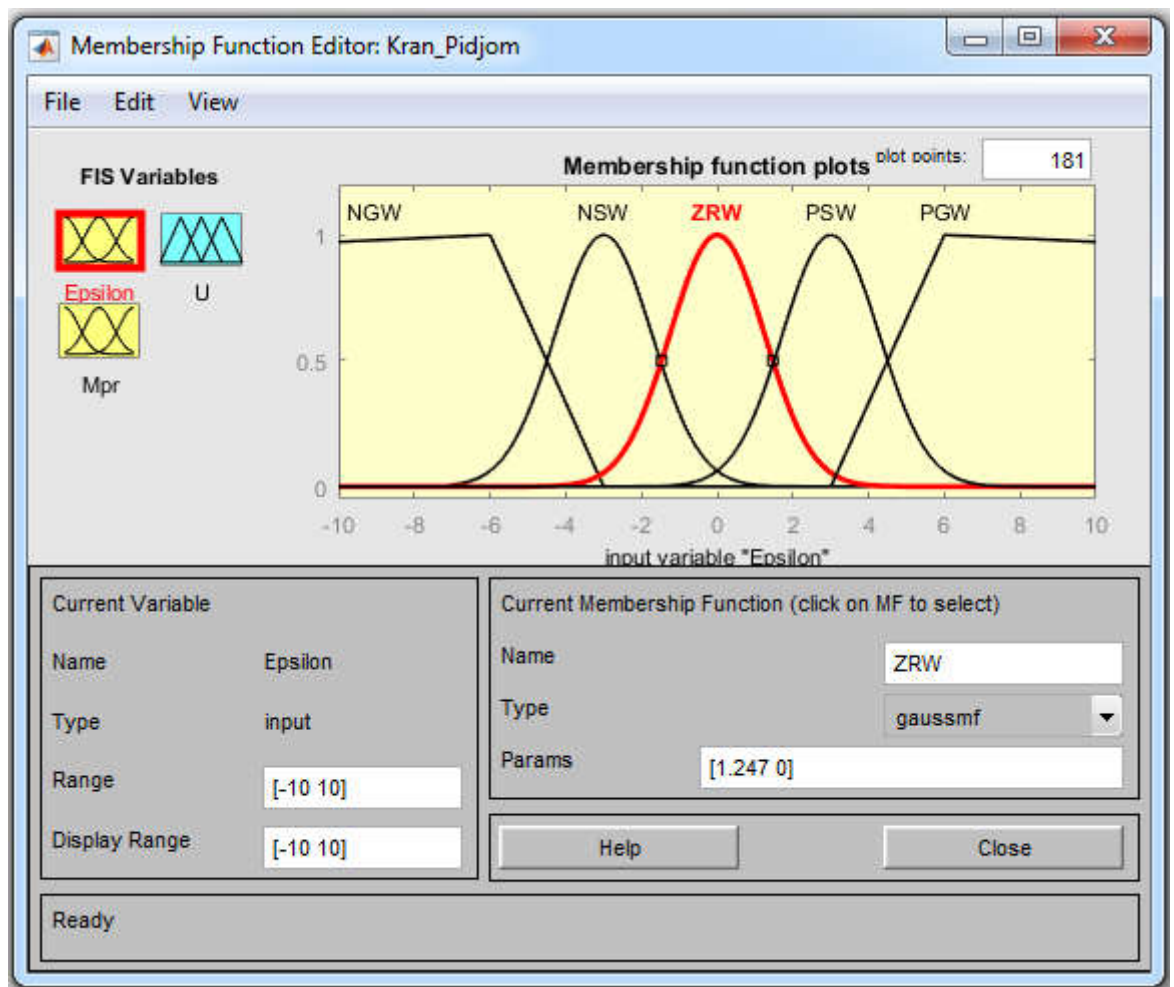


Рисунок 4.5 – Функції приналежності змінної «Epsilon»
(помилка регулювання $\varepsilon(t)$)

Спочатку встановимо діапазон зміни та відображення змінної у полях Range і Display Range від -10 до +10, 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).

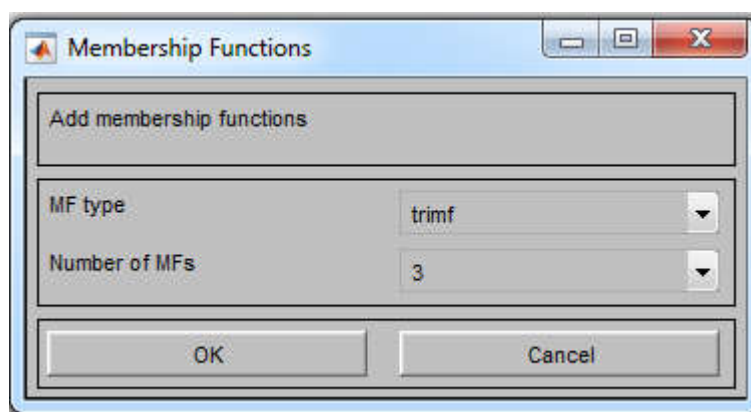


Рисунок 4.6 – Вид вікна завдання типа і кількості функцій приналежності

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 -60 до +60, 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).

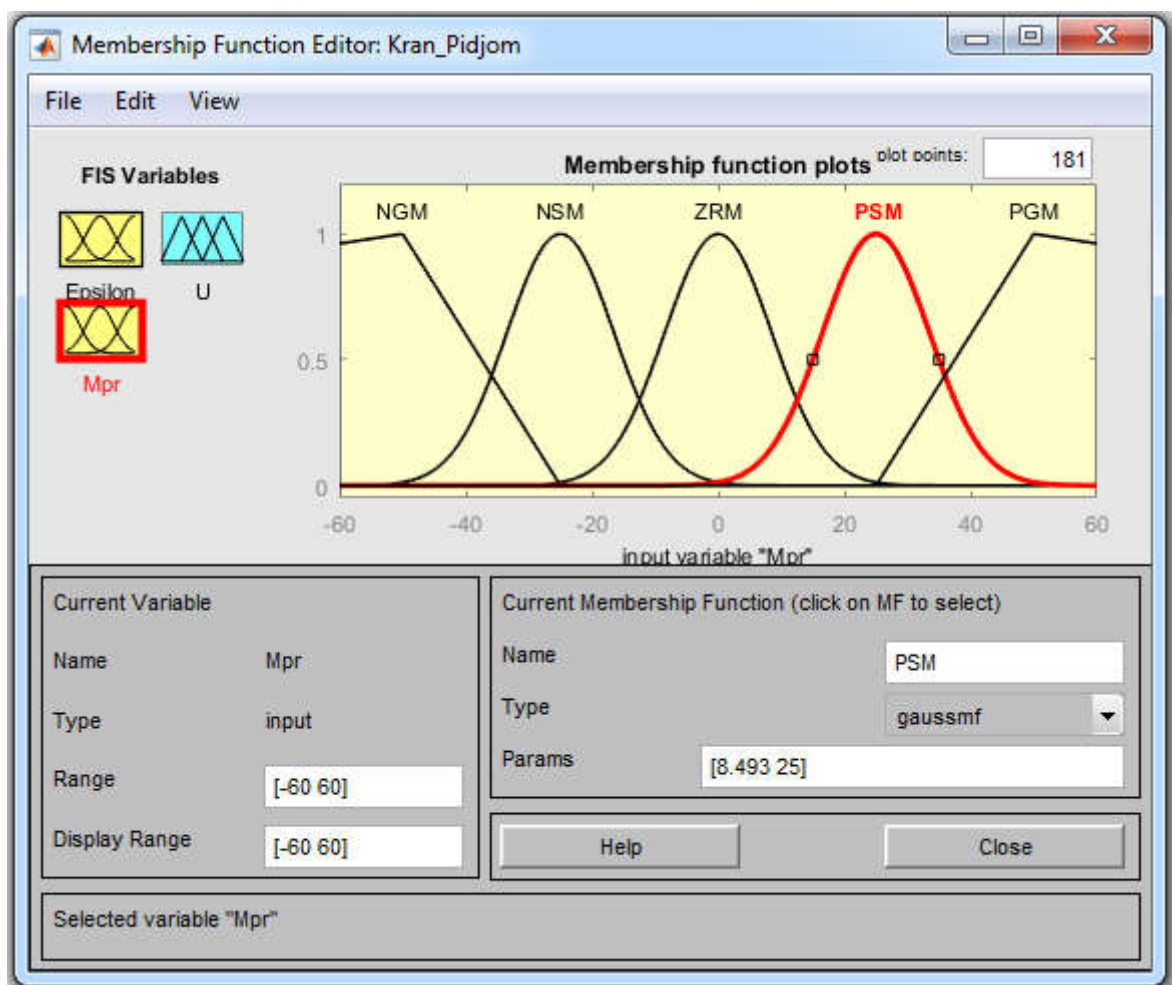


Рисунок 4.7 – Функції приналежності змінної «Mpr» ($M_{np}(t)$)

Для вихідної змінної U ($U(t)$) спочатку встановимо діапазон зміни (від -5 до +5), 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.

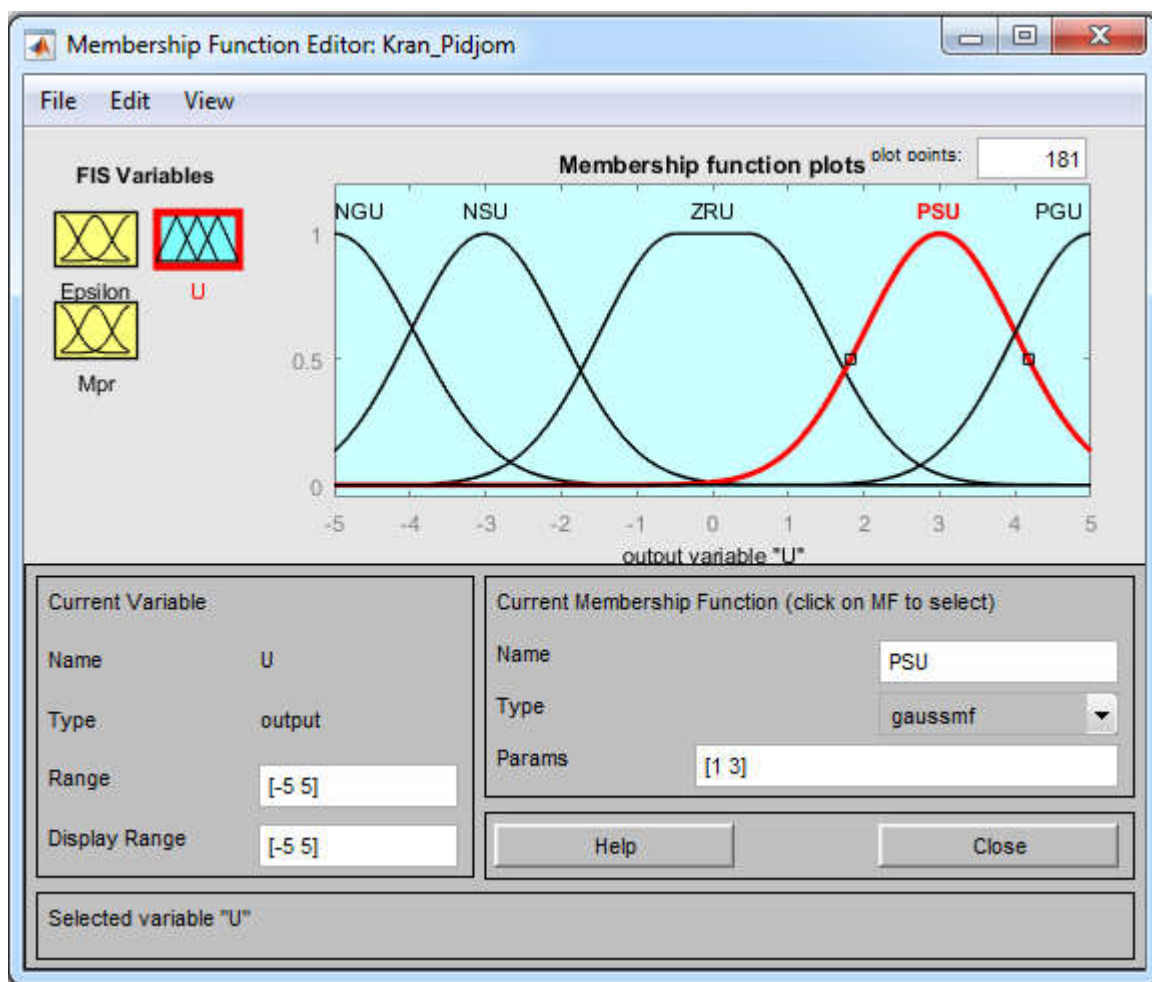


Рисунок 4.8 – Функції приналежності «U» (вихідної змінної $U(t)$)

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

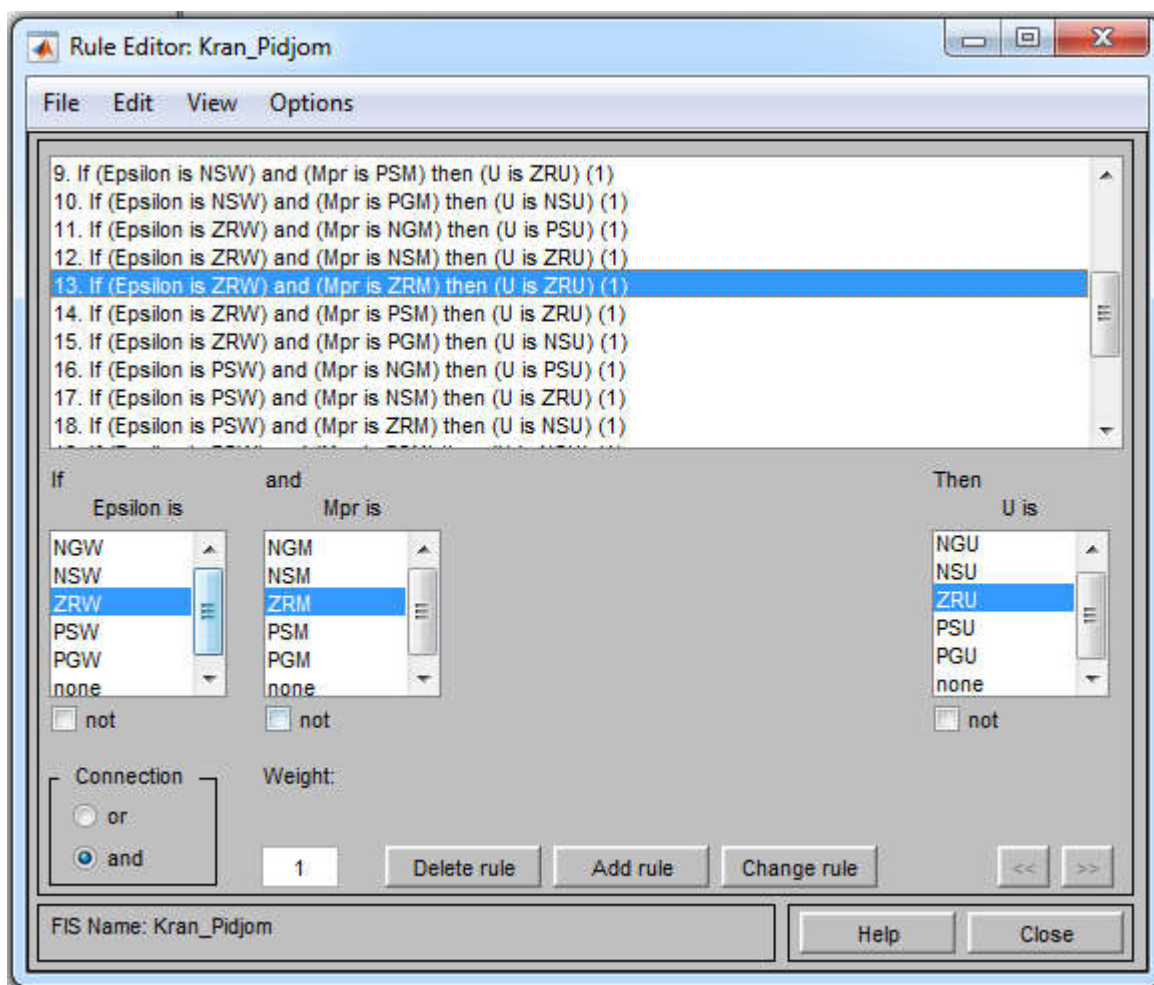


Рисунок 4.9 – Вікно редактора правил

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) та "Mpr" (момент пружності $M_{\text{пр}}(t)$), а у лівій – функції належності змінної виходу "U" ($U(t)$) з поясненням механізму ухвалення рішення.

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

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

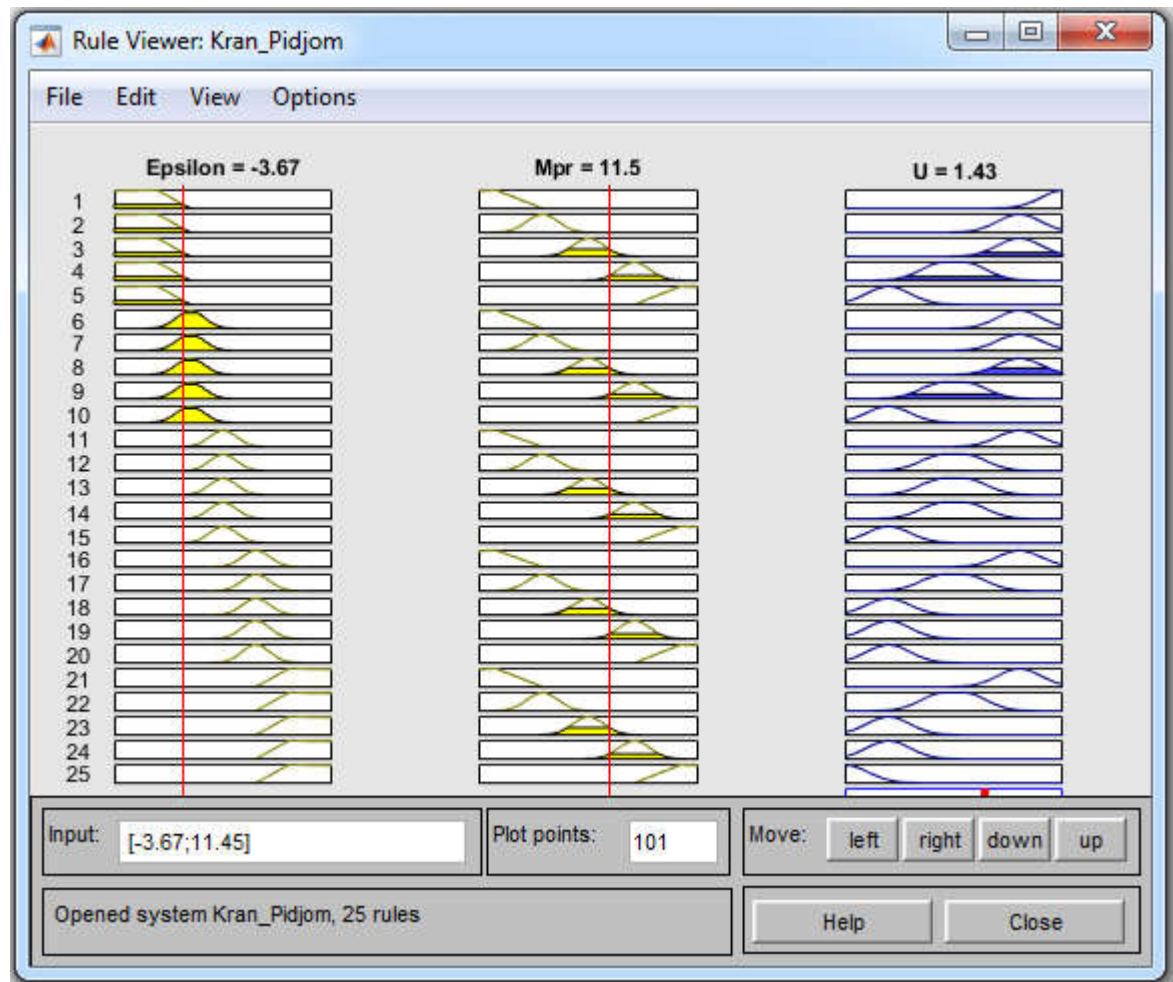


Рисунок 4.10 – Вікно перегляду правил

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

У відкритому вікні, змінюючи назви змінних у полях введення (X (input) та Y (input)), можна налаштовувати і спостерігати одновимірні залежності, наприклад, $U(U(t))$ від моменту пружності $Mpr(M_{np}(t))$ (рис. 4.12).

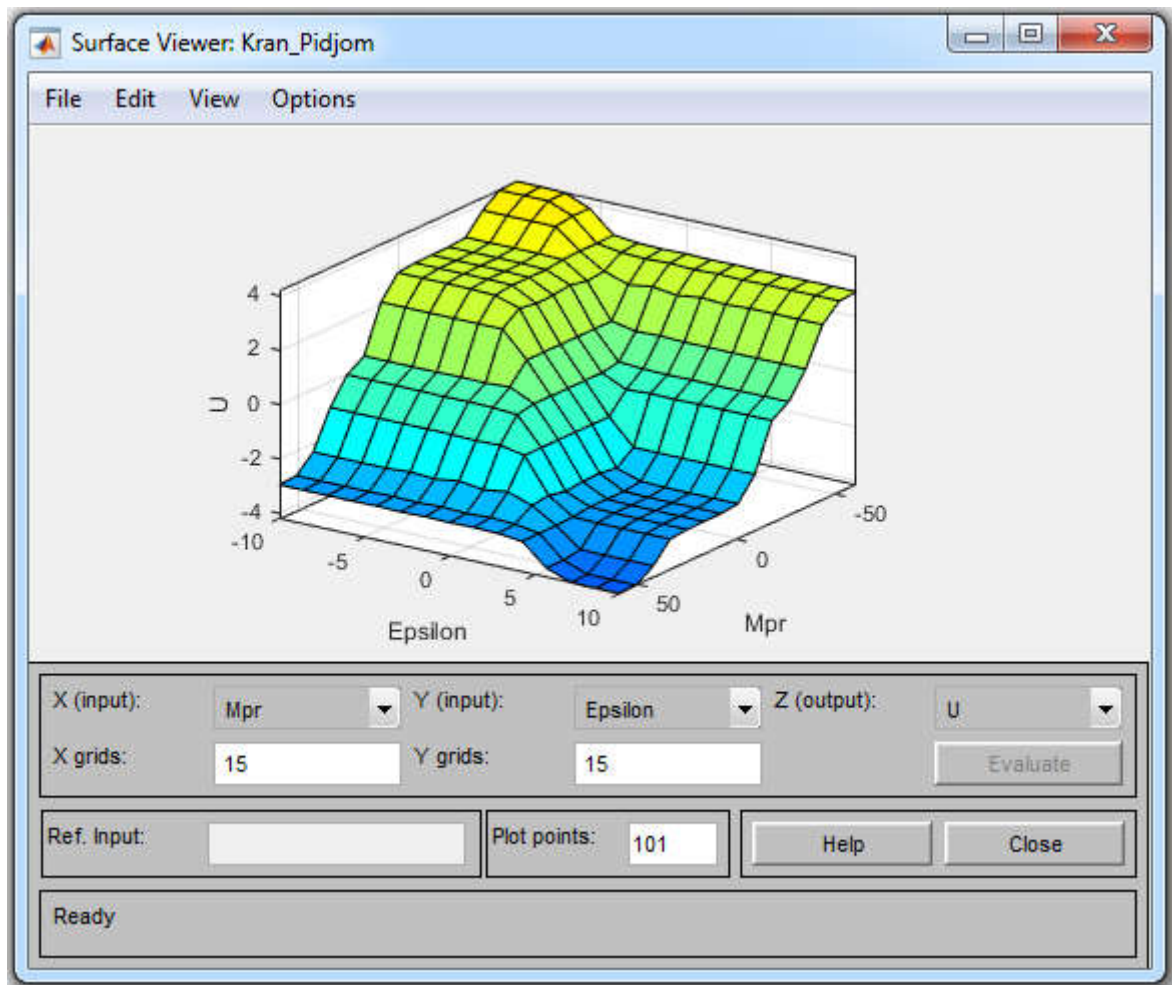


Рисунок 4.11 – Графічний вид залежності вихідної змінної від вхідних

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.

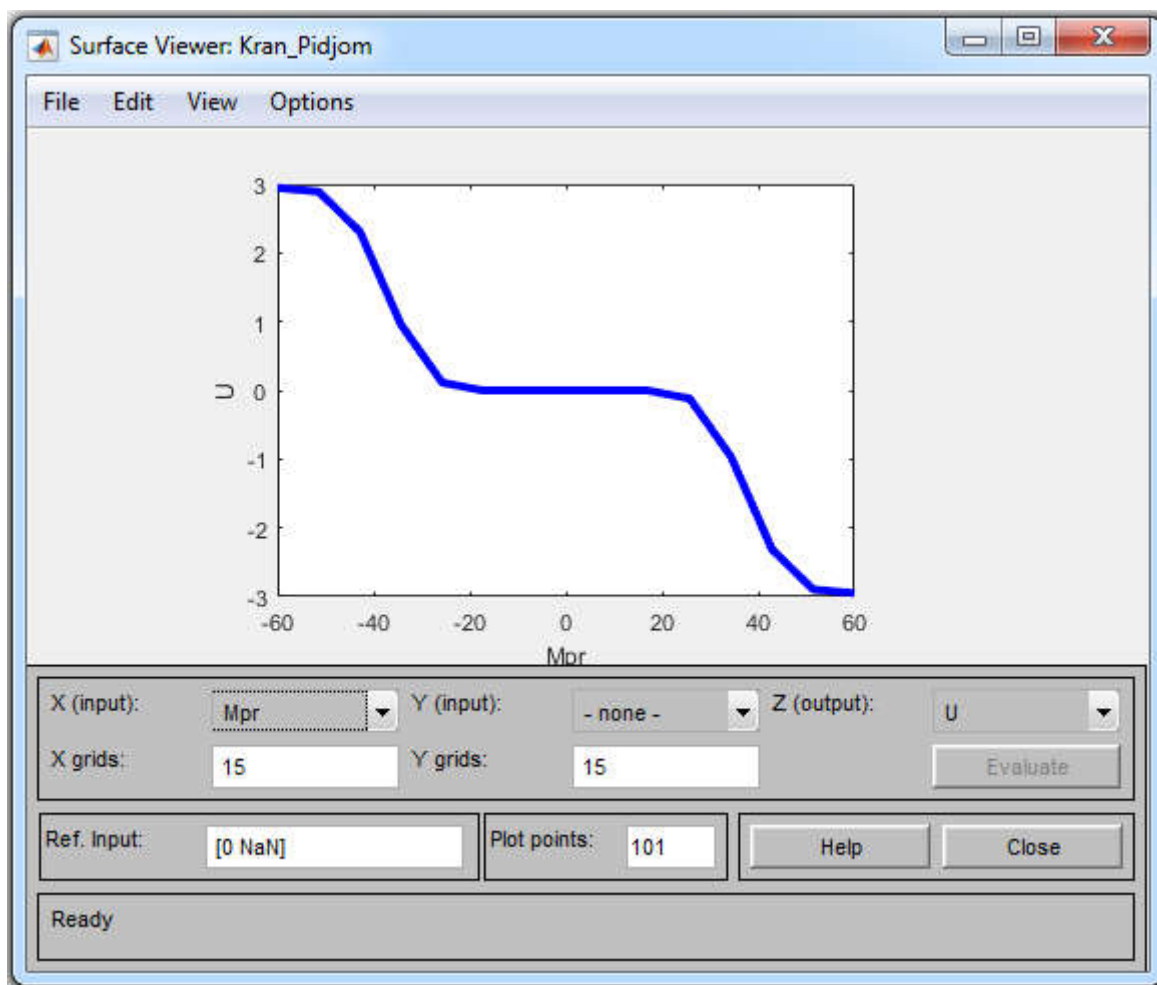


Рисунок 4.12 – Одновимірний залежність вихідної змінної U ($U(t)$) від вхідної – моменту пружності Mpr ($M_{np}(t)$)

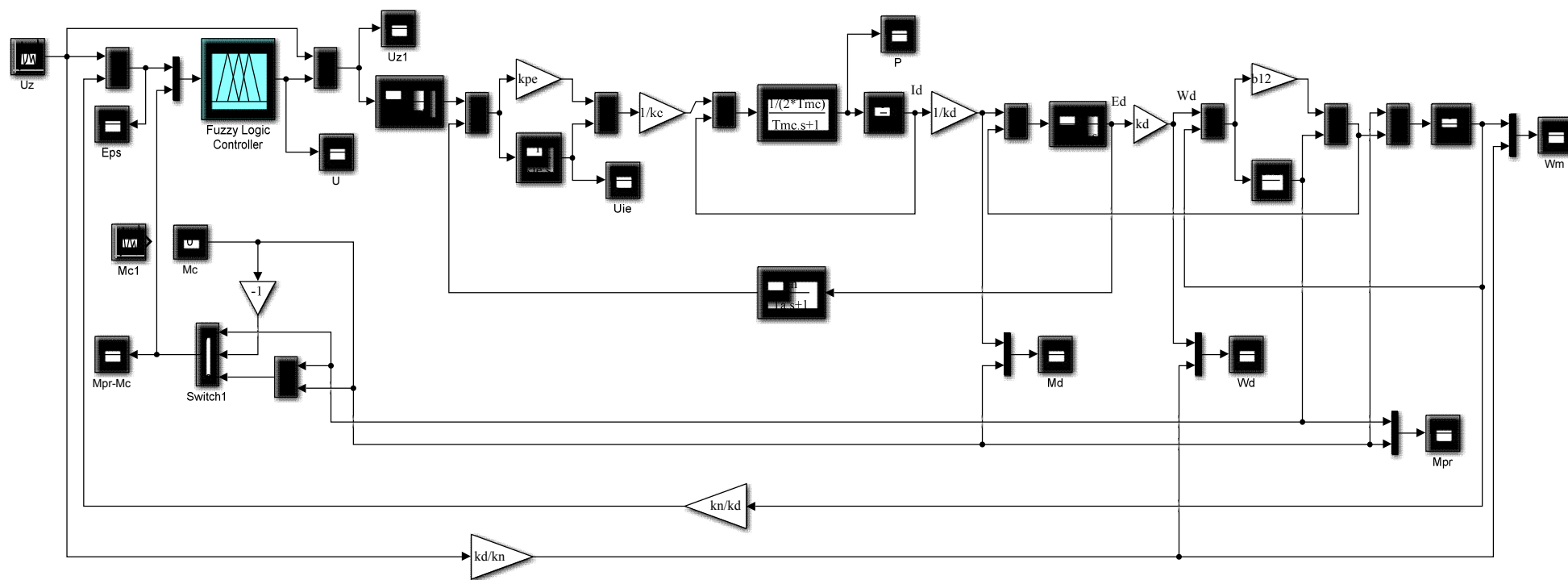


Рисунок 4.13 – Схема моделі двомасової системи з Fuzzy регулятором

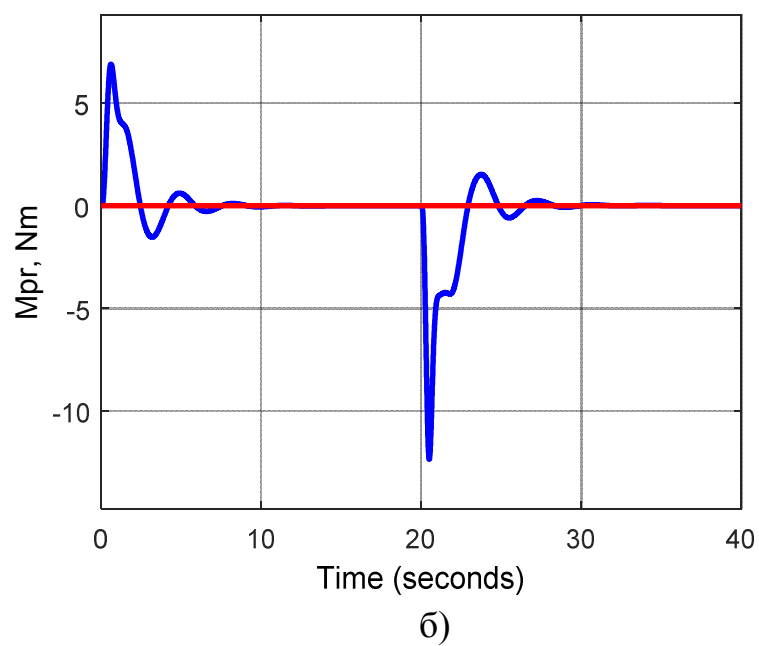
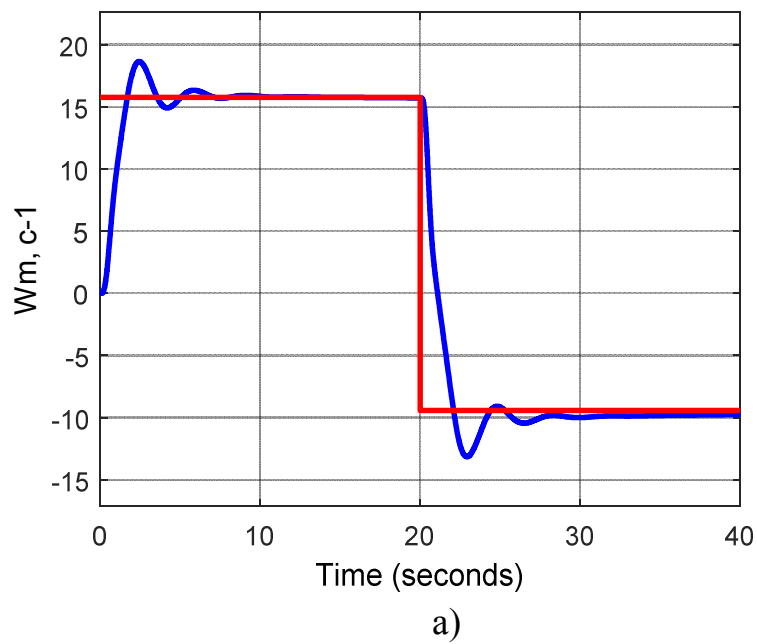


Рисунок 4.14 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{\text{пр}} = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по задаючій дії

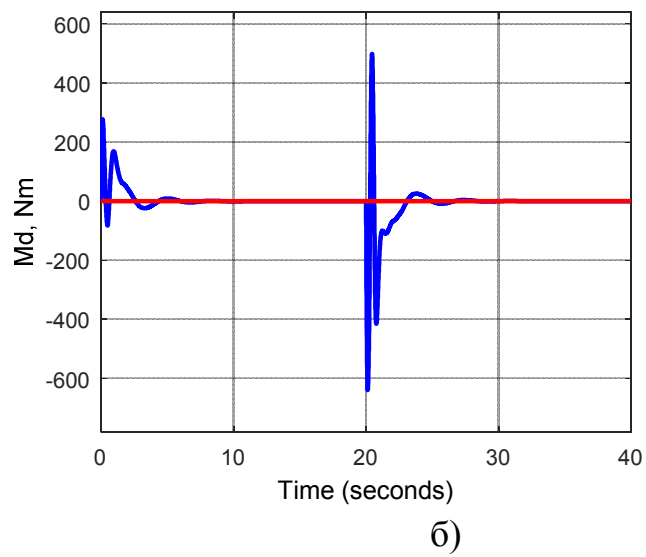
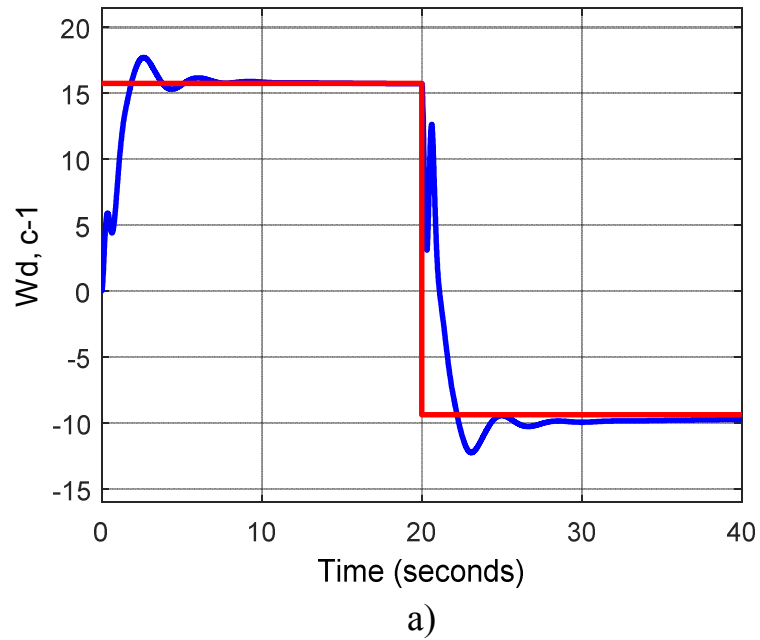
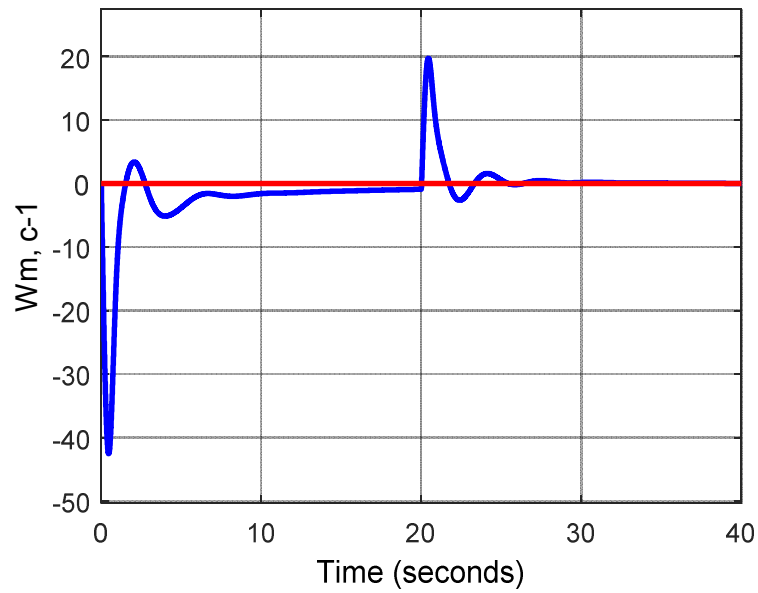
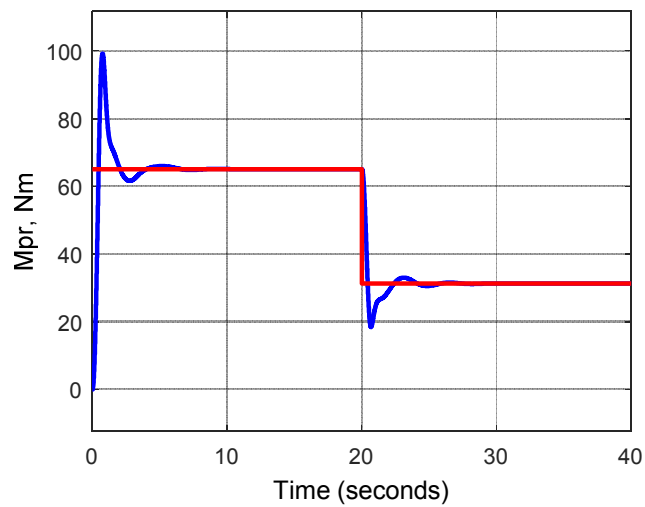


Рисунок 4.15 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і моменту двигуна $M_d = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по задаючій дії



а)



б)

Рисунок 4.16 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{\text{пр}} = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по збурюючій дії

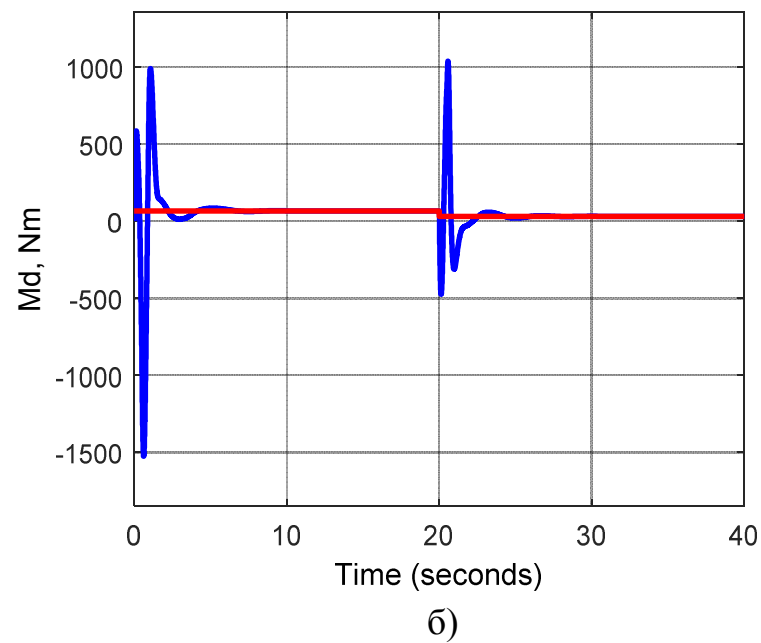
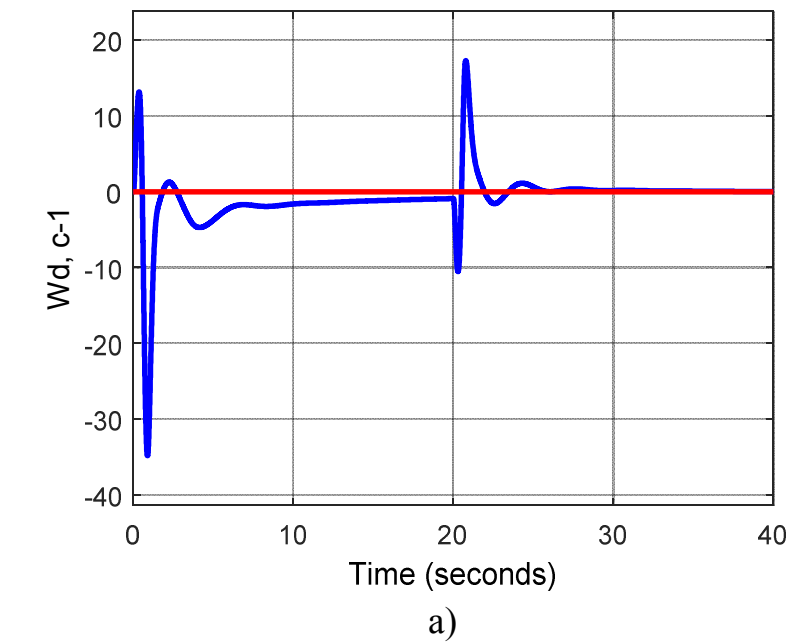


Рисунок 4.17 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і моменту двигуна $M_d = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по збурюючій дії

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

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

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

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

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

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

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

6. Проведено моделювання нечіткої системи з синтезованим Fuzzy регулятором. Аналіз результатів моделювання підтвердив, що перехідні процеси зміни стану системи у замкнутій системі з Fuzzy регулятором під час запуску та накиді навантаженні мають задовільну динаміку. Перерегулювання не перевершує 15%, час перехідного процесу складає 7 секунд, що відповідає завданню.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача розробки нечіткої системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму підйому мостового крана, що забезпечує високу якість регулювання.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. В результаті аналізу систем управління основних механізмів мостових кранів, 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 підйому.

2. На підставі аналізу вимог до систем електроприводів основних механізмів мостових кранів для електроприводу механізму підйому вибраний електропривод постійного струму, виконаний за системою ТП–Д. Виконано вибір електродвигуна і основного електроустаткування силового ланцюга електроприводу.

3. Проведений вибір структури і розрахунок системи автоматичного управління параметрами електроприводу. Для управління координатами електроприводу застосована система підлеглого регулювання з внутрішнім контуром струму і зовнішнім контуром ЕРС. Для поліпшення динамічних характеристик системи при роботі в режимі переривистих струмів в контур струму включений внутрішній контур напруги тиристорного перетворювача. Виконано розрахунок параметрів силового ланцюга електроприводу, що використовуються при розрахунку системи автоматичного управління. Проведений синтез послідовних коректуючи пристроїв контурів, з оптимізацією контура струму по модульному критерію, а контура ЕРС – по симетричному критерію. Проведено моделювання системи на ЕОМ з використанням пакету прокладних програм MATLAB. Система є астатичною як по задаючій, так і по збурюючій дії. Перерегулювання швидкості по задаючій дії в системі з фільтром на вході дорівнює 8,1%.

4. Розроблена математична модель двомасової системи, що враховує пружні властивості підіймального канату. Проведено комп'ютерне моделювання системи. Дослідження показали, що в такій двомасовій системі перехідні процеси основних координат характеризуються великими 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 підтвердив, що перехідні процеси зміни стану системи у замкнутій системі з Fuzzy регулятором під час запуску та накиді навантаження мають задовільну динаміку. Перерегулювання не перевершує 15%, час перехідного процесу складає 7 секунд, що відповідає завданню..

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технології нейронних мереж і нечіткого моделювання в системах управління: підруч. для здобувачів вищої освіти спец. 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Г.І. Канюк, Б.І. Кузнецов, Т.Ю. Василець, А.Ю. Мезеря, О.О. 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. 62. Dubois D. and H. Pride, Unfair coins and necessity measures: Towards a possibilistic interpretation of histograms. Fuzzy Sets and Systems, 10, No. 1, 1983.
16. Dubois D., Prade H. Fuzzy Numbers, on Overview // Analysis of Fuzzy Information (Mathematics). GRC Press, 1988. P. 3–39.
17. M. Sugeno. Theory of fuzzy integrals and its applications. PhD thesis, Tokyo Institute of Technology, 1974.
18. M. Sugeno. Fuzzy measures and fuzzy integrals: a survey. In M.M Gupta, G.N Saridis, and B.R Gains, editors,Fuzzy automata and decision processes, pages 89-102. North Holland, Amsterdam, 1977.
19. M. Sugeno. An introductory survey on fuzzy control. Information Sciences, 36:59-83, 1985.
20. Bezdek J. C. A convergence theorem for the fuzzy ISODATA clustering algorithm. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Mashine Intelligence, vol. 2, No.1, 1980, pp. 1–8.
21. Bezdek J.C. Some recent applications of fuzzy c-means in pattern recognition and image processing. – IEEE Workshop Lang. Autom, 1983, pp. 247–252.
22. Р. Р. Ягера. Нечёткие множества и теория возможностей. – М., Радио и связь, 1986. - 408 с.
- 23.Mamdani E. H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. – IEEE Transactions on Computers, vol. 26, no. 12, 1977, pp. N82–1191.

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

36. Yasunobu S., and Hasegawa T. Predictive fuzzy control and its applications for automatic container crane operation system, in Proc. 2nd. IFSA Congress, Tokyo, Japan, Julie 1987.
37. F. Fujitec, FLEX-8800 series elevator group control system, Fujitec Co., Ltd., Osaka, Japan, 1988.
38. Watanabe H., and Dettloff. Reconfigurable fuzzy logic processor: A full custom digital VLCI, in Int. Workshop on Fuzzy Systems Applications, Iiruka, Japan, Aug. 1988, pp. 49-50.
39. Sangalli A., and Klir G.R. Fuzzy logic goes to market, New Scientist, 8 Feb., 1992.
40. Wang L.-X. Fuzzy Systems Are Universal Approximators // Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 1992. C. 1163–1170.
41. Castro, J. L. Fuzzy logic controllers are universal approximators // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1995. T. 25, № 4. C. 629–635.
42. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 314 с.
43. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К. : Либідь, 2007. – 656 с.
44. Голюк П.Ф., Гречин Т.М. Теорія автоматичного керування: Навчальний посібник. – Л: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 280 с.
45. Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Лисенко В.П. Теорія автоматичного управління: навч. посіб. – К.: Вид. Центр НУБіП України, 2012. – 240 с.
46. 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.
47. 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.
48. Сорока К.О. Теорія автоматичного керування і комп'ютерне моделювання (неперервні лінійні системи). Частина друга. Аналіз систем автоматичного ке-

- рування засобами комп'ютерного моделювання : навч. посібник. – Харків : ФОП Тімченко, 2010. – 156 с.
49. Євстіфєєв В. О. Теорія автоматичного керування. Частина 1. Безперервні лінійні та нелінійні системи. Навчальний посібник. – Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2006. – 288 с.
50. Євстіфєєв В. О. Теорія автоматичного керування. Частина 2. Спеціальні системи автоматичного керування. Навчальний посібник. – Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2007. – 224 с.
51. І.Г. Абраменко, Д. І. Абраменко Теорія автоматичного керування. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 178 с.
52. 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
53. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інші. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г.Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інші. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1.
54. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інші. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інші. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч2.
55. 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.
56. Гурко О.Г. Аналіз та синтез систем автоматичного управління у MATLAB: Навчальний посібник / О.Г. Гурко, І.Ф. Єрмоєнко. Харків, ХНАДУ, 2012. – 284 с.

57. 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.
58. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. –СПб: Питер, 2001. –488 с.
59. Круглов В.В., Дли М.И. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечёткой логики и нечёткого вывода. – М.: Физматлит, 2002. – 252 с.
60. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде МАТЛАБ и fuzzyTECH.- СП.:БХБ-Петербург, 2003.-736с.
61. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба – М.: "Горячая линия - Телеком", 2007. – 288 с.
62. 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).

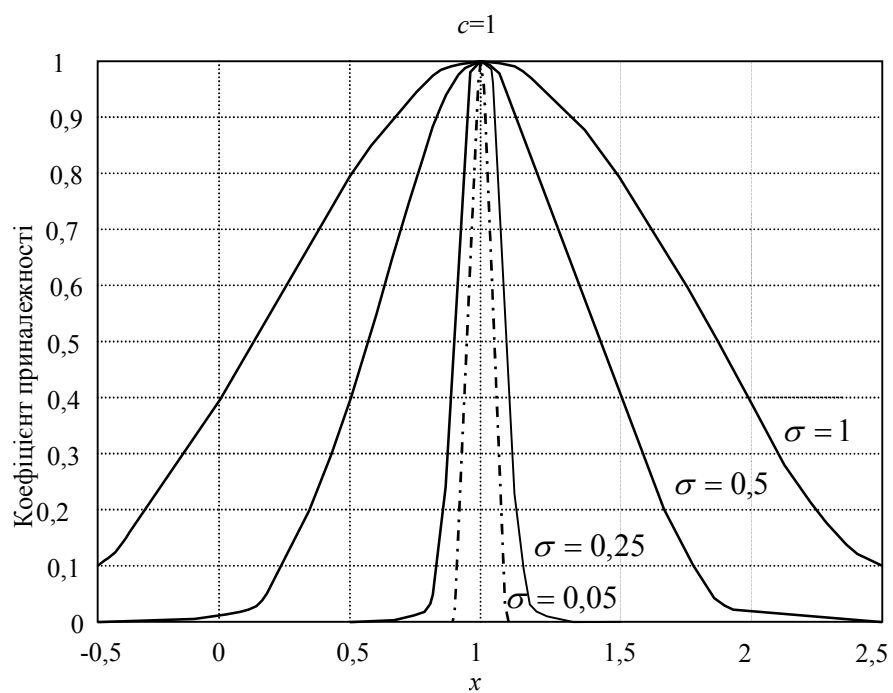
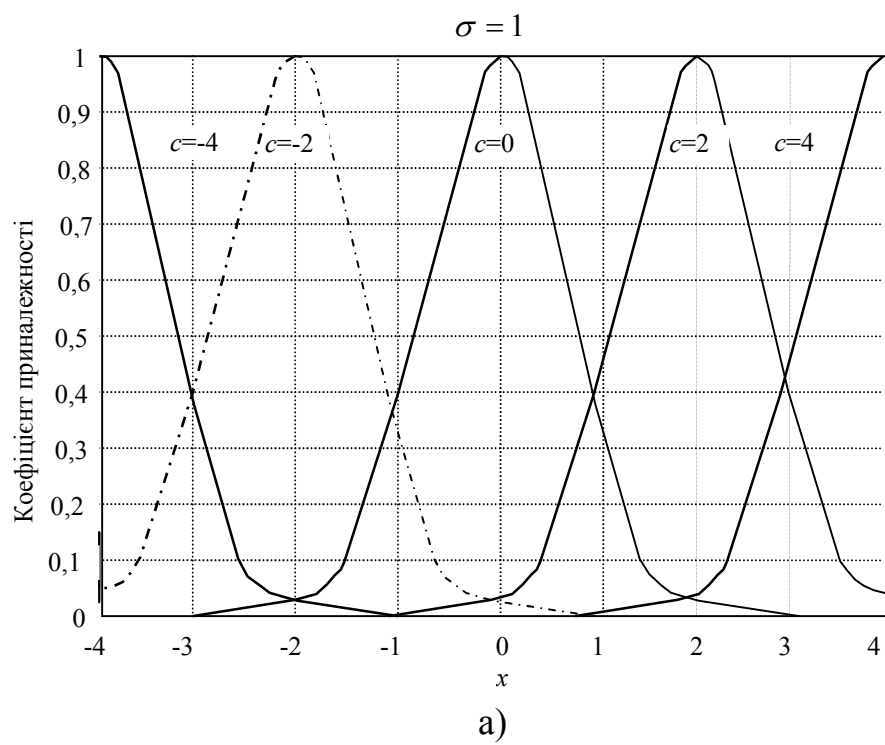


Рисунок А.1 – Ілюстрація впливу параметрів функції гауса на її форму:

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.

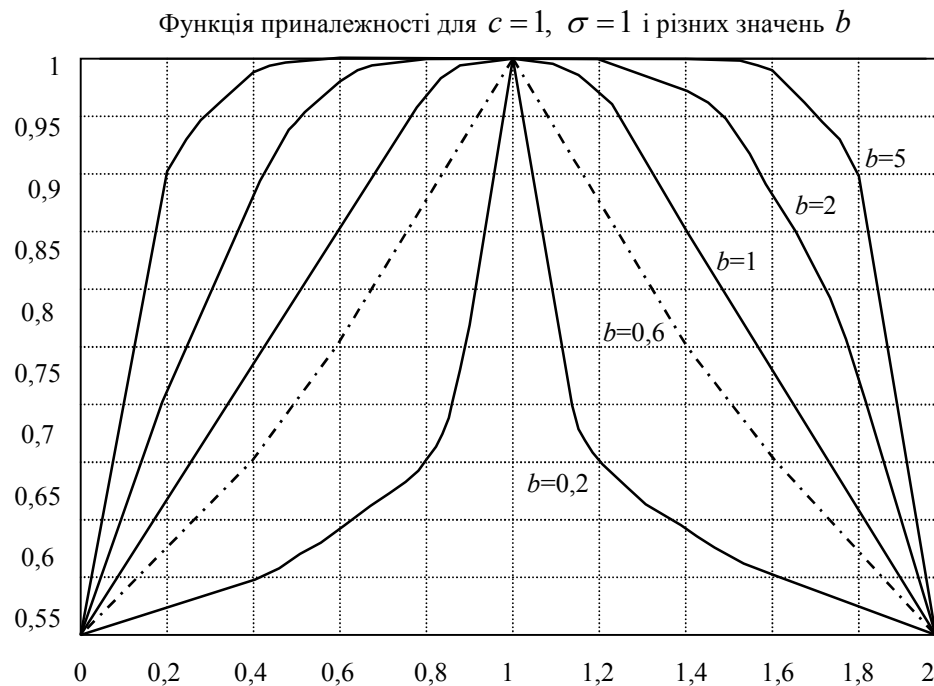


Рисунок А.2 – Ілюстрація впливу параметра b на форму функції гауса

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.

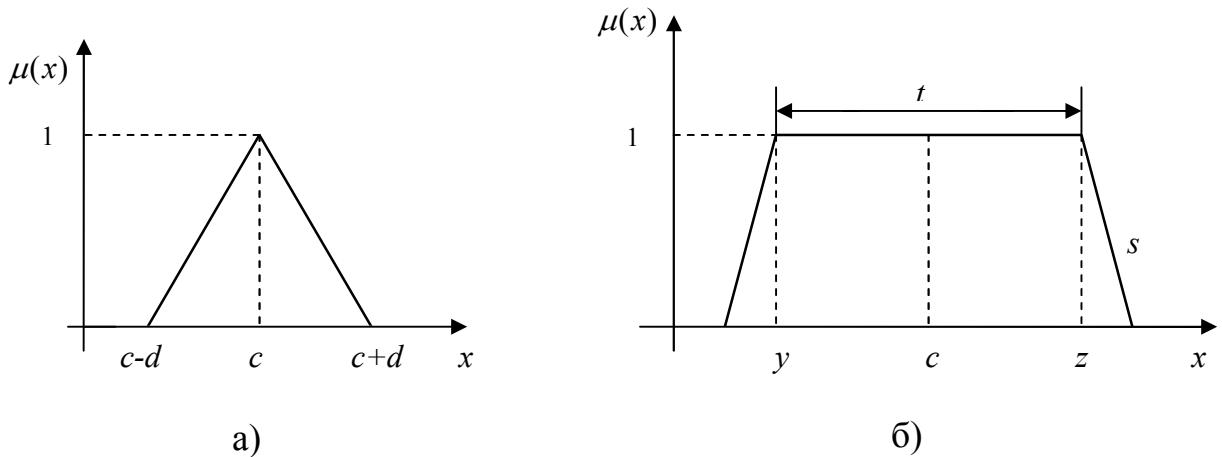


Рисунок А.3 – Трикутна а) і трапецеїдальна б) форми функцій приналежності

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

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

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 $\forall x \in E \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$.

Позначення: $A \subset B$.

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

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

Позначення: $A = B$.

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

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).

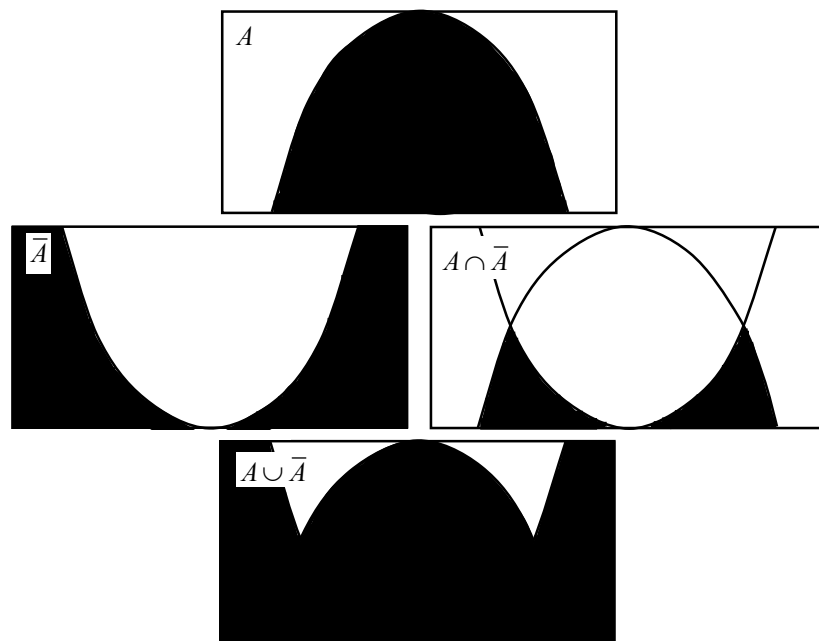


Рисунок Б.1 – Графічна інтерпретація логічних операцій

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)
$$\left. \begin{aligned} A \cdot B &= B \cdot A \\ A \hat{+} B &= B \hat{+} A \end{aligned} \right\} - \text{комутативність},$$
- 2)
$$\left. \begin{aligned} (A \cdot B) \cdot C &= A \cdot (B \cdot C) \\ (A \hat{+} B) \hat{+} C &= A \hat{+} (B \hat{+} C) \end{aligned} \right\} - \text{асоціативність},$$
- 3) $A \cdot \emptyset = \emptyset, A \hat{+} \emptyset = A, A \cdot E = A, A \hat{+} E = E,$
- 4)
$$\left. \begin{aligned} \overline{A \cdot B} &= \overline{A} \hat{+} \overline{B} \\ \overline{A \hat{+} B} &= \overline{A} \cdot \overline{B} \end{aligned} \right\} - \text{теорема де Моргана}.$$

Не виконуються:

- 1)
$$\left. \begin{aligned} A \cdot A &= A \\ A \hat{+} A &= A \end{aligned} \right\} - \text{ідемпотентність},$$
- 2)
$$\left. \begin{aligned} A \cdot (B \hat{+} C) &= (A \cdot B) \hat{+} (A \cdot C) \\ A \hat{+} (B \cdot C) &= (A \hat{+} B) \cdot (A \hat{+} C) \end{aligned} \right\} - \text{дистрибутивність},$$
- 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.

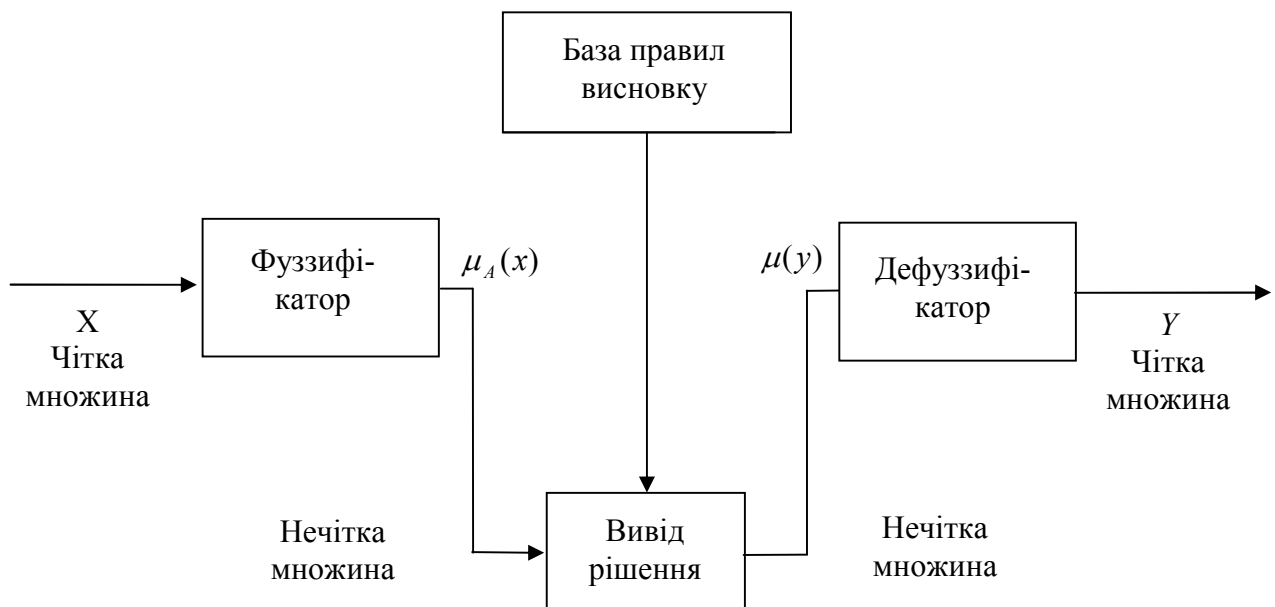


Рисунок В.1 – Структура нечіткої системи з фузифікатором і дефузифікатором

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.

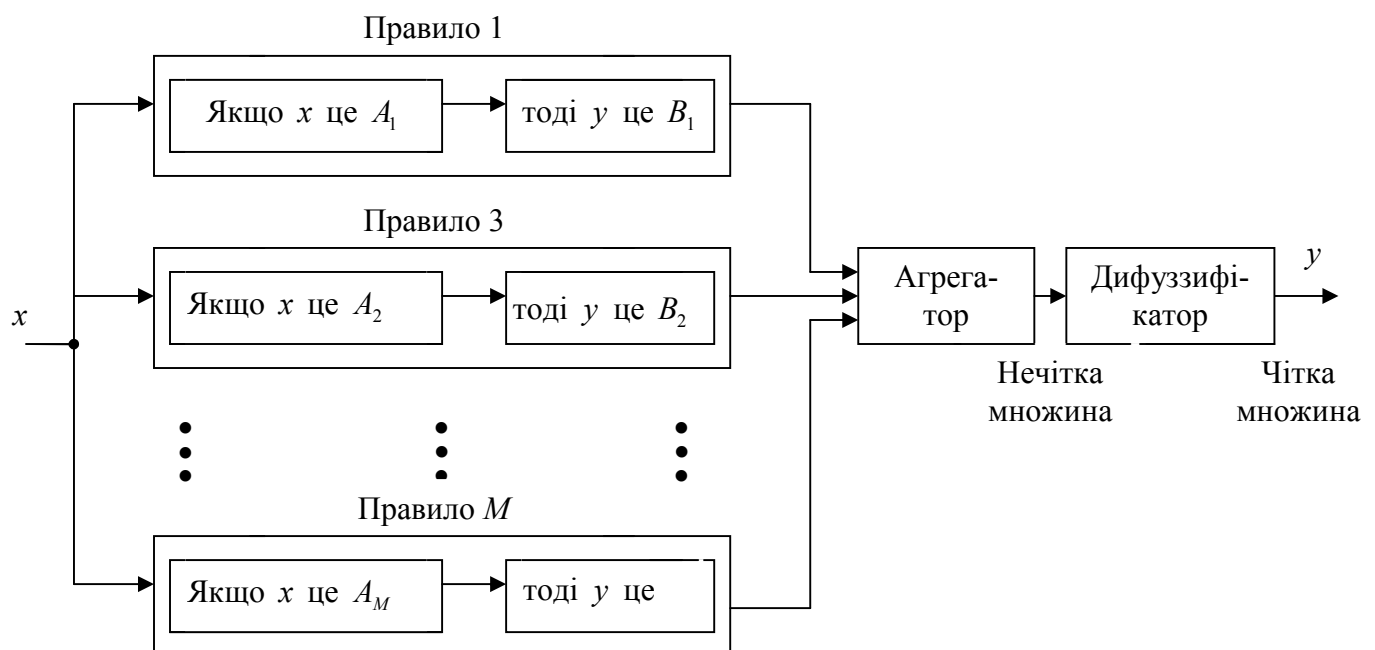


Рисунок В.2 – Організація висновку в нечіткій системі при наявності M правил висновку

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 $\mu_A, \mu_B, \mu_C, \mu_D, \mu_E, \mu_F$.

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 вихідній змінної w .

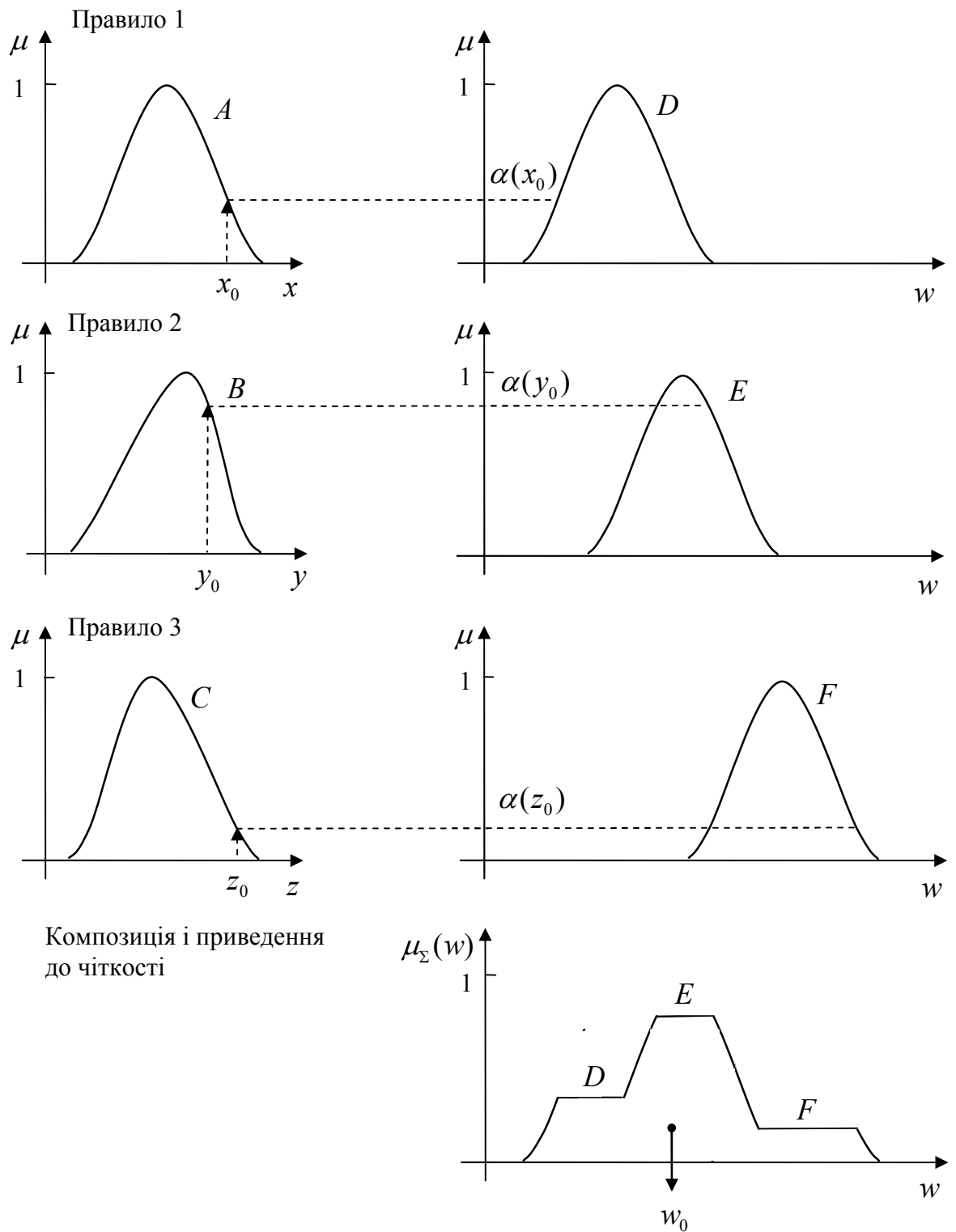


Рисунок В.3 – Ілюстрація до процедури логічного висновку

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 $z_2 = \alpha_2 x + b_2 y$.

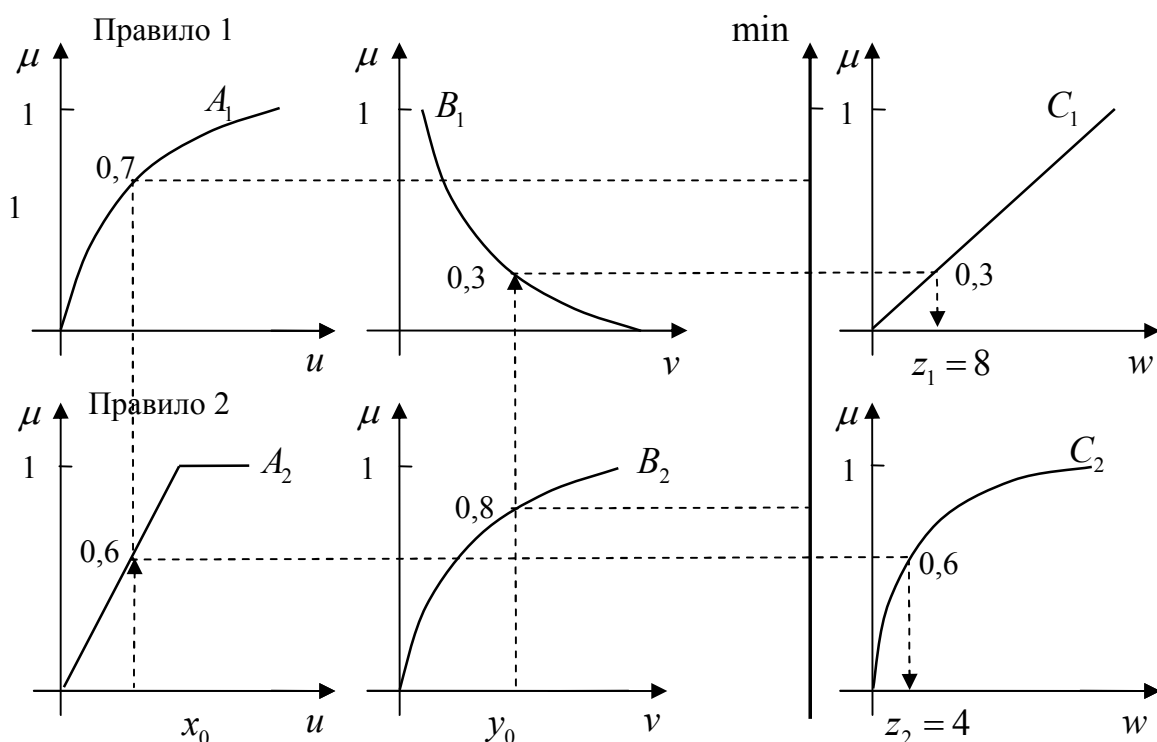


Рисунок В.4 – Ілюстрації до алгоритму Tsukamoto

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.

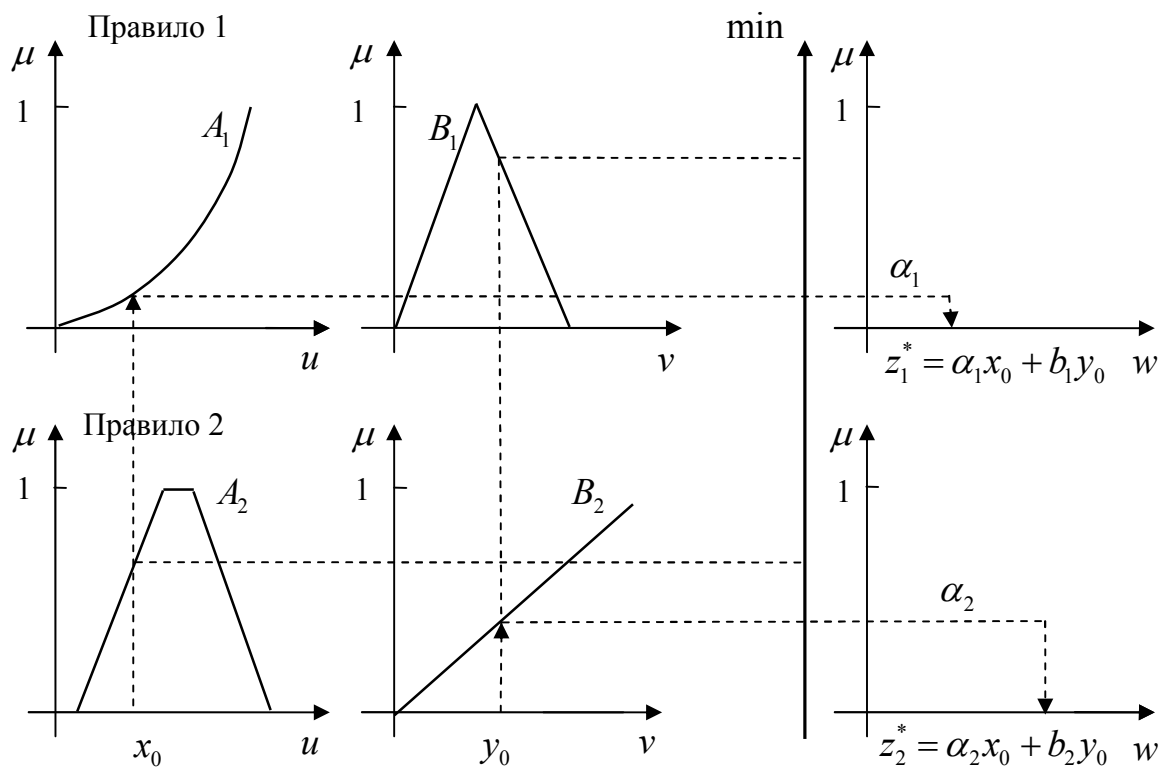


Рисунок В.5 – Ілюстрація до алгоритму Sugeno

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.

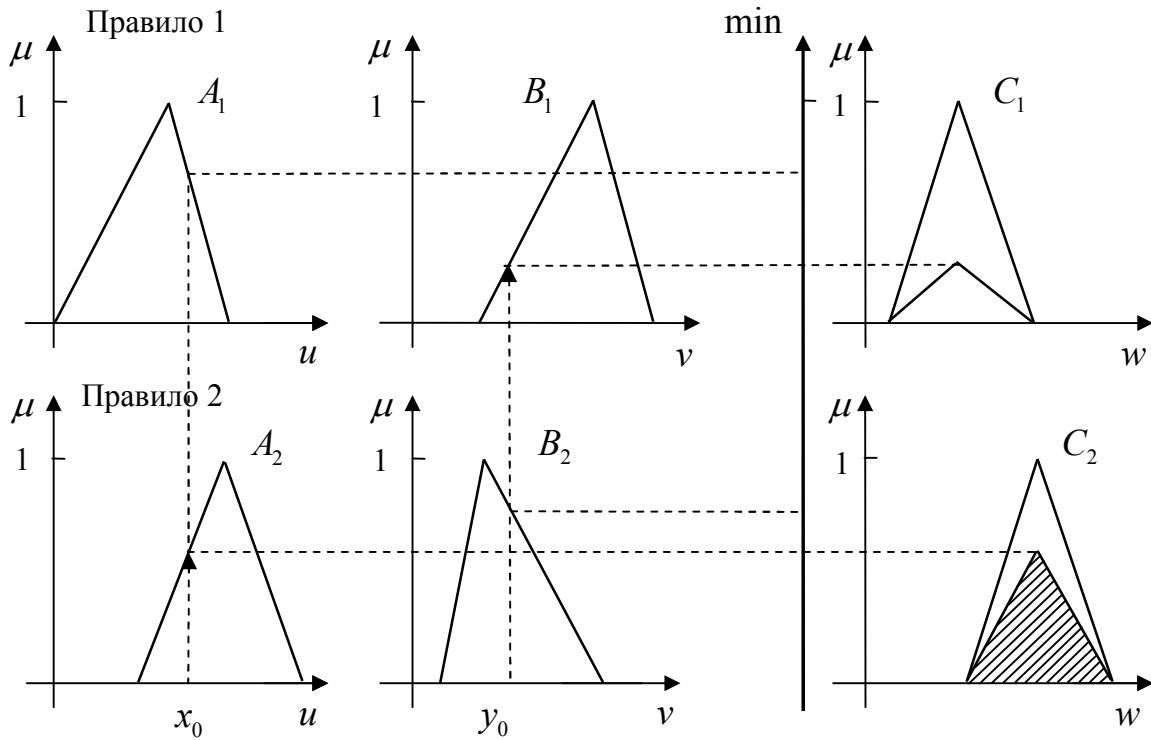


Рисунок В.6 – Ілюстрація алгоритму Larsen

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 вихідний 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.

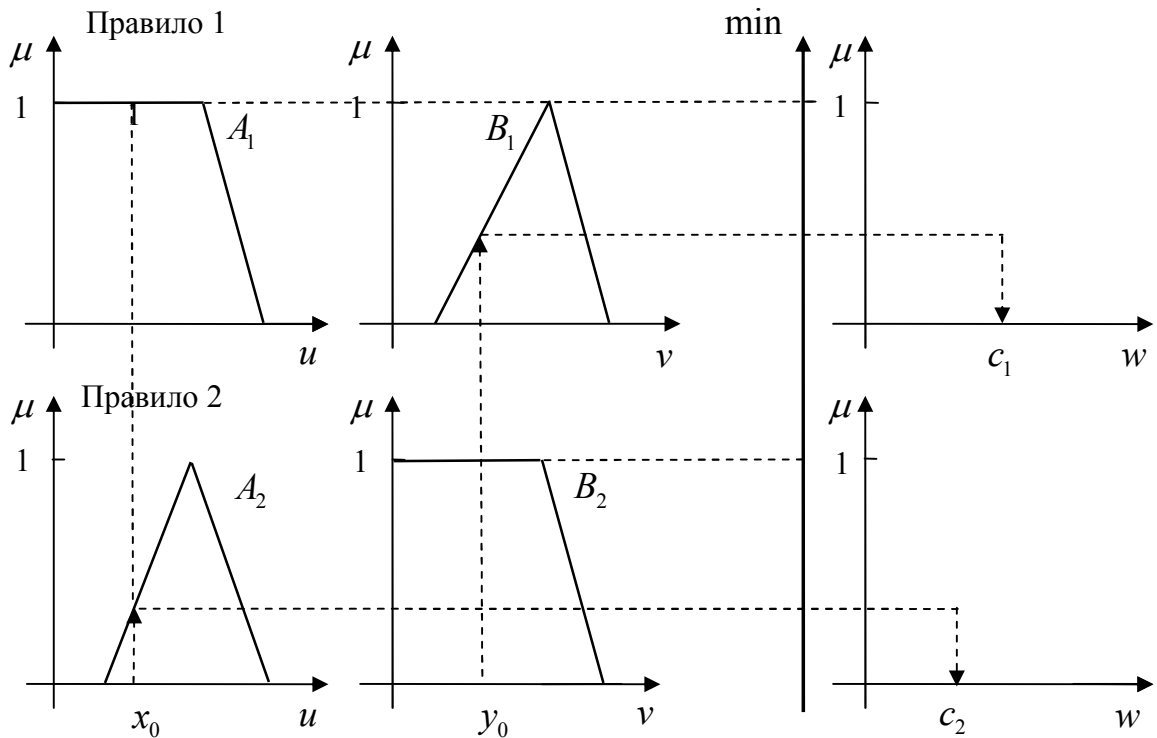


Рисунок В.7 – Ілюстрація спрощеного алгоритму нечіткого висновку

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)

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

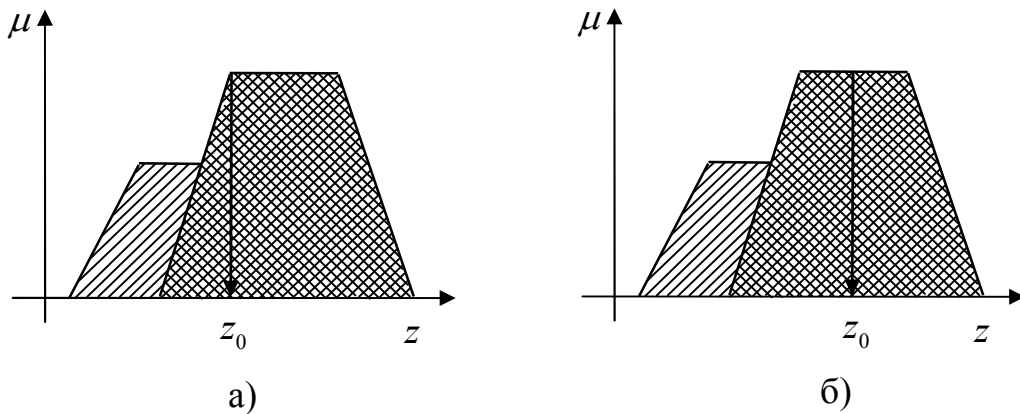


Рисунок В.8 – Ілюстрація до методів приведення до чіткості:

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  
% механізму підйому мостового крана  
% 2024 рік
```

```
% Вихідні дані
```

```
kd=0.13;  
CF=1/kd;  
In=175;  
Mn=In/kd;  
ktp=51.4;  
kn=0.05454;  
kt=0.0549;  
Tmt=0.005;  
Ta=0.052;  
Jd=19.56;  
Jm=0.34;  
Js=Jd+Jm;  
Uz=24;  
w0=3;  
c=(w0^2)*(Jd*Jm)/(Jd+Jm);  
b=0.01*c;  
Tme=2*Tmt+Ta;  
kpe=Js*kd^2*kt/(2*Tme*kn);  
kie=kpe/(4*Tme);
```

```
% Матриці
```

```
A=[-b/Jm 1/Jm b/Jm zeros(1,5);  
-c 0 c zeros(1,5);  
b/Jd -1/Jd -b/Jd 1/Jd zeros(1,4);  
zeros(1,4) 1/kd 0 0 0;  
0 0 0 -kd/(2*Tmt^2) -1/Tmt kpe/(2*Tmt^2*kt) -kpe/(2*Tmt^2*kt) 1/(2*Tmt^2*kt);  
zeros(1,5) -1/Ta 0 0;  
zeros(1,2) kn/(Ta*kd) zeros(1,3) -1/Ta 0  
zeros(1,5) kie -kie 0];  
B=[0 -1/Jm;  
zeros(4,2);  
1/Ta 0;  
0 0  
0 0];  
C=zeros(6,8);  
C(1,1)=1; C(2,2)=1; C(3,3)=1; C(4,4)=1; C(5,5)=1; C(6,8)=1;  
D=zeros(6,2);
```