

АГЯЯН
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

НЕЧІТКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РОЛЬГАНГОМ ЗА НОЖИЦЯМИ
СТАНА ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ З ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРОМ

(тема кваліфікаційної роботи)

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

(код і найменування спеціальності)

_____/ Денис КОСТІН
(підпис) (ім'я та прізвище)

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

Рецензент _____/ Анатолій ТАРАСЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

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

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

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

Харків – 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) Денис КОСТІН
(ім'я, прізвище)

1. Тема роботи Нечітка системи управління рольгангом за ножицями стана гарячої прокатки з фаззи-регулятором
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 Маса зливку $m_m=6,2-8,1 \cdot 10^3$ кг; діаметр бочки ролика $d_p=0,42$ м; діаметр шийки ролика $d_{ш}=0,21$ м; довжина бочки ролика $l_p=1,1$ м; кількість роликів секції $Z_p=3$; маса ролика $m_p=1,2 \cdot 10^3$ кг; окружна швидкість на бочці ролика $V_p=0,3-2$ м/с; максимальне число включень в годину $k_{\max}=450$; передавальне число редуктора $i=5,4$; двигун постійного струму Д812; тиристорний електропривод КТЕУ 500/220; трансформатор для тиристорного електропривода ТСП-160/0,7У4. Перерегулювання не більше 10%, час регулювання до 10с.
4. Зміст роботи (перелік питань, що їх належить розробити). Обґрунтувати перспективність застосування нечітких апроксимуючих систем для управління багатомасовою електромеханічною системою механізму рольганга за ножицями стана гарячої прокатки. Розрахувати систему підлеглого регулювання з внутрішнім контуром струму і зовнішнім контуром ЕРС. Оптимізувати контур струму за модульним критерієм, а контур ЕРС – за симетричним критерієм. Розробити математична модель двомасової системи. Виконати моделювання на ЕОМ. Розробити структурну схему нечіткої системи управління. Виконати синтез Fuzzy регулятора на ЕОМ з застосуванням пакету Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB. Провести аналіз результатів моделювання системи з Fuzzy.
5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал) 1. Магістрська кваліфікаційна робота. Формальні ознаки. 2. Рольганг за ножицями. Схема кінематична. 3. Нечіткі множини. Функції приналежності. 4. Нечіткі системи. Структурні схеми. 5. Нечіткі системи. Алгоритми нечіткого висновку. 6. Система управління. Перехідні процеси. 7. Двомасова система. Математична модель. 8. Двомасова система. Перехідні процеси. 9. Система з Fuzzy регулятором. Структурна схема. 10. Система з Fuzzy регулятором. Вікна завдання параметрів. 11. Система з Fuzzy регулятором. Перехідні процеси. 12-13. Магістрська 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)

Геннадій КАНЮК
(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Денис КОСТІН
(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 рольганга за ножицями стана гарячої прокатки	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 елементів. Розробка математичної моделі двомасової системи та моделювання двомасової системи на ЕОМ.	16.10.2023- 05.11.2023	
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)

Денис КОСТІН
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з: 139 сторінок, 43 рисунки, 1 таблиця, 57 використаних джерела, 5 додатків.

Мета роботи – синтез нечіткої системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму рольганга за ножицями стана гарячої прокатки, що має високі показники якості функціонування.

Розрахунковим шляхом з застосуванням фундаментальних положень теорії автоматичного управління визначаються параметри системи управління. 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 рольганга. Розроблена система управління координат електроприводу рольганга за ножицями стана гарячої прокатки. Розраховані параметри системи автоматичного управління. Проведено моделювання системи на ЕОМ. Розроблена математична модель системи з урахуванням пружних елементів механічної частини електроприводу. Розраховані динамічні характеристики двомасової системи. Розглянута структура нечіткої системи управління і виконаний синтез 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 ННІ «УІПА» (Харків, 2024 р.).

Ключові слова: НЕЧІТКІ МНОЖИНИ, НЕЧІТКІ ВИСНОВКИ, ПРОКАТНИЙ СТАН, РОЛЬГАНГ, СИСТЕМА ПІДЛЕГЛОГО УПРАВЛІННЯ, ОДНОМАСОВА І ДВОМАСОВА СИСТЕМИ, НЕЧІТКІ СИСТЕМИ, ФАЗЗІ-РЕГУЛЯТОР

ABSTRACT

An explanatory message consists of: 139 pages, 43 figures, 1 table, 57 used sources, 5 additions.

A purpose of work is a synthesis of the fuzzy control system of the multimass electromechanics system of mechanism rolgang behind the scissors of the state of the hot rolling which has high indexes of quality of functioning.

A calculation way with the use of fundamental positions of theory of automatic control is determine the parameters of the control system. From the use of methods of theory of unclear plurals and fuzzy logic a synthesis is executed fuzzy regulator for the management of two-mass electromechanics system. The method of computer design with application of application of MATLAB package is explore dynamic descriptions of the fuzzy system.

As a result of implementation of master's degree qualifying work scientifically to ground perspective of application of the unclear approximating systems is for the control of mechanism of rolgang the multimass electromechanics system. The control of coordinates of electric drive of rolgang system is developed behind the scissors of the state of the hot rolling. The parameters of the automatic control system are expected. The design of the system is conducted on computer. The mathematical model of the system is developed taking into account the resilient elements of mechanical part of electric drive. Dynamic descriptions of the two-mass system are expected. The structure of the unclear control system is considered and the synthesis of fuzzy regulator is executed in the system of MATLAB. The design of the fuzzy control system is conducted with a fuzzy regulator on 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 Educational and Scientific Institute "UIPA" of the V.N. Karazin KhNU when giving lectures, conducting practical classes.

Basic provisions and scientific results tested at the scientific-practical conference of students of the ESI "UIPA" (Kharkov, 2024 y.).

Keywords: FUZZY SETS, FUZZY CONCLUSIONS, FLATTING MILL, ROLGANG, INFERIOR CONTROL SYSTEM, THE SAME THINGMASS AND TWO-MASS SYSTEMS, FUZZY SYSTEMS, FUZZY REGULATOR

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	13
1.1 Історія виникнення методів нечіткої логіки.....	13
1.2 Фактори, що обумовлюють ефективність використання систем нечіткого висновку в задачах управління	16
1.3 Області застосування нечіткої логіки	17
1.4 Структура систем нечіткого управління	19
1.5 Призначення і основні характеристики рольгангів.....	21
1.6 Основні структури системи регулювання механізмів прокатних станів	23
1.7 Постановка задачі дослідження і шляхи її вирішення.....	25
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	28
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДЛЕГЛОГО РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	30
2.1 Технічні дані механізму і силового електроустаткування. Вимоги до системи управління.....	30
2.2 Перевірка електродвигуна по нагріву і перевантажувальній здатності	32
2.3 Розрахунок параметрів силового ланцюга електроприводу	37
2.4 Вибір структури системи автоматичного регулювання координат електроприводу	41
2.5 Синтез послідовного корегуючого пристрою контура струму	42
2.6 Синтез послідовного корегуючого пристрою контура ЕРС.....	47
2.7 Дослідження динамічних характеристик системи	57
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	61
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	63

3.1 Розробка математичної моделі двомасової системи	63
3.2 Розрахунок перехідних процесів двомасової систем	70
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	76
РОЗДІЛ 4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ З FUZZY РЕГУЛЯТОРОМ.....	77
4.1 Процес нечіткого моделювання в середовищі MATLAB	77
4.2 Побудова і дослідження багатомасової системи з Fuzzy регулятором.....	78
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	98
ВИСНОВКИ.....	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	102
ДОДАТОК А. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН.....	108
А.1 Визначення і способи завдання нечіткої множини	108
А.2 Функції приналежності нечіткої логіки.....	112
А.3 Міри нечіткості нечітких множин	118
ДОДАТОК Б. ОПЕРАЦІЇ НАД НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ.....	114
Б.1 Логічні операції.....	114
Б.2 Алгебраїчні операції з нечіткими множинами	118
ДОДАТОК В. НЕЧІТКІ ВІДНОШЕННЯ.....	121
В.1 Способи завдання нечітких відношень	121
В.2 Операції над нечіткими відношеннями.....	122
ДОДАТОК Г. СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ	125
Г.1 Порядок формування нечітких висновків.....	125
Г.2 Алгоритм Mamdani	130
Г.3 Алгоритм Tsukamoto	131
Г.4 Алгоритм Sugeno	133
Г.5 Алгоритм Larsen.....	134
Г.6. Спрощений алгоритм нечіткого висновку	135
Г.7 Методи приведення до чіткості.....	134
ДОДАТОК Д. ФАЙЛ ВИХІДНИХ ДАНИХ.....	138

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з основних завдань розвитку економіки нашої країни є завдання технічного переозброєння металургійних установок, і, в першу чергу, прокатних станів. Сучасний прокатний стан є складний комплекс різних механізмів, зв'язаних між собою єдиним технологічним процесом. Окрім основної операції, на прокатному стані проводиться цілий ряд допоміжних, без яких неможливе плющення металу, всі ці операції виконуються за допомогою механізмів стану. Значення цих механізмів в прокатному стані вельми велике, оскільки вони роблять істотний вплив на продуктивність стану, на якість продукції. Продуктивність потужного прокатного стану може виявитися невисокою, якщо хоч би один з його механізмів не в змозі виконати відповідну кількість операцій в заданий час. Систематичному поліпшенню силової частини приводу основних і допоміжних механізмів прокатних станів, засобам і методам управління і автоматизації приділяється особлива увага.

Запити на вдосконалення систем управління вимагають нових шляхів розвитку автоматичних систем, що призводить до розгляду нових методів управління. Останнім часом, завдяки інтенсивним дослідженням, методи адаптивного і робастного регулювання здобули широке визнання. Вони забезпечують стійкість систем змінної динаміки, не потребуючи точного знання параметрів моделі об'єкта. Адаптивні методи намагаються відповідно налаштувати регулятор шляхом оцінки параметрів невідомого об'єкта, тоді як робастні регулятори залишаються сталими, забезпечуючи стійкість системи у межах допустимих змін параметрів об'єкта. Однак проблема синтезу адаптивних систем управління для невідомих, нелінійних та змінюючихся об'єктів залишається нерозв'язаною як з теоретичного, так і з практичного погляду. Методи робастного регулювання обмежені, переважно, лінійними системами і деякими спеціальними класами нелінійних систем. Отже, незважаючи на досягнутий прогрес, важливо визнати, що універсального та ідеального регулятора наразі не існує.

Одним з найбільш перспективних напрямків є розробка систем управління з застосуванням методів нечіткого управління [1-10]. Методи створення систем управління, засновані на теорії нечітких множин, значно розширюють можливості традиційних підходів до побудови автоматизованих систем управління. Ця теорія дає змогу описувати якісні та неточні поняття, а також наші уявлення про навколишній світ і працювати з ними для отримання нових знань.

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, на якій базується нечітке управління, ближче до людського мислення та природних мов, ніж традиційні 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 для синтезу системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму рольганга стана гарячої прокатки, що має високі показники якості функціонування з застосуванням теорії нечітких множин і нечіткої логіки є важливою науково-технічною задачею, а тема роботи є актуальною.

Мета роботи і задачі дослідження: Метою роботи є синтез нечіткої системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму рольганга перед ножицями стана гарячої прокатки, що має високі показники якості функціонування.

Досягнення поставленої мети здійснюється рішенням наступних основних задач.

1. Аналіз факторів, що обумовлюють ефективність використання систем нечіткого висновку в задачах управління технічними системами.
2. Розробка системи підлеглого регулювання координат електроприводу механізму рольганга.
3. Побудова математичної моделі двомасової електромеханічної системи.
4. Синтез фаззи-регулятора, який забезпечує задані показники якості функціонування двомасової електромеханічної системи.
5. Моделювання розробленої нечіткої системи на ЕОМ і аналіз отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – динамічні процеси в системі управління рольгангом заножицями стана гарячої прокатки з урахуванням пружних елементів.

Предмет дослідження – моделі і методи синтезу нечітких систем управління рольгангом за ножицями стана гарячої прокатки з урахуванням пружних елементів.

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 фаззі-регулятор для управління двомасовою електромеханічною системою. Імітаційне моделювання дозволило проаналізувати якість функціонування нечіткої системи і підтвердило ефективність отриманих результатів.

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

1. Вперше отримано наукове обґрунтування доцільності використання нечіткого управління багатомасовою електромеханічною системою механізму рольганга перед ножицями стана гарячої прокатки.

2. Вперше запропонована і синтезована нечітка система управління двомасовою електромеханічною системою механізму рольганга, що задовольняє вимогам, які пред'являються до систем управління механізмами прокатних станів.

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 рольганга перед ножицями стана гарячої прокатки, що має високі показники якості функціонування.

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

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

Апробація результатів роботи. Основні положення та наукові результати були апробовані на науковій конференції студентів ННІ «УПА» ХНУ ім. В.Н. Каразіна (Харків, 2024 р.).

Структура і об'єм роботи. Робота складається з вступу, 4 розділів основної частини, висновків, додатків і списку використаних літературних джерел. Повний об'єм роботи складає 139 сторінок, 43 рисунки, серед них: 24 рисунки за текстом, 19 рисунків на окремих сторінках, 1 таблиця, 5 додатків на 33 сторінках, список літературних джерел з 57 найменування на 6 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Історія виникнення методів нечіткої логіки

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

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

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

вши межі тиску для кожного розряду, можна обійти обмеження логіки Аристотеля.

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

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

Так, наприклад, в інформатиці нечітка логіка - це набір деяких нежорстких принципів, які з метою досягнення поставлених завдань оперують різними поняттями, припущеннями на інтуїтивній основі або, наприклад, експертними думками в певній сфері знань. Нечіткі судження припускають відмову від жор-

стких правил. Штучний інтелект, нейронні мережі і експертні системи - найбільш поширені області застосування теорії Л. Заде. Замість стандартних понять Істина і Брехня тут застосовується більш глобальний набір змінних, де можна знайти: Правда, Неправда, Ймовірно, Часом, Забув, Смутно, Давай спробуємо, Дай мені час, Утримаюся і т.д. Методи нечіткої логіки незамінні в ситуаціях, коли спостерігається чи досліджувана система не має чітких правил функціонування, і тому її поведінку неможливо передбачити стандартними методами. «Штучний інтелект і нейронні мережі - єдиний спосіб моделювання людських уявлень про навколишній світ. У зв'язку з тим, що люди не сприймають навколишню дійсність лише в чорно-білому кольорі, виникає необхідність у використанні нечіткої логіки. [13].

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

На завершення слід констатувати факт, що теорія нечіткої логіки професора Лотфі Заде стала важливим досягненням з точки зору розвитку точних наук. Описаний підхід застосовується практично у всіх сучасних ІТ-технологіях, від пральної машини до автоматизованого керування автомобілем. У багатьох європейських країнах методи нечіткої логіки застосовуються для управління технологічними процесами на великих промислових об'єктах. Компанія Matsushita Electric вже давно застосовує методи нечіткої логіки, пристрої під такими відомими брендами, як Panasonic, Technics, National. В наші дні теорія використовується в лінгвістиці, соціології, психології, філософії, економіці, політиці і в інших предметних областях. З розвитком технологій штучного ін-

телекту теорія знайшла ще більш широке застосування. Експертні системи, здатні частково або повністю замінити людину-фахівця у вирішенні проблемної ситуації, також засновані на методах нечіткої логіки. Побудова моделей наближених людських міркувань відкриває нові можливості в застосуванні технологій штучного інтелекту в робототехніці. [14] У зв'язку з цим, вчені всього світу відзначають, що у методів нечіткої логіки велике майбутнє.

Таким чином, на основі аналізу вище приведених літературних джерел, а також [15-31] можна зробити висновок, що область застосування теорії нечітких множин і нечіткої логіки з кожним роком продовжує неухильно розширюватися. При цьому процес розробки і застосування нечітких моделей тісно взаємозв'язаний з концепцією системного моделювання як найбільш загальною методологією побудови і використання інформаційних моделей складних систем різної фізичної природи.

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

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

Можливість використання апарату нечіткої логіки в задачах управління динамічними об'єктами і системами базується на наступних результатах.

1. У 1992 р. Wang довів теорему [32]: для кожної речової безперервної функції $G(x)$, заданої на компактї U , і будь-якого $\varepsilon > 0$ існує нечітка експертна система, що генерує вихідну функцію $F(x)$ таку, що наближається до заданої з точністю ε .

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

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

2. У 1995 р. Castro показав, що логічний контролер Mamdani при певних умовах також є універсальним апроксиматором [33].

3. Згідно знаменитої теореми FAT (Fuzzy Approximation Theorem), доведеної Б. Коско (B. Kosko) у 1993 році [34], будь яка математична система може бути апроксимована системою, заснованою на нечіткій логіці.

Системи з нечіткою логікою доцільно застосовувати в наступних випадках:

- 1) для складних процесів, коли немає простій математичній моделі;
- 2) якщо експертні знання про об'єкт або про процес можна сформулювати тільки в лінгвістичній формі.

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

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

1.3 Області застосування нечіткої логіки

Коли з'явилась теорія нечіткої логіки тільки, в наукових журналах можна було знайти статті, що обговорювали її потенційні сфери застосування. З розвитком цієї області кількість практичних застосувань нечіткої логіки почала швидко зростати. Сьогодні нечіткі технології стають дедалі більш затребуваними серед фахівців різних сфер. Існують кілька причин, чому системи на основі нечіткої логіки користуються перевагою:

- вони є концептуально простішими для розуміння;
- нечітка логіка є гнучкою та стійкою до неточних вхідних даних;
- вона здатна моделювати нелінійні функції будь-якої складності;
- у цій логіці враховується досвід експертів;

- нечітка логіка базується на природній мові спілкування людини.

Системи, засновані на нечіткій логіці, були розроблені та успішно впроваджені у таких сферах, як управління технологічними процесами, транспортом, побутовою технікою, медична та технічна діагностика, фінансовий менеджмент і аналіз, біржове прогнозування, розпізнавання образів, дослідження ризикованих і критичних операцій, прогнозування землетрусів, складання автобусних розкладів і кліматичний контроль у будівлях.

Сучасні завдання управління часто не можуть бути ефективно розв'язані класичними методами через надзвичайну складність математичних моделей, які їх описують. Основні переваги fuzzy-систем порівняно з іншими підходами включають:

- здатність працювати з вхідними даними, що мають нечітке визначення, зокрема з динамічними значеннями, які змінюються в часі і не можуть бути чітко задані;
- можливість нечіткої формалізації критеріїв оцінки та порівняння, з використанням термінів, як-от "більшість", "можливо", "переважно" тощо;
- можливість здійснювати якісну оцінку як вхідних даних, так і результатів, працюючи не лише з фактичними значеннями, а й з рівнями їх достовірності та розподілом;
- можливість швидкого моделювання складних динамічних систем і їх порівняльного аналізу з певною точністю: використання принципів поведінки системи, описаних fuzzy-методами, дозволяє значно скоротити час на отримання точних значень змінних і складання відповідних рівнянь, а також оцінити різні варіанти результатів.

Застосування нечіткої логіки рекомендоване для складних процесів, де не існує простої математичної моделі; для нелінійних процесів високих порядків; а також для обробки експертних знань, які формулюються мовою.

1.4 Структура систем нечіткого управління

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

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

Не затримуючись на деталях класичної теорії управління, розглянемо основні визначення, які допоможуть краще зрозуміти особливості та роль нечітких систем у вирішенні задач управління. Основна структура чи модель класичної теорії управління базується на представленні об'єкту та процесу управління у вигляді деяких систем (рис.1.1). Об'єкт управління характеризується певним набором вхідних параметрів та набором вихідних параметрів. Системі управління надходять певні вхідні змінні, що формуються за допомогою кінцевого набору датчиків. За допомогою певного алгоритму управління система управління формує набір значень вихідних змінних, також відомих як управляючі змінні або змінні процесу управління. Ці значення вихідних змінних передаються на вхід об'єкту управління і, сполучаючись зі значеннями його вхідних параметрів, впливають на його поведінку у потрібному напрямі.

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

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

нянні вихідних параметрів об'єкта з деякими заданими значеннями та визначенні різниці між ними, тобто помилки. Після цього визначаються вихідні змінні як сума цієї помилки, інтегралу та похідної цих значень протягом певного часового інтервалу.



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

Один з недоліків PID-контролерів полягає в тому, що вони базуються на припущенні про лінійний характер відношення між вхідними та вихідними параметрами управління, що обмежує їх адекватність у вирішенні конкретних завдань. Інший недолік пов'язаний із складністю обчислень, що може спричинити неприпустимі затримки при управлінні об'єктами з високою динамікою змін вихідних параметрів.

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

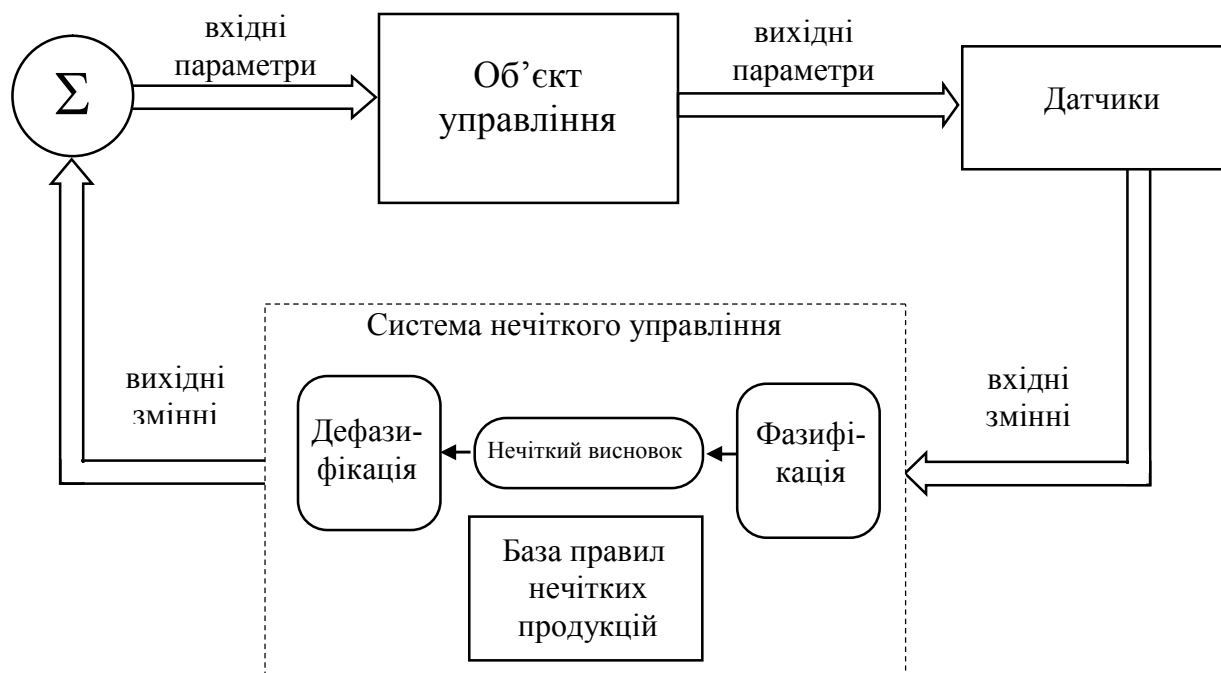


Рисунок 1.2 – Архітектура компонентів процесу нечіткого управління

1.5 Призначення і основні характеристики рольгангів

Рольганги класифікують за призначенням на робочі та транспортні. Робочі рольганги розташовуються безпосередньо у робочій клітці стану і відповідають за подачу металу на вали та його приймання. Транспортні рольганги включають ті, що встановлюються перед і після робочої клітці, а також окремі допоміжні машини, які з'єднують між собою та з пристроями стану.

З точки зору конструкції, рольганги можуть мати груповий або індивідуальний привод роликів. У разі групового приводу одна секція рольганга, що складається з 4–10 або більше роликів, приводиться в рух одним електродвигуном через конічні шестерні та трансмісійний вал. Такий привід застосовується для рольгангів, які працюють під значними навантаженнями, наприклад, для блюмінгових рольгангів, що піднімають метал.

Однак практика експлуатації рольгангів з груповим приводом через конічні шестерні показує значні недоліки: через нерівномірний температурний нагрів зубчасті зачеплення швидко зношуються, заміна роликів або трансмісійного валу є складною і займає багато часу, а підшипники з витими

роликами на неприводній стороні швидко руйнуються під великими ударними навантаженнями. Тому в останні роки на обтискових і великосортних станах все частіше використовують рольганги з груповим приводом від вбудованих або окремих редукторів з циліндровими шестернями, а підшипники з витими роликами замінюють на роликові конічні або сферичні.

У разі індивідуального приводу кожен ролик (або пара роликів) рольганга приводиться в рух окремим електродвигуном. Така конструкція рольгангів є більш простою, їх легше виготовляти та експлуатувати. Вони широко застосовуються як транспортні рольганги для переміщення великих металевих виробів після прокатки, а також як первинні ролики робочих рольгангів у станах обтискання.

Рольганги з вільними роликами використовуються для транспортування: вони мають невеликий нахил до горизонталі, і переміщення металу по ним відбувається завдяки силі тяжіння. Ці рольганги також відомі як гравітаційні. Ролики можуть бути виготовлені з цільнокованої сталі, лиття або сталевих труб.

Головними характеристиками рольгангів є діаметр роликів, довжина бочки роликів і відстань між ними. Для зменшення ваги рольганга і мінімізації потужності приводу діаметр роликів обирається мінімально можливим, з урахуванням міцності ролика. Довжина бочки роликів повинна відповідати довжині бочки валів для робочих рольгангів і бути на 150–200 мм більшою за ширину смуги, що транспортується, для транспортних рольгангів (або ширини кількох профілів, розташованих поруч). Відстань між роликами повинна бути такою, щоб метал лежав на щонайменше двох роликах, але не надто великою, щоб уникнути його прогинання.

Швидкість обертання роликів робочих рольгангів повинна бути на 10–15% вищою за швидкість металу, що виходить з валів. Для транспортних рольгангів швидкість залежить від типу та призначення стану та характеру технологічних процесів, які вони виконують. Наприклад, для рольгангів блюмінга, що підводять важкі злитки, швидкість може бути 1,5–2 м/с, а для

рольгангів, що використовуються у безперервних широкосмугових станах гарячої прокатки, вона досягає 20 м/с.

1.6 Основні структури системи регулювання механізмів прокатних станів

До допоміжних механізмів реверсивних обтискових прокатних станів відносяться механізми, що безпосередньо обслуговують плющення металу в кліті (нажимний пристрій, станинні ролики, робочі рольганги, маніпулятори, кантователі), а також зливковоз і ножиці. Призначення допоміжних механізмів різне, проте, до них застосовується загальна вимога – забезпечення максимальної продуктивності всього агрегату.

У зв'язку з дуже великим числом включень в годину, що досягає для приводу маніпуляторів, нажимного пристрою і рольгангів 1000 і більш, а також в наслідок високих вимог до режимів управління, що пред'являються технологічними процесами, для приводу механізмів сучасних станів використовують двигуни постійного струму, одержуючі живлення переважно по системі тиристорний перетворювач-двигун. Потужність приводних двигунів досягає декількох сотень кіловат. Привід зливковоза і робочих рольгангів здійснюється від одного або двох двигунів сумарною потужністю до 300-400кВт. Нажимний пристрій і лінійки маніпуляторів приводяться, як правило, від двох двигунів сумарною потужністю до 400-600кВт.

Ножиці забезпечені двохдвигунним приводом сумарною потужністю до 600-1000 кВт.

Обмеження потужності електродвигунів в таких відповідальних приводах визначається не прагненням до економії первинних витрат, а максимально допустимими виправдовуваними прискореннями і у ряді випадків технічно допустимими швидкостями. Так, за умовами відсутності буксування скатів по рейках, прискорення зливковоза не може перевищувати $1,1-1,3 \text{ м/сек}^2$, максимально виправдовуване за умовами відсутності буксування злитка на рольгангу

прискорення рольганга не повинно бути більше $2,2 \text{ м/сек}^2$. Максимальна швидкість пересування вітчизняних зливководів поки не перевищує 7 м/сек .

До електроприводу кожного конкретного механізму можуть бути сформульовані цілком певні вимоги.

Не дивлячись на велику різноманітність механізмів прокатних станів, системи регулювання електроприводів цих механізмів можуть бути істотно уніфіковані незалежно від конкретного застосування. Основні структури системи регулювання наступні:

1 Пропорційний або інтегро-пропорційний регулятор частоти обертання (або ЕРС) з підлеглим регулятором струму якоря.

2 Пропорційний або інтегро-пропорційний регулятор частоти обертання з підлеглим регулятором струму якоря і залежним управлінням потоком збудження двигуна.

3 Регулятори для двохрухових приводів при живленні кожного якоря від окремого перетворювача.

4 Регулятори структур 1 і 2 для двохрухових приводів при паралельному включенні якоря і з вирівнюванням навантажень дією на полі двигуна.

5 Регулятор положення з підлеглими регуляторами швидкості і струму.

6 Регулятори частоти обертання (або ЕРС) з підлеглими регуляторами струму якоря для двох технологічно зв'язаних механізмів, з регулятором синхронізації переміщення виконавських органів цих механізмів.

7 Регулятор потужності для намотувальних механізмів.

8 Регулятор струму, уставка якого регулюється відповідно до заданого натягнення, із зовнішнім контуром швидкості, що насичається, як обмежувачем.

Всі необхідні модифікації структур систем регулювання можуть бути реалізовані на основі цих восьми структур шляхом додавання деяких допоміжних пристроїв (завдання частоти обертання, пом'якшення механічних характеристик і т.д.).

1.7 Постановка задачі дослідження і шляхи її вирішення

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

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

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

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

Під час синтезу та аналізу динамічних характеристик системи електроприводу рольганга механічна частина системи часто розглядається як жорстка

зв'язана ланка. Такий підхід відображає середній характер руху елементів, оскільки не враховує вплив пружності реальних механічних з'єднань. Завдяки обмеженій жорсткості цих з'єднань механічна частина електроприводу виступає як пружна система, на яку впливають управляючі (момент двигуна) або обуюючі (момент статичного навантаження) дії. Це призводить до коливань зв'язаних мас, що збільшують максимальні навантаження на з'єднання та ускладнюють точність виконання необхідних рухів і переміщень. Звичайні регулятори не забезпечують достатніх показників якості роботи системи. Впровадження нечітких регуляторів виглядає перспективною альтернативою традиційним методам створення систем управління основними та допоміжними механізмами прокатних станів.

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

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

Виконати синтез системи регулювання параметрами електроприводу механізму механізму рольганга перед ножицями стана гарячої прокатки, розглядаючи об'єкт управління як одномасову систему.

Розробити модель об'єкту управління з урахуванням пружних елементів.

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

Виконати моделювання систем і провести аналіз отриманих результатів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Розглянуто фактори, що обумовлюють ефективність використання систем нечіткого висновку в задачах управління. Наявність невизначеної або нечіткої інформації, яка не може бути інтерпретована в імовірнісних термінах, призводить до того, що традиційні кількісні методи, використовувані в теорії автоматичного управління, є недостатньо адекватними. В результаті з'являються труднощі у формуванні алгоритмів управління. Один із способів їх подолання полягає у використанні нечітких понять і знань, проведенні операцій з використанням нечітких логічних правил і в отриманні на їх основі нечітких висновків, на базі яких формуються алгоритми управління.

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

3. Розглянуті принципи нечіткого висновку, елементи теорії нечітких множин, правила імплікації та нечіткі міркування є складовими частинами системи нечіткого висновку. Ця система включає в себе набір нечітких правил, базу даних з описами функцій приналежності, а також механізм висновку та агрегації, який формується використаними правилами імплікації. У технічній реалізації вхідні та вихідні сигнали представлені вимірюваннями, які однозначно порівнюють вхідні та вихідні значення. Щоб забезпечити взаємодію цих двох видів сигналів, введено нечітку систему з фузифікатором (перетворювачем множини вхідних даних у нечітку множину) на вході та дефузифікатором (перетворювачем нечітких множин у конкретні значення вихідної змінної) на виході. Розглянуті системи нечіткого висновку включають Мамдані-Заде та модель виведення Такагі-Сугено-Канга.

Одним із основних напрямків практичного застосування систем нечіткого висновку є вирішення завдань управління різними об'єктами та процесами. У цьому контексті створення нечіткої моделі базується на формальному

відображенні характеристик системи через лінгвістичні змінні. Оскільки, окрім алгоритму управління, ключовими аспектами систем управління є вхідні та вихідні змінні, вони розглядаються як лінгвістичні змінні під час створення бази правил у системах нечіткого висновку.

5. Проаналізовано сфери застосування сучасних технологій управління. Показано, що класичні методи керування ефективно працюють у випадках повністю детермінованих об'єктів управління та середовища. Технології управління з використанням штучних нейронних мереж є дуже ефективними і застосовуються в ситуаціях високої складності об'єкта управління та обмеженої інформації про нього. Для систем з неповною інформацією і високою складністю об'єкта управління оптимальними є нечіткі методи управління.

6. Виконано аналіз факторів, які визначають вибір системи управління електроприводом механізму рольганга за ножицями стану гарячої прокатки. Обґрунтовано доцільність застосування нечіткого управління, яке в наш час є однією з найперспективніших

7. Сформульовано завдання дослідження, яке полягає в розробці не чіткої систем управління багатомасовою електромеханічною системою управління механізмом рольганга за ножицями стана гарячої прокатки, що забезпечують високу якість регулювання.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДЛЕГЛОГО РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Технічні дані механізму і силового електроустаткування. Вимоги до системи управління

У завданні на проектування дані основні характеристики механізму, електродвигуна, тиристорного перетворювача, згладжуючого реактора. У подальшому розділі роботи виконуємо перевірку двигуна по нагріву і перевантажувальній здатності.

Технічні характеристики рольганга.

Маса зливку $m_m = 6200 \div 8100 \text{ кг}$

Діаметр бочки ролика $d_p = 0,42 \text{ м}$

Довжина бочки ролика $l_p = 1,1 \text{ м}$

Кількість роликів секції $Z_p = 3$

Окружна швидкість на бочці ролика $V_p = 0,3 \div 2 = \text{м/с}$

Момент інерції на тихохідному валу редуктора:

незавантаженого рольганга $J_{mh} = 304 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

завантаженого рольганга (масою зливку $m_m = 8100 \text{ кг}$)

$J_{m3} = 613 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Діаметр шийки ролика $d_{ш} = 0,21 \text{ м}$

Маса ролика $m_p = 1200 \text{ кг}$

Максимальне число включень в годину $k_{\max} = 450$

Двигун постійного струму Д812

Номінальна потужність $P_n = 75 \text{ кВт}$

Номінальна напруга $U_n = 220 \text{ В}$

Номинальний струм якоря	$I_n = 380 \text{ A}$
Номинальна частота обертання	$n_n = 515 \text{ об/хв}$
Незалежне збудження	$U_{zn} = 220 \text{ B}$
Число активних провідників обмотки якоря	$N = 210$
Число паралельних гілок якоря	$2a = 2$
Число полюсів	$2p = 4$
Магнітний потік полюса	$\Phi_n = 57,2 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$
Номинальний струм збудження	$I_{zn} = 5,1 \text{ A}$
Опір якоря і додаткових полюсів	$R_y + R_{дп} = 0,023 \text{ Ом}$
Момент інерції	$J_{дв} = 7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Редуктор.

Передавальне число	$i = 5,4$
--------------------	-----------

Тиристорний електропривод КТЕУ 500/220 – 13222

Номинальна напруга	$U_{дн} = 220 \text{ B}$
Номинальний струм	$I_{дн} = 500 \text{ A}$

Трансформатор для тиристорного електроприводу ТСП-200/0,7У4

Номинальна напруга мережевої обмотки	$U_1 = 380 \text{ B}$
Номинальна фазна напруга вентильної обмотки	$U_{2\phi} = 115 \text{ B}$
Номинальна випрямлена напруга перетворювача	$U_{дн} = 230 \text{ B}$
Номинальна сила випрямленого струму	$I_{дн} = 500 \text{ A}$
Напруга короткого замикання	$U_{кз} = 5,4\%$

Вимоги до показників якості функціонування системи управління.

Система регулювання повинна бути астатичною. Перерегулювання швидкості при ступінчастій вхідній дії не більше 10%, час регулювання не більше 10 с.

2.2 Перевірка електродвигуна по нагріву і перевантажувальній здатності

Визначимо наступні моменти електроприводу.

Момент холостого ходу рольганга

$$M_x = \frac{Z_p G_p d_{ш} \mu_{ш}}{2i\eta_x},$$

де Z_p – число роликів;

G_p – вага одного ролика

$$G_p = m_p g;$$

$$G_p = 1200 \cdot 9,8 = 11760 \text{ Н}.$$

$d_{ш}$ – діаметр шийки роликів;

$\mu_{ш}$ – коефіцієнт тертя ковзання в підшипниках ролика; зазвичай приймається $\mu_{ш} = 0,008$ [35];

i – передавальне число редуктора;

η_x – ККД редуктора при холостому ході; згідно [35] приймаємо $\eta_x = 0,5\eta_n$, тоді $\eta_x = 0,47$

$$M_x = \frac{3 \cdot 11760 \cdot 0,21 \cdot 0,008}{2 \cdot 5,4 \cdot 0,47} = 14,7 \text{ Нм}.$$

Момент двигуна, необхідний для подолання сил інерції металу, роликів і двигуна

$$M_{дин} = 2a \left[\frac{Z_p J_p + J_m}{\eta_n i d_p} + \frac{i J_d}{d_p} \right],$$

де $a = \frac{dV}{dt}$ – лінійне прискорення роликів і металу; критичне прискорення $a_{кр}$

при транспортування металу без прослизання при гарячого плющення становить $a_{\text{кр}} = 1,47 \div 2,94 \text{ м/с}^2$; приймаємо $a = 2 \text{ м/с}^2$;

d_p – діаметр ролика;

η_n – ККД редуктора при номінальному режимі $\eta_n = 0,95$; .

J_p – момент інерції ролика щодо осі ролика;

J_m – момент інерції рухомого металу, приведений до осі ролика;

J_d – момент інерції двигуна і редуктора; приймаємо $J_d = 1,1 J_{\text{дв}}$;

$J_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна

$$J_d = 1,1 \cdot 7 = 7,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

У технічних умовах приведений результуючий момент інерції на тихохідному валу редуктора $J_{zm} = Z_p J_p + J_m = 613 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

$$M_{\text{дин}} = 2 \cdot 2 \cdot \left[\frac{613}{0,95 \cdot 5,4 \cdot 0,42} + \frac{5,4 \cdot 7,7}{0,42} \right] = 1483 \text{ Нм}.$$

Момент статистичного опору при транспортуванні металу

$$M_{\text{тр}} = M_x + \frac{G_m \cdot \left(\frac{d_{\text{ш}}}{2} \cdot \mu_{\text{ш}} + f \right)}{i \eta_x},$$

де f – коефіцієнт тертя кочення металу по роликах, рівний для гарячого металу $f = 0,15 \cdot 10^{-2}$;

G_m – сила тяжіння металу; при розрахунку моментів приймаємо

$$G_m = G_{m \text{ max}} = m_{m \text{ max}} \cdot g;$$

$$G_m = 8100 \cdot 9,8 = 79300 \text{ Н}.$$

Оскільки момент, потрібний для транспортування металу, зазвичай невеликий, то і в цьому випадку береться $\eta_x = 0,5\eta_n$

$$M_{\text{тр}} = 14,7 + \frac{79300 \cdot \left(\frac{0,21}{2} \cdot 0,008 + 0,0015 \right)}{5,4 \cdot 0,47} = 84,1 \text{ Нм}.$$

Статичний момент двигуна при буксуванні

$$M_{\text{б}} = \frac{(Z_p G_p + G_m) d_{\text{ш}} \mu_{\text{ш}} + G_m \mu_{\text{б}} d_p}{2i\eta_x},$$

де $\mu_{\text{б}}$ – коефіцієнт тертя металу про ролик при буксуванні, згідно [35]
 $\mu_{\text{б}} = 0,3$;

$$M_{\text{б}} = \frac{(3 \cdot 11760 + 79300) \cdot 0,21 \cdot 0,008 + 79300 \cdot 0,3 \cdot 0,42}{2 \cdot 5,4 \cdot 0,95} = 856 \text{ Нм}.$$

Повний момент двигуна, що розвивається
 при прискоренні

$$M_{\text{п}} = M_{\text{тр}} + M_{\text{дин}},$$

$$M_{\text{п}} = 84,1 + 1483 = 1567,1 \text{ Нм}.$$

при уповільненні

$$M_{\text{г}} = |M_{\text{тр}} - M_{\text{дин}}|,$$

$$M_{\text{г}} = |84,1 - 1483| = 1398,9 \text{ Нм}.$$

Для перевірки двигуна по тепловому режиму визначимо час розгону $t_{\text{п}}$, уповільнення $t_{\text{г}}$ і час робота із сталою швидкістю для найбільш важкого циклу

робота, при якому $V_p = V_{\max} = 2 \frac{M}{c}$

$$t_{\pi} = t_r = \frac{V_{\max}}{a} = \frac{2}{2} = 1 \text{ с}.$$

Час циклу робота при максимальному числі включень $k_{\max} = 450$

$$t_{\text{ц}} = \frac{3600}{k_{\max}},$$

$$t_{\text{ц}} = \frac{3600}{450} = 8 \text{ с}.$$

При тривалості включення ПВ = 40% час роботи складає

$$t_p = \frac{t_{\text{ц}}}{100} \cdot \text{ПВ} = \frac{8}{100} \cdot 40 = 3,2 \text{ с}.$$

Час робота із сталою швидкістю

$$t_y = t_{\text{ц}} - t_{\pi} - t_r = 1,2 \text{ с}.$$

Еквівалентний момент двигуна

$$M_e = \sqrt{\frac{M_{\pi}^2 t_{\pi} + M_r^2 t_r + M_c^2 t_y}{t_{\text{ц}}}},$$

$$M_e = \sqrt{\frac{1567,1^2 \cdot 1 + 1398,9^2 \cdot 1 + 84,1^2 \cdot 1,2}{8}} = 782 \text{ Нм}.$$

Номінальний момент двигуна

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n},$$

де

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30};$$

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 515}{30} = 53,9 \text{ c}^{-1},$$

$$M_n = \frac{75 \cdot 10^3}{53,9} = 1391 \text{ Нм}.$$

Оскільки $M_\epsilon < M_n$ то по тепловому режиму двигун відповідає вимогам

Гранично-виправдовуваний момент

$$M_{гв} = \frac{(Z_p G_p + G_m) d_{ш} \mu_{ш} \pm G_m \beta \mu_6 d_p}{2i\eta_n} \pm 2a_{кр} \left(\frac{Z_p J_p}{i\eta_n d_p} + i \frac{J_d}{d_p} \right).$$

Знак плюс відповідає прискоренню, а мінус – уповільненню привода

$Z_p J_p = J_{мн}$ – момент інерції незавантаженого рольганга;

Величина гранично-виправдовуваного моменту використовується для перевірки двигуна по перевантажувальній здатності.

Прискорення привода:

$$M_{гв} = \frac{(3 \cdot 11760 + 79300) \cdot 0,21 \cdot 0,008 + 79300 \cdot 0,3 \cdot 0,42}{2 \cdot 5,4 \cdot 0,95} +$$

$$+ 2 \cdot 2,94 \cdot \left(\frac{304}{5,4 \cdot 0,95 \cdot 0,42} + 5,4 \cdot \frac{7}{0,42} \right) = 2269 \text{ Нм}$$

Уповільнення привода

$$M_{гв} = \frac{(5 \cdot 11760 + 78400) \cdot 0,21 \cdot 0,008 - 78400 \cdot 0,3 \cdot 0,42}{2 \cdot 5,4 \cdot 0,95} -$$

$$-2 \cdot 2,94 \cdot \left(\frac{304}{5,4 \cdot 0,95 \cdot 0,42} + 5,4 \cdot \frac{7}{0,42} \right) = 1972 \text{ Нм}.$$

Перевантажувальна здатність двигуна постійного $\lambda = 2 \div 2,5$, отже, допустимий момент двигуна

$$M_{\text{доп}} = \lambda M_{\text{н}},$$

$$M_{\text{доп}} = 2 \cdot 1391 = 2782 \text{ Нм}.$$

Оскільки $M_{\text{гв}} < M_{\text{доп}}$, то по перевантажувальній здатності двигун відповідає вимогам.

2.3 Розрахунок параметрів силового кола електроприводу

Коефіцієнт посилення тиристорного перетворювача

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

де $E_{\text{д0}}$ – ЕРС холостого ходу перетворювача, для трифазної мостової схеми випрямлення

$$E_{\text{д0}} = 2,34 \cdot U_{2\phi},$$

$U_{2\phi}$ – фазна напруга вторинної обмотки трансформатора

$$E_{\text{д0}} = 2,34 \cdot 115 = 269 \text{ В},$$

$U_{\text{м}}$ – амплітудне значення напруги порівняння; приймаємо $U_{\text{м}} = 10 \text{ В}$

$$k_{\text{тп}} = \frac{269}{10} = 26,9 \approx 27.$$

Номинальна ЕРС обертання двигуна

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} - I_{\text{н}} R_{\text{як}},$$

$$E_{\text{н}} = 220 - 380 \cdot 0,313 = 208 \text{ В}.$$

Постійна проти-ЕРС

$$c = k \Phi_{\text{н}} = \frac{E_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}},$$

де k – конструктивна постійна двигуна;

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

$$c = k \Phi_{\text{н}} = \frac{208}{53,9} = 3,86.$$

Коефіцієнт посилення двигуна

$$k_{\text{д}} = \frac{1}{c},$$

$$k_{\text{д}} = \frac{1}{3,86} = 0,26.$$

Еквівалентний опір трансформатора, викликаний реактанцем розсіяння

$$R_{\text{екв}} = 0,5 \cdot U_{\text{к}} \cdot \frac{E_{\text{д0}}}{I_{\text{дн}}},$$

де $I_{\text{дн}}$ – сила номінального випрямлення струму;

$U_{\text{к}}$ – напруга короткого замикання трансформатора;

$$R_{\text{екв}} = 0,5 \cdot 0,054 \cdot \frac{269}{500} = 0,0142 \text{ Ом}.$$

Активний опір трансформатора

$$R_T = (0,1 \div 0,2) \cdot U_k \cdot \frac{\pi}{m} \cdot \frac{E_{d0}}{I_{дн}},$$

m – фазність пульсації випрямленої напруги перетворювача; для трифазної мостової схеми $m = 6$

$$R_T = 0,15 \cdot 0,054 \cdot \frac{3,14}{6} \cdot \frac{269}{500} = 0,0024 \text{ Ом}.$$

Опір якірного ланцюга електродвигуна

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

де $R_{я}$, $R_{дп}$, $R_{ко}$ – активний опір обмотки якоря, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки відповідно; згідно паспортних даних електродвигуна $R_{я} + R_{дп} = 0,023 \text{ Ом}$; $R_{ко} = 0$;

α_t – температурний коефіцієнт; $\alpha_t = 1,36$

$$R_{як} = 1,36 \cdot 0,023 = 0,0313 \text{ Ом}.$$

Активний опір силового ланцюга

$$R_{\Sigma} = R_{як} + R_T + R_{екв},$$

$$R_{\Sigma} = 0,0313 + 0,0024 + 0,0142 = 0,0482 \text{ Ом}.$$

Індуктивне розсіяння трансформатора

$$L_T = U_k \cdot \frac{1}{2mf} \cdot \frac{E_{d0}}{I_{дн}},$$

де f – частота живлячої мережі

$$L_{\tau} = 0,054 \cdot \frac{1}{2 \cdot 6 \cdot 50} \cdot \frac{269}{500} = 0,457 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}.$$

Індуктивність якірного ланцюга двигуна

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

де γ – коефіцієнт, рівний 0,6 для компенсованих двигунів;

p – число пар головних полюсів

$$L_{\text{я}} = 0,6 \cdot \frac{220}{380} \cdot \frac{1}{53,3 \cdot 2} = 0,00229 \text{ Гн}.$$

Індуктивність головного ланцюга

$$L_{\Sigma} = L_{\text{я}} + L_{\tau},$$

$$L_{\Sigma} = 0,00229 + 0,457 \cdot 10^{-4} = 0,00234 \text{ Гн}.$$

Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга

$$T_{\text{е}} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}},$$

$$T_{\text{е}} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{0,00234}{0,0481} = 0,048 \text{ с}.$$

Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга електродвигуна

$$T_{\text{а}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{як}}},$$

$$T_{\text{а}} = \frac{0,00229}{0,0313} = 0,053 \text{ с}.$$

Електромеханічну постійну часу електроприводу визначаємо для режиму, коли рольганг завантажений злитком максимальної ваги

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\text{м}} R_{\Sigma}}{c^2},$$

де $J_{\text{м}}$ – сумарний момент інерції на валу електродвигуна

$$J_{\text{м}} = 1,1 \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мз}}}{i^2},$$

$$J_{\text{м}} = 1,1 \cdot 7 + \frac{613}{5,4^2} = 7,7 + 21,8 = 29,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$T_{\text{м}} = \frac{29,5 \cdot 0,0482}{3,86^2} = 0,095 \text{ с}.$$

2.4 Вибір структури системи автоматичного регулювання координат електроприводу

Система регулювання повинна гарантувати необхідні механічні характеристики електроприводу як у статичному, так і в динамічному режимах, забезпечувати високу якість перехідних процесів і оптимізувати роботу електроприводу відповідно до заданих показників у різних режимах експлуатації механізму. Досягти високих результатів у регулюванні можливо лише при створенні замкнених систем. Тому, згідно з рекомендаціями [48], для електроприводу рольганга застосовується двоконтурна система підлеглого регулювання з внутрішнім контуром струму та зовнішнім контуром швидкості, що замкнений по ЕРС двигуна.

2.5 Синтез послідовного коректуючого пристрою контура струму

Розрахунок і оптимізація контура струму проводиться при наступних допущеннях.

1. Розглядається реверсивна схема управління електричним приводом з роздільним управлінням вентильними групами. Наявність зрівняльних струмів виключається.

2. Наявність фільтру на вході датчика струму з постійною часу $T_{\text{дт}}$ забезпечує згладжування напруги зворотного зв'язку і постійний коефіцієнт посилення аналогових підсилювачів схеми.

3. На вході СІФУ встановлений фільтр з постійною часу $T_{\text{ф}}$.

4. Вплив протити ЕРС двигуна не враховується.

Алгоритмічна схема контура струму приведена на рис.2.1 а.

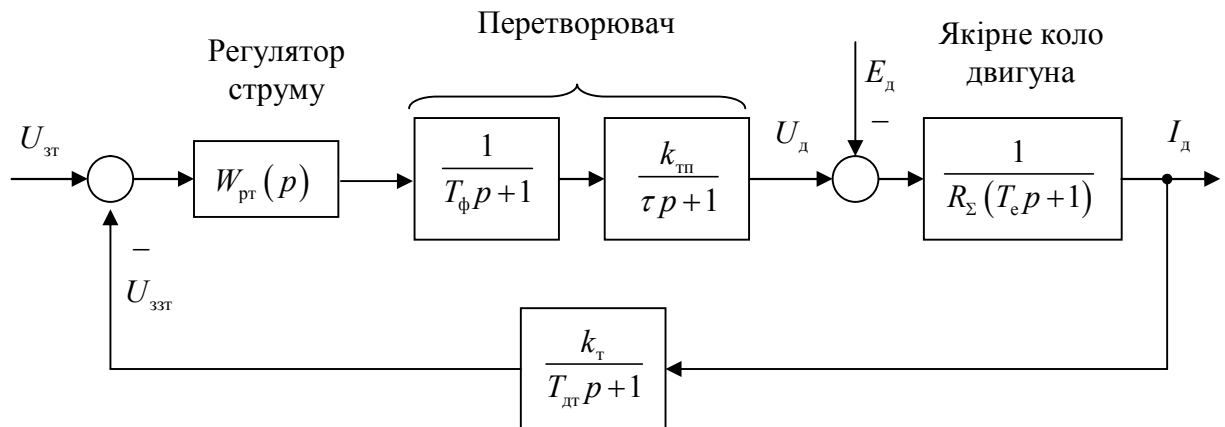
Для того, щоб можна було скористатися загальноприйнятою методикою синтезу послідовних коректуючих пристроїв, перетворимо алгоритмічну схему до схеми з одиничним зв'язком. Одержимо схему, показану на рис.2.1 б.

Некомпенсована мала постійна часу контура струму $T_{\text{мт}}$ рівна сумі малих постійних часу ланок системи, тобто $T_{\text{мт}} = T_{\text{ф}} + T_{\text{дт}} + \tau$. З урахуванням цього, схема, приведена на рис. 2.1 б, перетвориться до вигляду, показаному на рис.2.1 в. Форсуєча ланка $(1 + T_{\text{дт}}p)$ на вході системи згідно загальноприйнятій методиці не враховується.

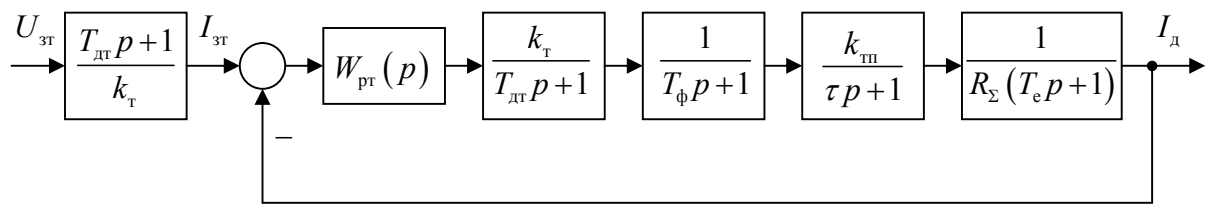
Величиною $T_{\text{мт}}$ задамося у встановлених практикою межах $(4 \div 10) \text{мс}$. Приймаємо $T_{\text{мт}} = 5 \text{мс}$.

Оптимізацію контура струму виконаємо на основі використання модульного критерію, згідно якому передавальна функція розімкненого оптимізованого контура має вид:

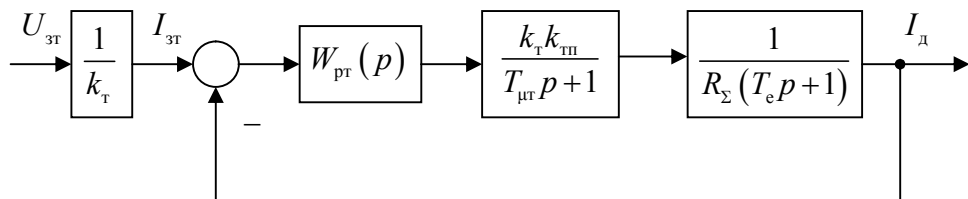
$$W_{\text{от}}(p) = \frac{1}{2T_{\text{мт}}p \cdot (1 + T_{\text{мт}}p)}.$$



а)



б)



в)

Рисунок 2.1 – Алгоритмічні схеми контура струму:
а – вихідна схема; б – схема, перетворена до одиничного зворотного зв'язку; в – розрахункова алгоритмічна схема

Відповідно до рис.2.1 в передавальна функція об'єкту управління

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

де $k_{\text{т}}$ – коефіцієнт посилення ланцюга зворотного зв'язку по струму

Оскільки

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

то, передавальна функція регулятора струму

$$\begin{aligned} W_{\text{рт}}(p) &= \frac{W_{\text{бт}}(p)}{W_{\text{обт}}(p)} = \frac{1}{\frac{2T_{\text{мт}}p \cdot (1 + T_{\text{мт}}p)}{\frac{k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}}{R_{\Sigma}(1 + T_{\text{мт}}p)(1 + T_{\text{е}}p)}}} = \\ &= \frac{R_{\Sigma}}{2T_{\text{мт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \frac{1 + T_{\text{е}}p}{p} = k_{\text{рт}} \frac{1 + T_{\text{е}}p}{p}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

де $k_{\text{рт}}$ – коефіцієнт посилення регулятора струму

$$k_{\text{рт}} = \frac{R_{\Sigma}}{2T_{\text{мт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}}.$$

Величину максимального струму якірного ланцюга визначимо з рекомендованих співвідношень $I_{\text{max}} = 2,5I_{\text{н}} = 2,5 \cdot 380 = 950 \text{ A}$. Величину максимальної напруги завдання струму $U_{\text{зт max}}$ (вихідна напруга регулятора ЕРС) приймемо рівною $U_{\text{зт max}} = 24 \text{ В}$. Таким чином, коефіцієнт посилення ланцюга зворотного зв'язку по струму:

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

$$k_{\text{т}} = \frac{24}{950} = 0,025 \text{ В / А}.$$

Для отримання сигналу, пропорційного струму якірного ланцюга використовуємо шунт нормалізованої серії з номінальним струмом $I_{\text{шн}} = 950 \text{ A}$ і номінальною напругою $U_{\text{шн}} = 75 \text{ мВ}$.

Коефіцієнт посилення шунта

$$k_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{шн}}}{I_{\text{шн}}},$$

$$k_{\text{ш}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{950} = 0,079 \cdot 10^{-3} \text{ В/А}.$$

Коефіцієнт посилення датчика струму

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

$$k_{\text{дт}} = \frac{0,025}{0,079 \cdot 10^{-3}} = 316.$$

Отриману передавальну функцію регулятора струму $W_{\text{рт}}(p)$ можна реалізувати за допомогою типового пропорційно-інтегрального регулятора. Принципова схема ПІ-регулятора приведена на рис. 2.2.

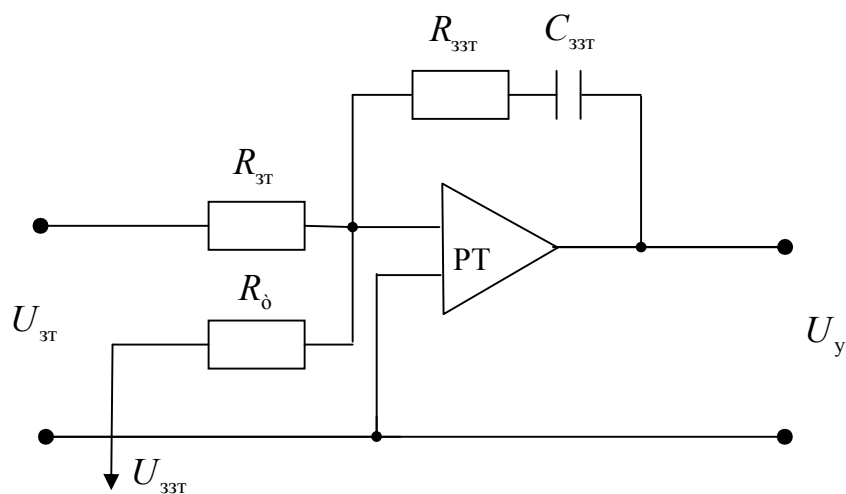


Рисунок 2.2 – Принципова схема регулятора струму на базі операційного підсилювача

Розрахунок параметрів регулятора контура струму проводиться на основі співвідношень, отриманих на підставі зіставлення передавальних функцій регулятора струму (2.1) і типового ПІ-регулятора

$$T_{\text{рт}} = T_{\text{е}} = R_{\text{ззт}} C_{\text{ззт}} ; \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{C_{\text{ззт}} R_{\text{т}}} = k_{\text{рт}} = \frac{R_{\Sigma}}{2T_{\mu\text{т}} k_{\text{тп}} k_{\text{т}}} . \quad (2.3)$$

Задавшись величиною вхідних опорів $R_{\text{т}} = R_{\text{зт}} = 50 \text{ кОм}$, з (2.3) визначимо значення $C_{\text{ззт}}$

$$C_{\text{ззт}} = \frac{2T_{\mu\text{т}} k_{\text{тп}} k_{\text{т}}}{R_{\Sigma} R_{\text{т}}} ,$$

$$C_{\text{ззт}} = \frac{2 \cdot 0,005 \cdot 27 \cdot 0,025}{0,0482 \cdot 50 \cdot 10^3} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} .$$

З виразу (2.2) визначимо $R_{\text{ззт}}$

$$R_{\text{ззт}} = \frac{T_{\text{е}}}{C_{\text{ззт}}} = \frac{0,048}{2,8 \cdot 10^{-6}} = 17,1 \cdot 10^3 \text{ Ом} .$$

Передавальна функція замкнутого оптимізованого контура струму має вид:

$$W_{\text{зт}}(p) = \frac{1}{k_{\text{т}}} \cdot \frac{1}{2T_{\mu\text{т}}^2 p^2 + 2T_{\mu\text{т}} p + 1} . \quad (2.4)$$

2.6 Синтез послідовного коректуючого пристрою контура ЕРС

На рис. 2.3 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 якірного ланцюга (сигнал струмової компенсації).

Сигнал, пропорційний напрузі двигуна, знімається з двигуна R_d і подається на один з входів датчика ЕРС 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 застосовується операційний підсилювач з гальванічно розділеним входом і виходом. Цей підсилювач має два виходи, один з яких служить для обхвату підсилювача зворотним зв'язком через вбудований опір $R_{де}$. Другий вхід системи, гальванічно відокремлений від першого, призначений для зв'язку з системою регулювання. Фільтр $R_{зе} C_{зе}$ виконує функцію аперіодичної ланки з постійною часу T_a на вході системи.



Рисунок 2.3 – Принципова схема системи із зворотним зв'язком по ЕРС.

На рис. 2.4 показана алгоритмічна схема системи. Оптимізований по модульному критерію контур струму представлений аперіодичною ланкою

$$W_{\text{зт}}(p) = \frac{1/k_T}{2T_{\text{мт}}p + 1}.$$

Дана передавальна функція виходить при зневазі доданком $2T_{\text{мт}}^2 p^2$ у знаменнику передавальної функції контура струму (2.4).

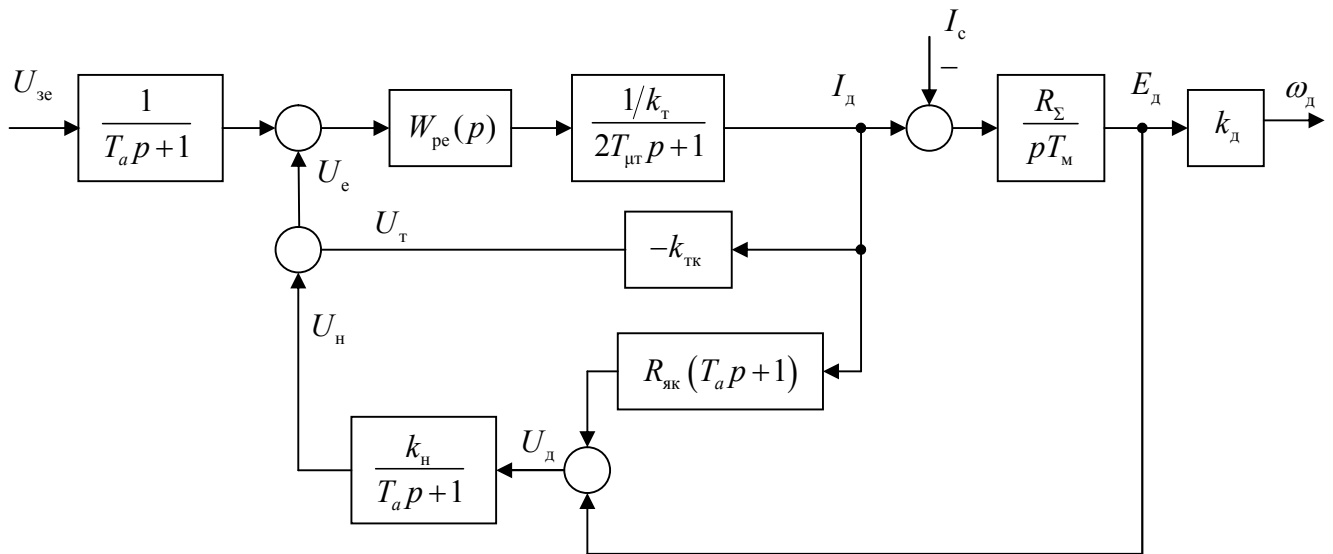


Рисунок 2.4 – Алгоритмічна схема системи регулювання швидкості із зворотним зв'язком по ЕРС

Коефіцієнти посилення ланцюга струмової компенсації вибирається таким чином:

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

де $k_{\text{н}}$ – коефіцієнт посилення ланцюга зворотного зв'язку по напрузі.

Сигнал на вході датчика ЕРС рівний

$$U_{\text{е}} = U_{\text{н}} - U_{\text{т}} = \frac{k_{\text{н}}}{T_a p + 1} E_{\text{дв}}.$$

Алгоритмічна схема рис.2.4 шляхом еквівалентних перетворювачів перетворюється в схему рис.2.5. На рис. 2.6 показана розрахункова схема з одиничним зворотним зв'язком.

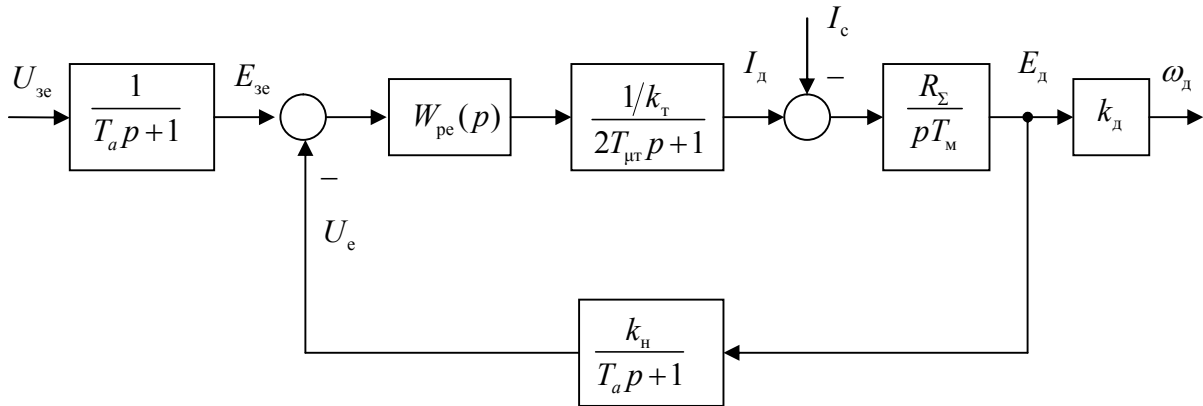


Рисунок 2.5 – Перетворена алгоритмічна схема системи

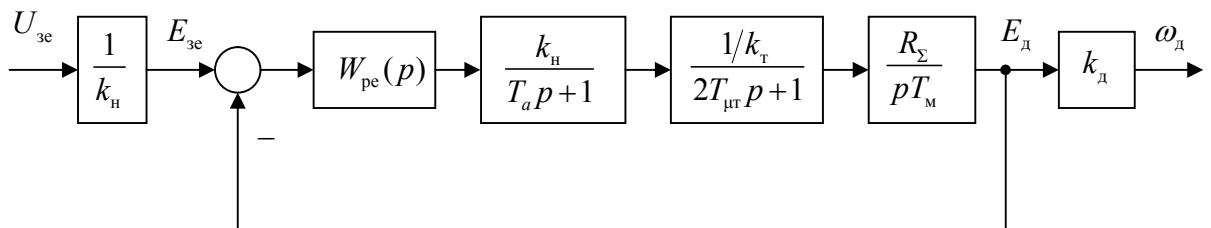


Рисунок 2.6 – Розрахункова алгоритмічна схема системи
з одиничним зворотним зв'язком

Оптимізацію ЕРС струму виконаємо на основі використання симетричного критерію, згідно якому передавальна функція оптимізованого розімкненого контура має вид:

$$W_{\text{бе}}(p) = \frac{1 + 4T_{\mu\epsilon}p}{8T_{\mu\epsilon}^2 p^2 (1 + T_{\mu\epsilon}p)},$$

$$T_{\mu\epsilon} = 2T_{\text{ит}} + T_a,$$

$$T_{\mu\epsilon} = 2 \cdot 0,005 + 0,053 = 0,063 \text{ с.}$$

Відповідно до рис.2.6 передавальна функція об'єкту управління

$$W_{\text{обє}}(p) = \frac{k_{\text{н}}}{T_a p + 1} \cdot \frac{1/k_{\text{т}}}{2T_{\text{мт}} p + 1} \cdot \frac{R_{\Sigma}}{T_{\text{м}} p} = \frac{R_{\Sigma} k_{\text{н}} / k_{\text{т}}}{T_{\text{м}} p (T_a p + 1) (2T_{\text{мт}} p + 1)} =$$

$$= \frac{R_{\Sigma} k_{\text{н}} / k_{\text{т}}}{T_{\text{м}} p \left[2T_{\text{мт}} T_a p^2 + (2T_{\text{мт}} + T_a) + 1 \right]}. \quad (2.5)$$

Нехтуючи доданком $2T_{\text{мт}} T_a p^2$ в знаменнику передатної функції (2.5), одержуємо

$$W_{\text{обє}}(p) = \frac{R_{\Sigma} k_{\text{н}} / k_{\text{т}}}{T_{\text{м}} p (T_{\text{ме}} p + 1)}.$$

Оскільки

$$W_{\text{бє}}(p) = W_{\text{ре}}(p) \cdot W_{\text{обє}}(p),$$

то, передавальна функція регулятора ЕРС

$$W_{\text{ре}}(p) = \frac{W_{\text{бє}}(p)}{W_{\text{обє}}(p)} = \frac{\frac{1 + 4T_{\text{ме}} p}{8T_{\text{ме}}^2 p^2 (1 + T_{\text{ме}} p)}}{\frac{R_{\Sigma} k_{\text{н}} / k_{\text{т}}}{T_{\text{м}} p (T_{\text{ме}} p + 1)}} = \frac{T_{\text{м}} k_{\text{т}}}{2k_{\text{н}} T_{\text{ме}} R_{\Sigma}} \cdot \frac{4T_{\text{ме}} p + 1}{4T_{\text{ме}} p} = k_{\text{ре}} \cdot \frac{4T_{\text{ме}} p + 1}{4T_{\text{ме}} p}, \quad (2.6)$$

де $k_{\text{ре}}$ – коефіцієнт посилення регулятора ЕРС

$$k_{\text{ре}} = \frac{T_{\text{м}} k_{\text{т}}}{2k_{\text{н}} T_{\text{ме}} R_{\Sigma}}.$$

Передатна функція (2.6) реалізується за допомогою типового ПІ-регулятора, принципова схема якого показана на рис.2.7.

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

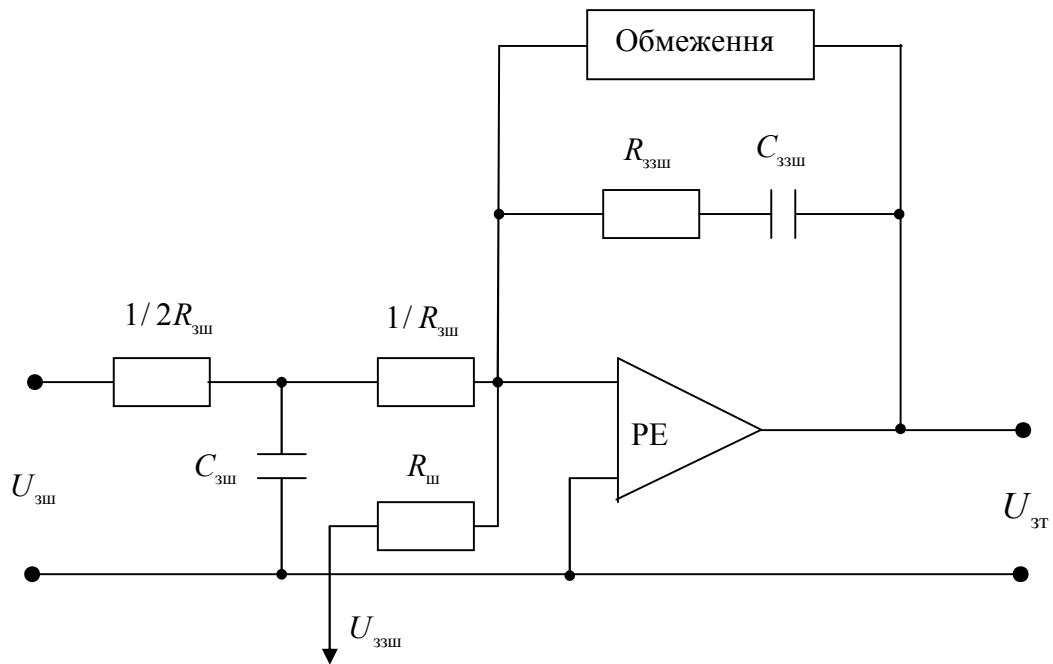


Рисунок 2.7 – Принципова схема ПІ-регулятора контура ЕРС

Коефіцієнт посилення k_n

$$k_n = \frac{U_{3\epsilon \max}}{E_{дв \max}},$$

де $E_{дв \max}$ – максимальна ЕРС двигуна;

$U_{3\epsilon \max}$ – напруга завдання, відповідне $E_{дв \max}$, приймаємо $U_{3\epsilon \max} = 24 \text{ В}$.

У якості $E_{дв \max}$ приймемо ЕРС в режимі ідеального холостого ходу, тобто

$E_{дв \max} = U_n = 220 \text{ В}$, тоді

$$k_n = \frac{24}{440} = 0,05454$$

Зіставляючи передавальну функцію (2.6) з передавальною функцією типового ПІ-регулятора, отримуємо наступні рівняння:

$$R_{33\epsilon} C_{33\epsilon} = 4T_{\mu\epsilon}, \quad (2.7)$$

$$\frac{R_{33\epsilon}}{R_{3\epsilon}} = \frac{T_M k_T}{2T_{\mu\epsilon} k_n R_{\Sigma}}. \quad (2.8)$$

Задаємося величиною ємності $C_{\text{ззе}} = 5 \cdot 10^{-6} \Phi$, тоді з (2.7)

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

$$R_{\text{ззе}} = \frac{4 \cdot 0,063}{5 \cdot 10^{-6}} = 50,4 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Із співвідношення (2.8) знаходимо

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

$$R_{\text{зе}} = \frac{50,4 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0,063 \cdot 0,1091 \cdot 0,0482}{0,095 \cdot 0,03} = 11,7 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Приймаємо $R_{\text{едс}} = R_{\text{зе}} = 11,7 \cdot 10^3 \text{ Ом}$.

З виразу для коефіцієнта посилення зворотного зв'язку по напрузі

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

визначаємо

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

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

$k_{\text{д дв}}$ – коефіцієнт посилення двигуна напруги; значення $k_{\text{д дв}}$ визначається з умови отримання сигналу 24 В на вході датчика ЕРС при максимальній напрузі двигуна $U_{\text{дв max}}$

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

$$k_{\text{ддв}} = \frac{24}{220} = 0,1091.$$

$$R_{\text{н}} = \frac{0,1091}{0,1091} \cdot \frac{11,7 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^3}{11,7 \cdot 10^3} = 50 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Передавальний коефіцієнт струмової компенсації

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

$$k_{\text{тк}} = 0,1091 \cdot 0,0313 = 3,4 \cdot 10^{-3}.$$

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

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

$$R_{\text{тк}} = \frac{0,094 \cdot 10^{-3}}{3,4 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{11,7 \cdot 10^{-3}}{11,7 \cdot 10^{-3}} \cdot 50 \cdot 10^3 = 1,38 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

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

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

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

$$C_{\text{зе}} = \frac{4 \cdot 0,053}{11,7 \cdot 10^3} = 18,1 \cdot 10^{-6} \Phi,$$

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

$$C_{\text{н}} = \frac{4 \cdot 0,053}{50 \cdot 10^3} = 4,24 \cdot 10^{-6} \Phi.$$

На рис. 2.8 показана алгоритмічна схема системи.

Передавальні функції системи, оптимізованої по симетричному критерію, мають вид

$$W_{\omega_{\text{д}} U_{\text{зе}}}(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{U_{\text{зе}}(p)} \bigg|_{\substack{I_{\text{ст}} = 0 \\ \Phi_{\text{н}} = \text{const}}} = \frac{k_{\text{д}}}{k_{\text{н}}} \cdot \frac{1 + 4T_{\mu\epsilon}p}{8T_{\mu\epsilon}^3 p^3 + 8T_{\mu\epsilon}^2 p^2 + 4T_{\mu\epsilon}p + 1},$$

$$W_{\omega_{\text{д}} I_{\text{ст}}}(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)} \bigg|_{\substack{\Phi_{\text{н}} = \text{const} \\ U_{\text{зе}} = \text{const}}} = \frac{8T_{\mu\epsilon}^2 k_{\text{д}} R_{\Sigma}}{T_{\text{м}}} \cdot \frac{p(1 + T_{\mu\epsilon}p)}{8T_{\mu\epsilon}^3 p^3 + 8T_{\mu\epsilon}^2 p^2 + 4T_{\mu\epsilon}p + 1},$$

$$W_{I_{\text{д}} U_{\text{зе}}}(p) = \frac{I_{\text{д}}(p)}{U_{\text{зе}}(p)} \bigg|_{\substack{I_{\text{ст}} = 0 \\ \Phi_{\text{н}} = \text{const}}} = \frac{T_{\text{м}}}{k_{\text{н}} R_{\Sigma}} \cdot \frac{p(1 + 4T_{\mu\epsilon}p)}{8T_{\mu\epsilon}^3 p^3 + 8T_{\mu\epsilon}^2 p^2 + 4T_{\mu\epsilon}p + 1},$$

$$W_{I_{\text{д}} I_{\text{ст}}}(p) = \frac{I_{\text{д}}(p)}{I_{\text{ст}}(p)} \bigg|_{\substack{\Phi_{\text{н}} = \text{const} \\ U_{\text{зе}} = \text{const}}} = \frac{1 + 4T_{\mu\epsilon}p}{8T_{\mu\epsilon}^3 p^3 + 8T_{\mu\epsilon}^2 p^2 + 4T_{\mu\epsilon}p + 1}.$$

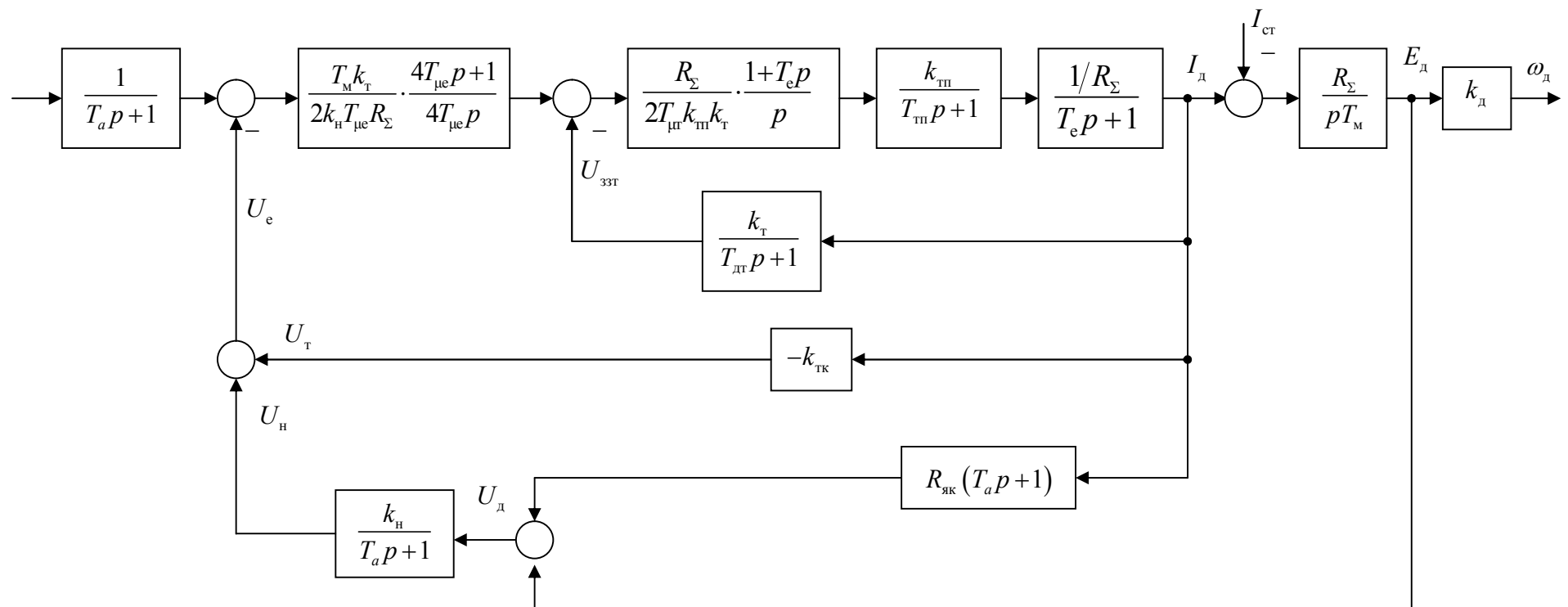


Рисунок 2.8 – Алгоритмічна схема системи

2.7 Дослідження динамічних характеристик системи

Для побудови перехідних процесів розроблена модель системи на ЕОМ за допомогою пакету MATLAB в режимі SIMULINK. Схема моделі показана на рис.2.9. На рис. 2.10 приведені графіки перехідних процесів швидкості ω_d і струму I_d електроприводу по задаючій дії. При налаштуванні системи на симетричний оптимум є значне (43,3%) перерегулювання швидкості. Для зменшення перерегулювання на вихід системи доцільно включити фільтр з постійною часу, рівною $4T_{\mu c}$, 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 рис. 2.11 показані графіки перехідних процесів швидкості і струму електроприводу по збурюючій дії.

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

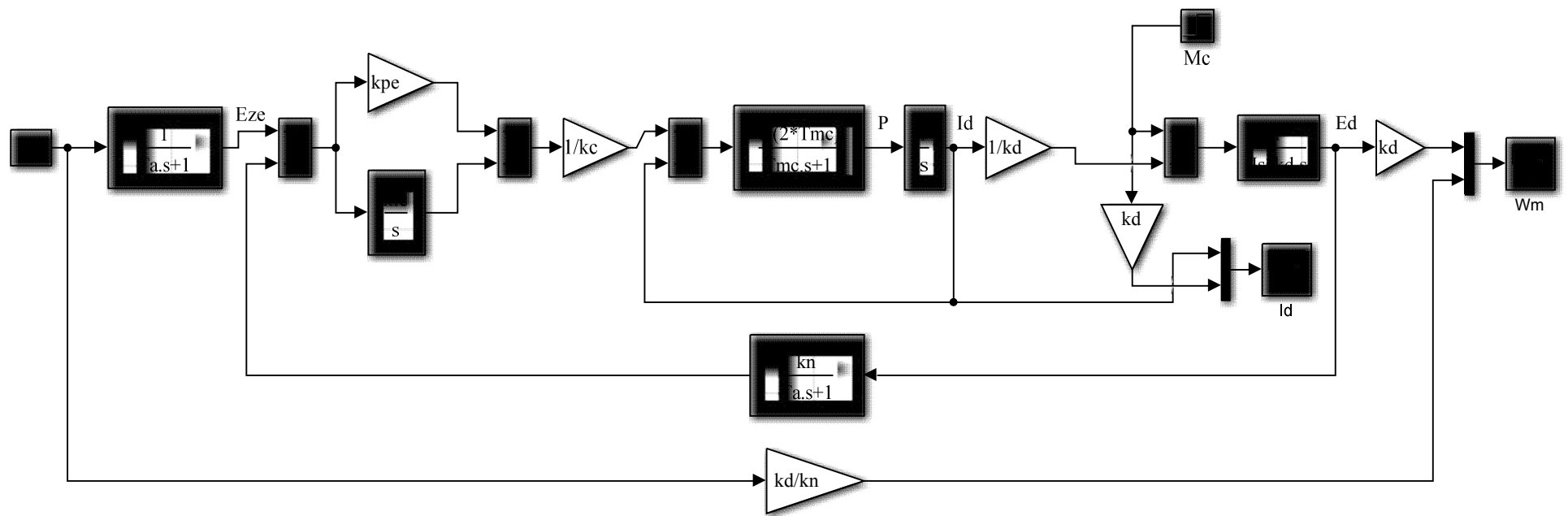


Рисунок 2.9 – Схема моделі системи, розроблена в MATLAB

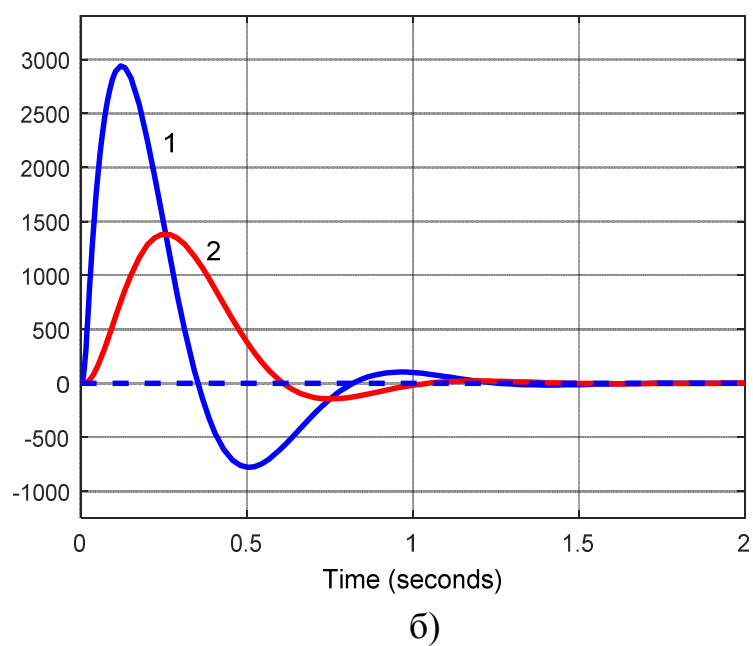
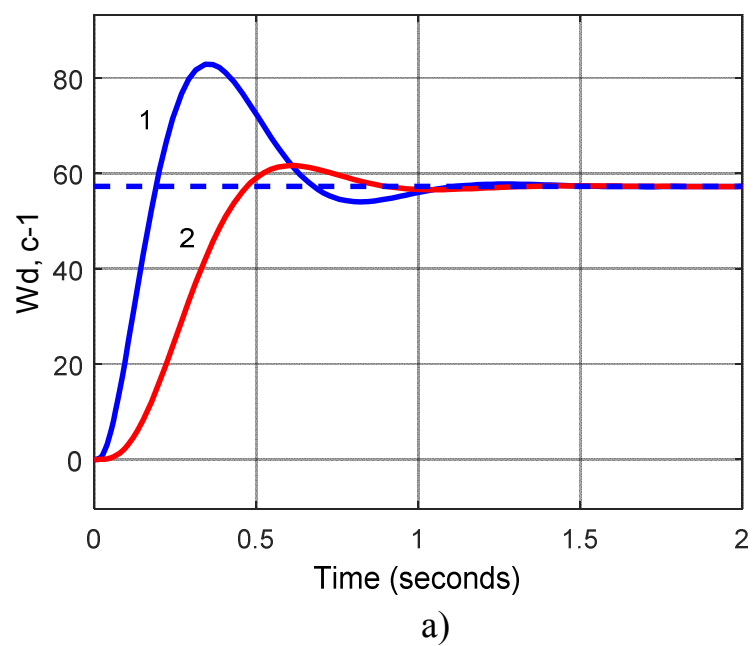


Рисунок 2.10 – Графіки перехідних процесів швидкості $\omega_d = f(t)$ а) і струму

$I_d = f(t)$ б) по задаючій дії

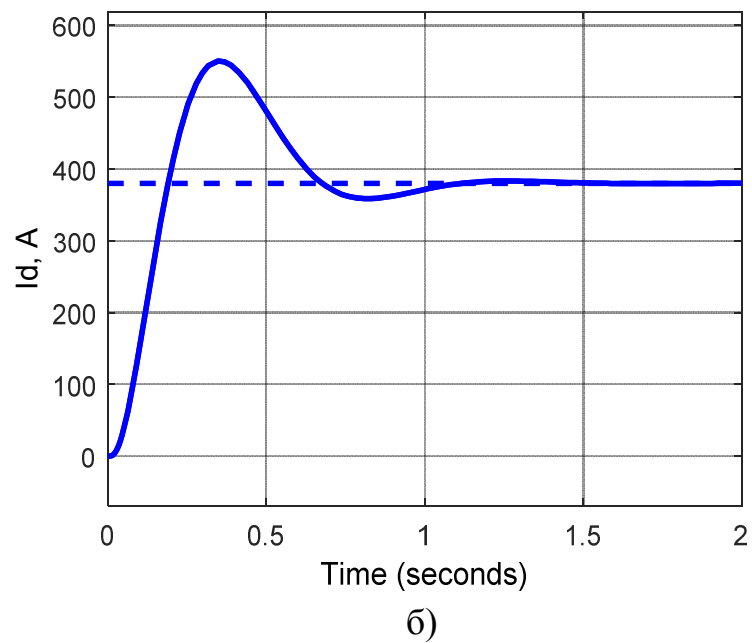
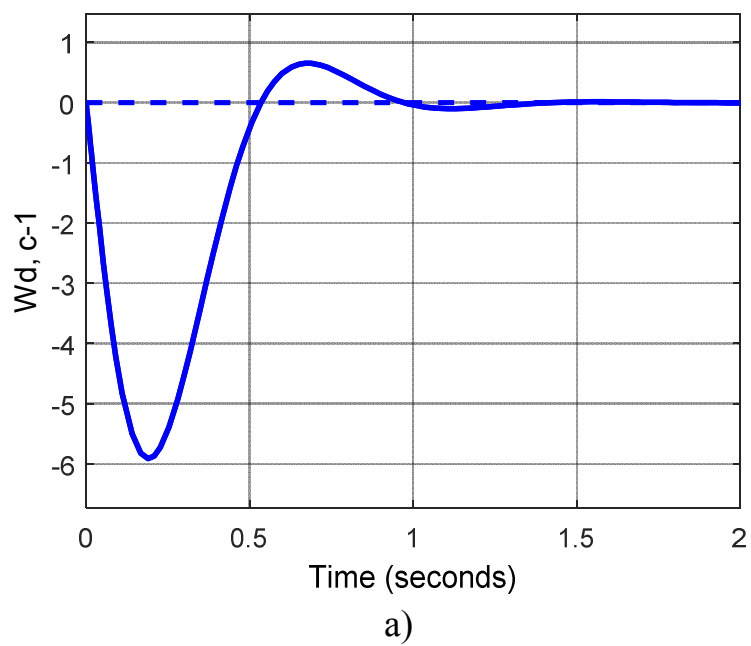


Рисунок 2.11 – Графіки перехідних процесів швидкості $\omega_d = f(t)$ а) і струму $I_d = f(t)$ б) по збурюючій дії

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. На підставі аналізу технічних характеристик допоміжних механізмів прокатних станів і умов експлуатації електроприводів рольгангів вибраний електропривод постійного струму, виконаний за системою ТП–Д. Для управління координатами електроприводу застосована система підлеглого регулювання.

2. Виконана перевірка двигуна за умовами нагріву і перевантажувальній здатності при роботі електроприводу в різних режимах, передбачених технологічним процесом. Отримане при розрахунку значення еквівалентного моменту показує, що розраховані значення пускового і гальмівного моментів забезпечують інтенсивне протікання перехідних процесів при одночасному допустимому навантаженні електродвигуна по нагріву. Оскільки електродвигун допускає короткочасне перевантаження $(2 \div 2,5)M_n$, то 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 керування, яка повинна забезпечити не лише потрібні механічні характеристики електроприводу у статичній та динамічній, але й забезпечити високу якість перехідних процесів і оптимізацію роботи електроприводу за заданими параметрами в різних режимах механізму рольганга. Тому для електроприводу механізму рольганга було обрано двоконтурну систему підлеглого регулювання, де внутрішній контур регулює струм, а зовнішній - швидкість, що є замкненим за ЕРС двигуна. Також для поліпшення динамічних властивостей системи, у контур регулювання струму введено підлеглий контур регулювання напруги тиристорного перетворювача.

5. Проведений синтез послідовних коректуючих пристроїв контурів. Оскільки характер перехідного процесу визначається співвідношеннями постійних часу елементів системи, тому формування високоякісних перехідних процесів пов'язане із забезпеченням необхідних значень вказаних співвідношень шляхом введення коректуючих регуляторів. Для контура для контурів струму і ЕРС син-

тезовані ПІ-регулятори, унаслідок чого контур струму оптимізований по модульному критерію, а контур ЕРС – по симетричному критерію. Система є астатичною з астатизмом другого порядку задаючій, і астатичною з астатизмом першого порядку по збурюючій дії.

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 процесів 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 СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Математична модель двомасової системи

Дослідження динамічних характеристик системи управління електроприводом рольганга проведено в припущенні нескінченної жорсткості всіх зв'язків між елементами механічної частини системи. Представлення механічної частини жорсткою приведеною ланкою відображає дійсний характер рухів елементів тільки в середньому, оскільки не враховує вплив пружності реальних механічних зв'язків. Внаслідок кінцевої жорсткості цих зв'язків механічна частина електроприводу є пружною системою, додаток до якої дії моменту двигуна або збурюючої дії(моменту статичного навантаження), що управляє, викликає коливання зв'язаних мас, що збільшують максимальні навантаження зв'язків і ускладнюють точність обробки необхідних рухів і переміщень.

Податливість механізму обертання рольганга пов'язана з кінцевою жорсткістю зв'язку між двигуном і рольгангом. Така система може розглядатися як двомасова (рис. 3.1).

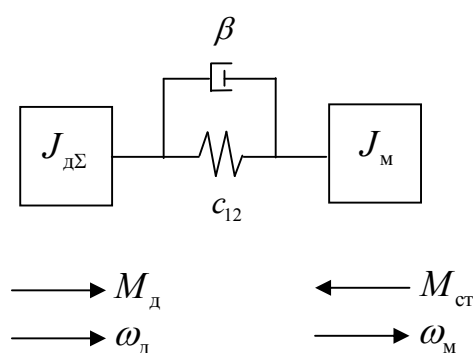


Рисунок 3.1 – Двомасова розрахункова схема

Параметрами двомасової системи є сумарний момент інерції якоря двигуна і жорстко пов'язаних з ним елементів $J_{дΣ}$, сумарний приведений до швидкості двигуна момент інерції механізму $J_{м}$ і безінерційний пружний зв'язок між

ними, що характеризується приведеною еквівалентною жорсткістю c_{12} і коефіцієнтом внутрішнього в'язкого тертя каната між масами β .

Рівняння динаміки, що описують процеси в двомасовій системі при приведенні всіх елементів до швидкості валу двигуна, мають вид:

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

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

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

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

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

$M_{\text{ст}}$ – момент статичного навантаження, прикладений до другої маси.

Розглянемо двомасову систему підлеглого регулювання швидкості з контуром струму, настроєним по модульному критерію і контуро ЕРС, настроєним по симетричному критерію. Алгоритмічна схема двомасової системи показана на рис. 3.2.

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

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

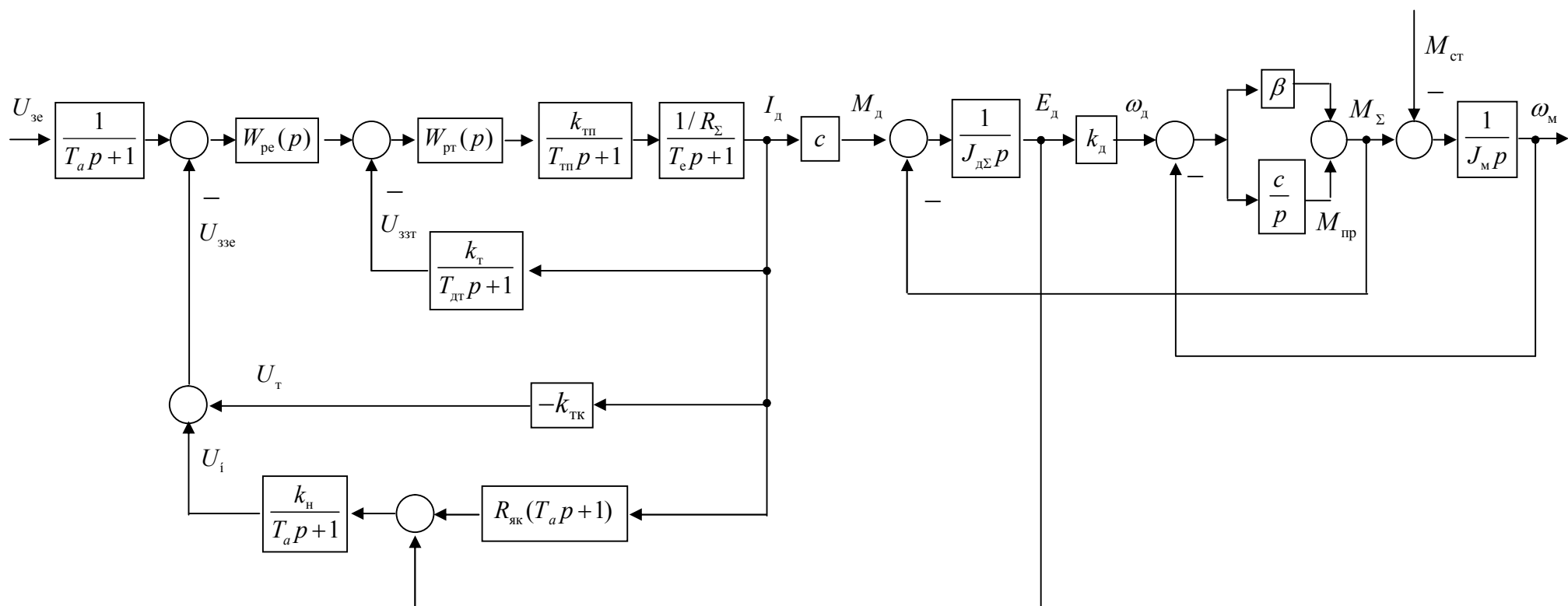


Рисунок 3.2 – Алгоритмічна схема двомасової системи

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

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

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:

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

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

При записі системи (3.4) замість T_m записано відповідний вираз

$$T_m = \frac{R_\Sigma \cdot J_{d\Sigma}}{c^2} = R_\Sigma J_{d\Sigma} \cdot k_d^2; \quad k_d = 1/c.$$

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:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_m} M_{\text{пр}} + \frac{\beta}{J_m} \omega_d - \frac{\beta}{J_m} \omega_m - \frac{1}{J_m} M_{\text{ст}}; \frac{dM_{\text{пр}}}{dt} = c_{12} \omega_d - c_{12} \omega_m; \\ \frac{d\omega_d}{dt} = \frac{1}{J_{d\Sigma}} M_d - \frac{1}{J_{d\Sigma}} M_{\text{пр}} - \frac{\beta}{J_{d\Sigma}} \omega_d - \frac{\beta}{J_{d\Sigma}} \omega_m; \\ \frac{dM_d}{dt} = \frac{1}{k_d} P; \\ \frac{dP}{dt} = \frac{k_{\text{пе}}}{2T_{\mu T}^2 k_T} E_{3e} - \frac{k_{\text{пе}}}{2T_{\mu T}^2 k_T} U_{3e} - \frac{k_d}{2T_{\mu T}^2} M_d - \frac{1}{T_{\mu T}} P + \frac{1}{T_{\mu T}^2 k_T} U_{ie}; \\ \frac{dE_{3e}}{dt} = \frac{1}{T_a} U_{3e} - \frac{1}{T_a} E_{3e}; \\ \frac{dU_{3e}}{dt} = \frac{k_n}{T_a k_d} \omega_d - \frac{1}{T_a} U_{3e}; \\ \frac{dU_{ie}}{dt} = k_{ie} E_{3e} - k_{ie} U_{3e}. \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Алгоритмічна схема двомасової системи, що відповідає рівнянням (3.5), показана на рис. (3.3). На схемі оптимізований контур струму представлений у вигляді послідовного з'єднання аперіодичної і інтегруючої ланки, охоплених одиничним зворотним зв'язком. Сигнал на виході першої ланки пропорційний ривку електроприводу P .

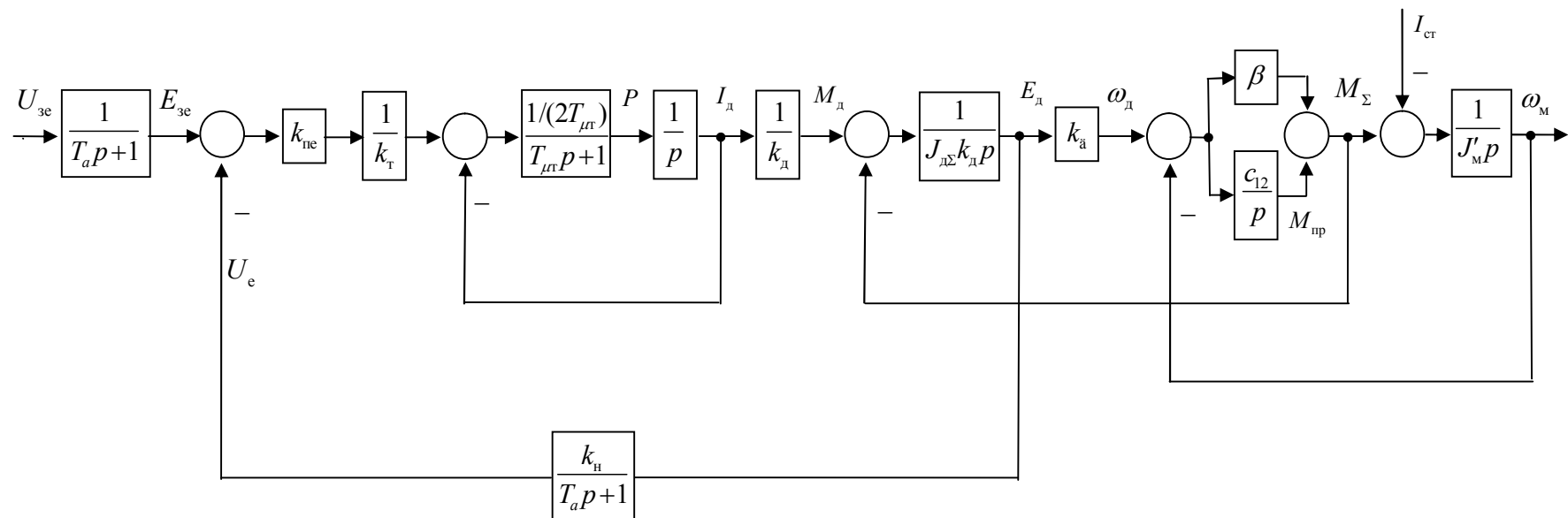


Рисунок 3.3 – Спрощена алгоритмічна схема двомасової системи

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

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

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

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

де T – знак транспонування.

Рівняння стану системи і рівняння виходу має вид

$$\begin{cases} \dot{\vec{X}}(t) = \mathbf{A}\vec{X}(t) + \mathbf{B}\vec{U}(t); \\ \vec{Y}(t) = \mathbf{C}\vec{X}(t), \end{cases} \quad (3.6)$$

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 наступний вид:

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} \omega_m & M_{\text{пр}} & \omega_d & M_d & P & E_{\text{зе}} & U_{\text{зе}} & U_{\text{іс}} \\ -\frac{\beta}{J_m} & \frac{1}{J_m} & \frac{\beta}{J_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c & & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta}{J_d} & -\frac{1}{J_d} & -\frac{\beta}{J_d} & \frac{1}{J_d} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{k_d} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{k_d}{2T_{\mu\Gamma}^2} & -\frac{1}{T_{\mu\Gamma}} & \frac{k_{\text{ре}}}{2T_{\mu\Gamma}^2 k_{\text{т}}} & -\frac{k_{\text{ре}}}{2T_{\mu\Gamma}^2 K_{\text{т}}} & \frac{1}{2T_{\mu\Gamma}^2 k_{\text{т}}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_{\text{н}}}{T_a K_d} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\text{іс}} & -k_{\text{іс}} & 0 \end{vmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{vmatrix} U_{\text{зе}} & M_{\text{ст}} \\ 0 & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{T_a} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

3.2 Розрахунок перехідних процесів двомасової системи

Визначимо параметри, необхідні для розрахунку перехідних процесів двомасової системи,

Момент інерції двигуна і жорстко пов'язаних з ним елементів системи визначений раніше $J_{д\Sigma} = 1,1 \cdot J_{дв} = 1,1 \cdot 7 = 7,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Приведений момент інерції механізму (завантаженого рольганга):

$$J_{\text{м}} = \frac{J_{\text{м3}}}{i^2};$$

$$J_{\text{м}} = \frac{531}{5,95^2} = 15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Решта параметрів визначені у попередніх розділах.

Розрахунок перехідних процесів проводився з використанням пакету прикладних програм MATLAB. Розрахунок перехідних процесів проводився на ЕОМ з використанням пакету прикладних програм MATLAB. Для дослідження була використана модель системи, приведена на рисунку 3.4, а також векторно-матричне рівняння (3.6).

У додатку Д приведений текст програми розрахунку, в якому містяться початкові дані, матриці **A**, **B** і **C** одномасової і двомасової системи.

Графіки перехідних процесів двомасової системи показані на рис. 3.5-3.8. Для зменшення інформації, що виводиться, на ЕОМ були виведені на екран монітора, і відповідно роздруковані перші чотири змінних стану. З графіків видно, що спостерігаються значні коливання основних координат системи, що негативно впливає на роботу механізму, підвищуючи навантаження на його елементи під час перехідних режимів.

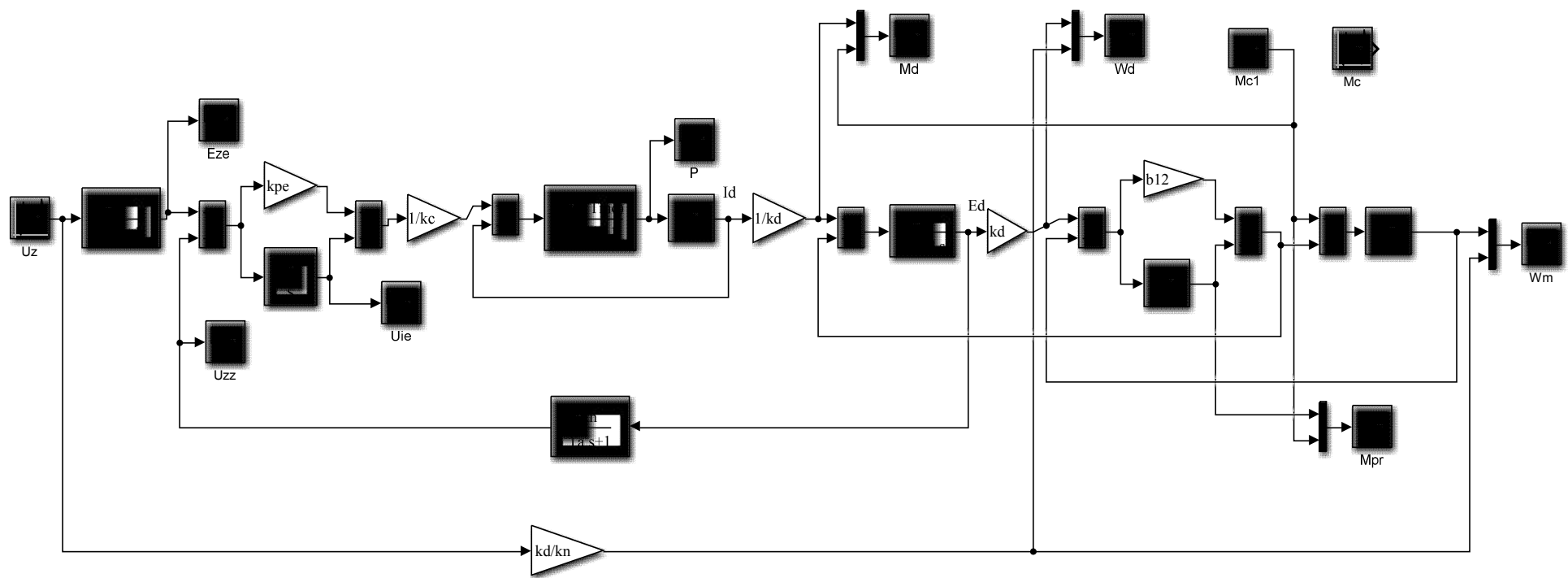


Рисунок 3.4 - Схема моделі двомасової системи, розроблена на ЕОМ

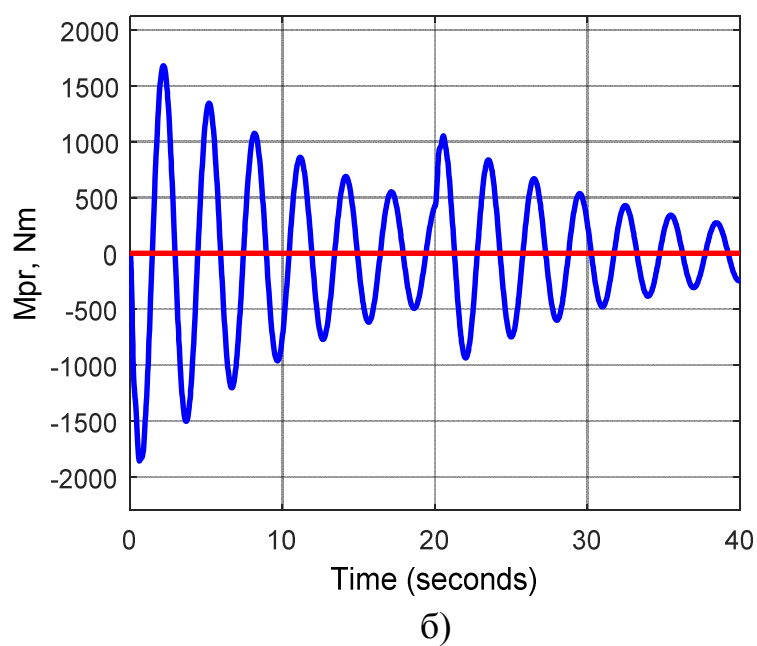
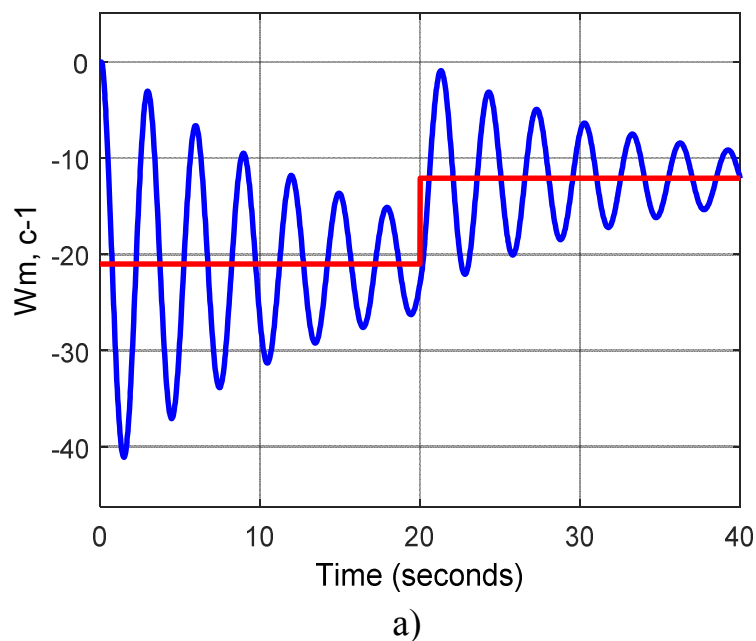


Рисунок 3.5 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{\text{пр}} = f(t)$ (б) двомасової системи по задаючій дії

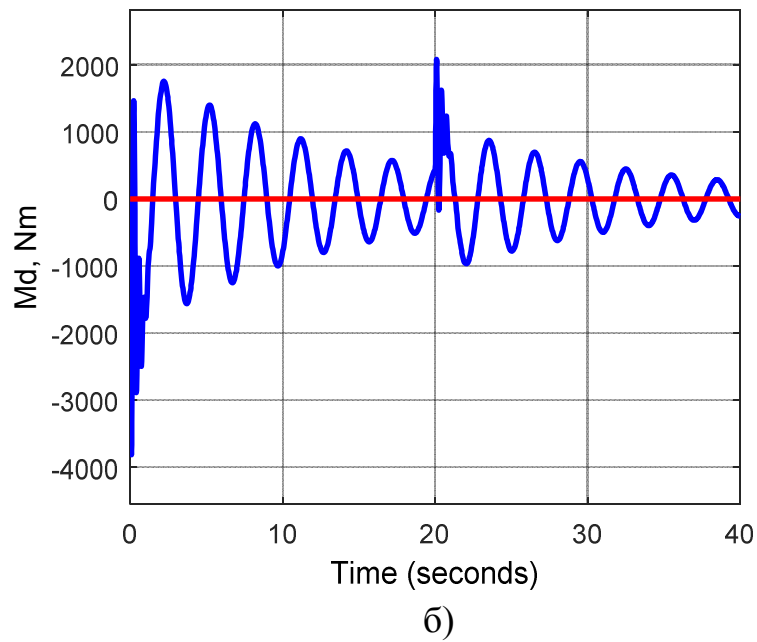
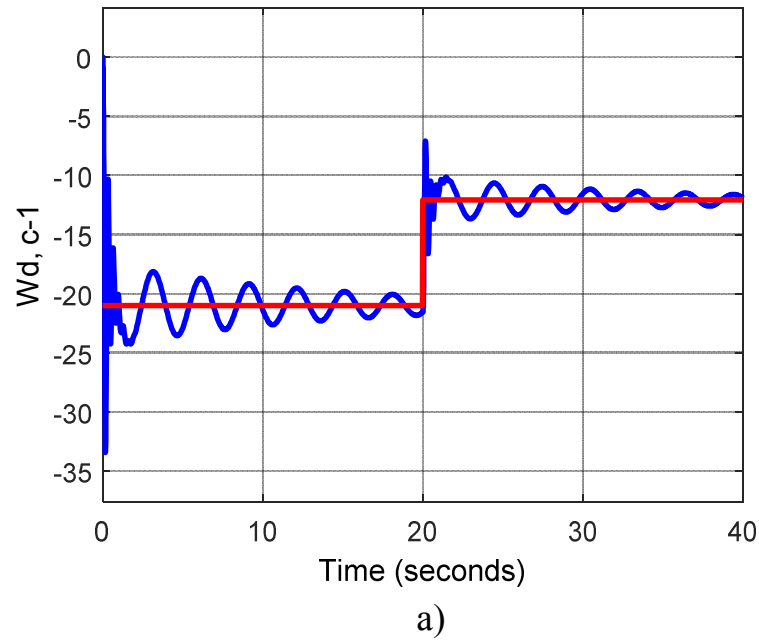
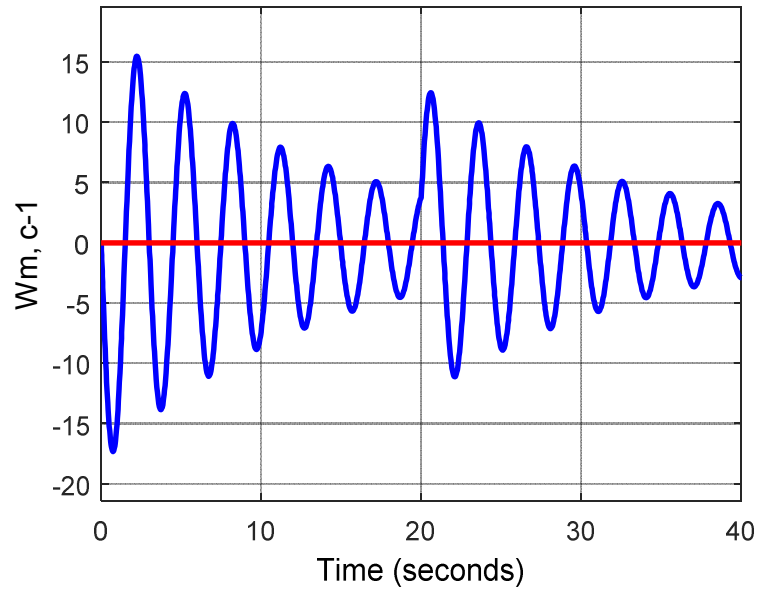
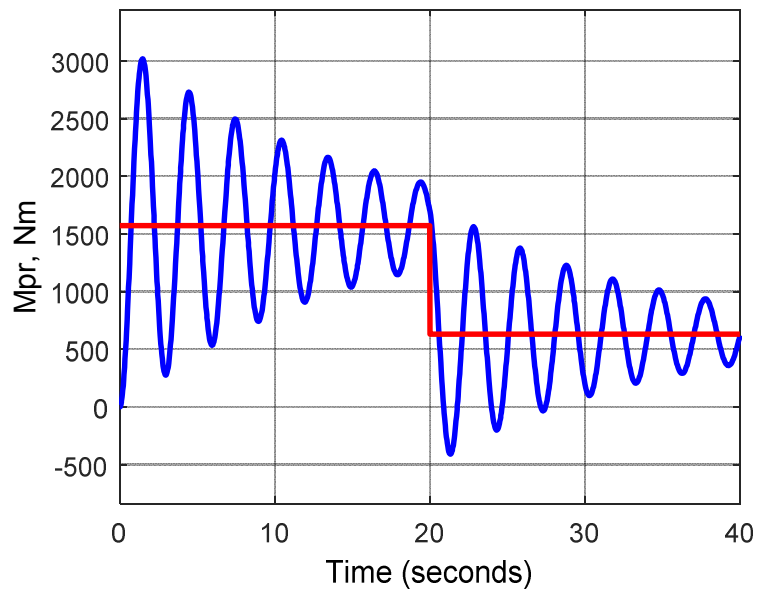


Рисунок 3.6 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і моменту двигуна $M_d = f(t)$ (б) двомасової системи по задаючій дії



a)



б)

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

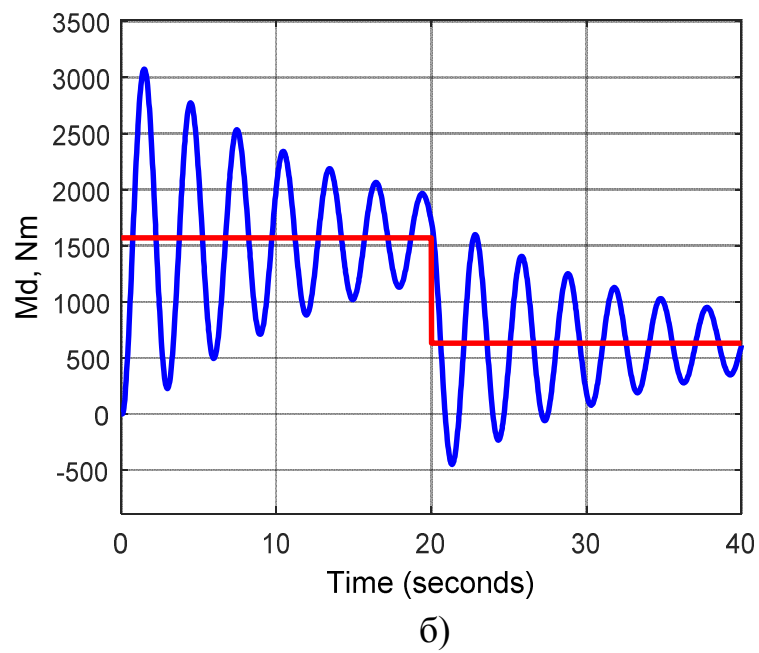
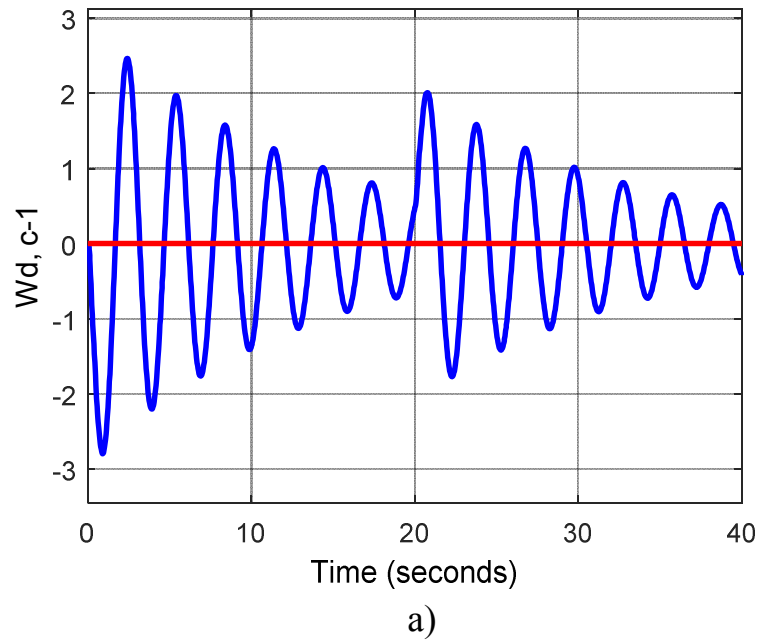


Рисунок 3.8 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і моменту двигуна $M_d = f(t)$ (б) двомасової системи по збурюючій дії

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Проведено аналіз роботи механізму рольганга з урахуванням кінцевої жорсткістю зв'язку між двигуном і рольгангом. Представлення механічної частини жорсткою приведеною ланкою відображає дійсний характер рухів елементів тільки в середньому, оскільки не враховує вплив пружності реальних механічних зв'язків. Із-за кінцевої жорсткості цих зв'язків механічна частина електроприводу є пружною системою, додаток до якої управляючої дії або збурюючої дії (моменту статичного навантаження), викликає коливання зв'язаних мас, що збільшують максимальні навантаження зв'язків і ускладнюють точність обробки необхідних рухів і переміщень. Показано, що кінематична схема механічної частини системи управління механізмом рольганга з урахуванням податливості елементів механічної частини електроприводу може розглядатися як двомасова.

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

3. Проведено моделювання двомасової системи на ЕОМ з використанням пакету прокладних програм MATLAB. В режимі SIMULINK системи MATLAB розроблено схему моделі двомасової системи. Як тестовий сигнал на вхід системи подавався ступінчастий сигнал з випадковою амплітудою, який знаходиться в межах від +24В до -24В, що відповідає зміні швидкості в межах номінальних значень. Аналіз результатів моделювання показав, що перехідні процеси змінних стану системи мають незадовільний (коливальний) характер. Перерегулювання складає 90%, час перехідного процесу дорівнює 80 секунд.

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.

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

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

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

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

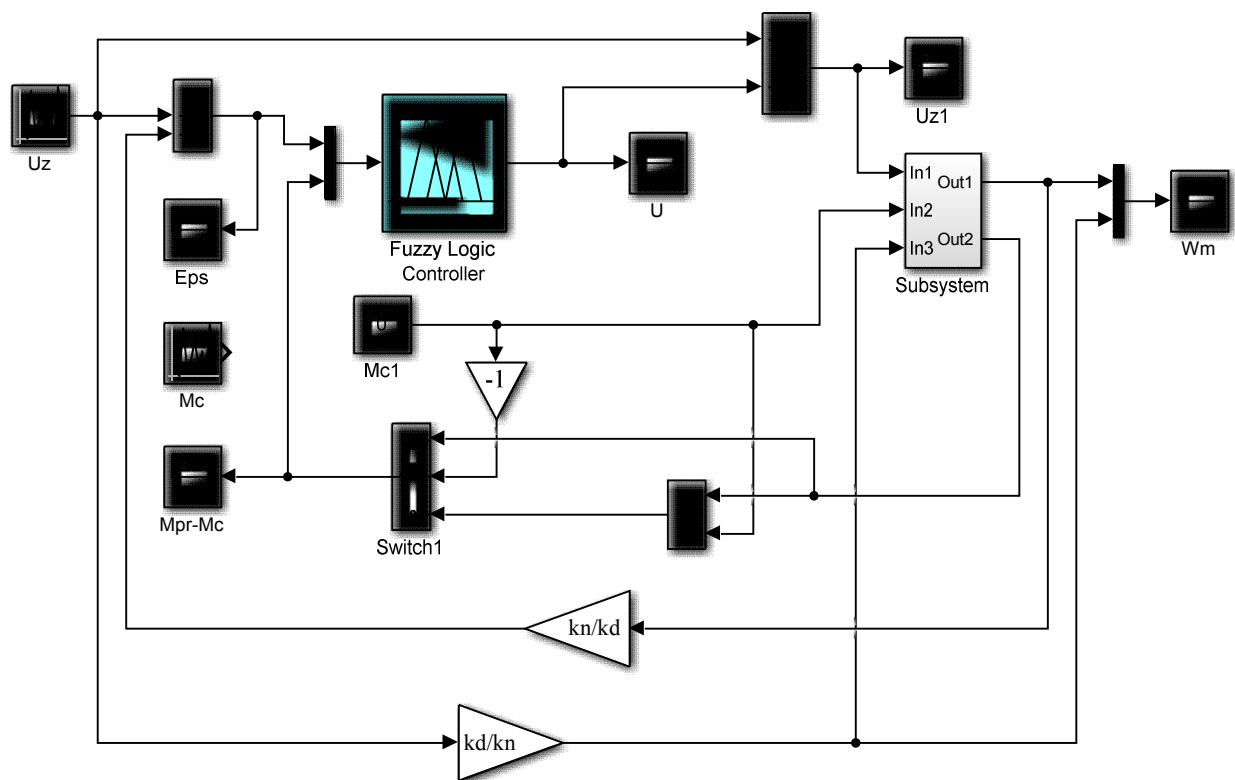


Рисунок 4.1 – Схема системи з Fuzzy регулятором

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

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

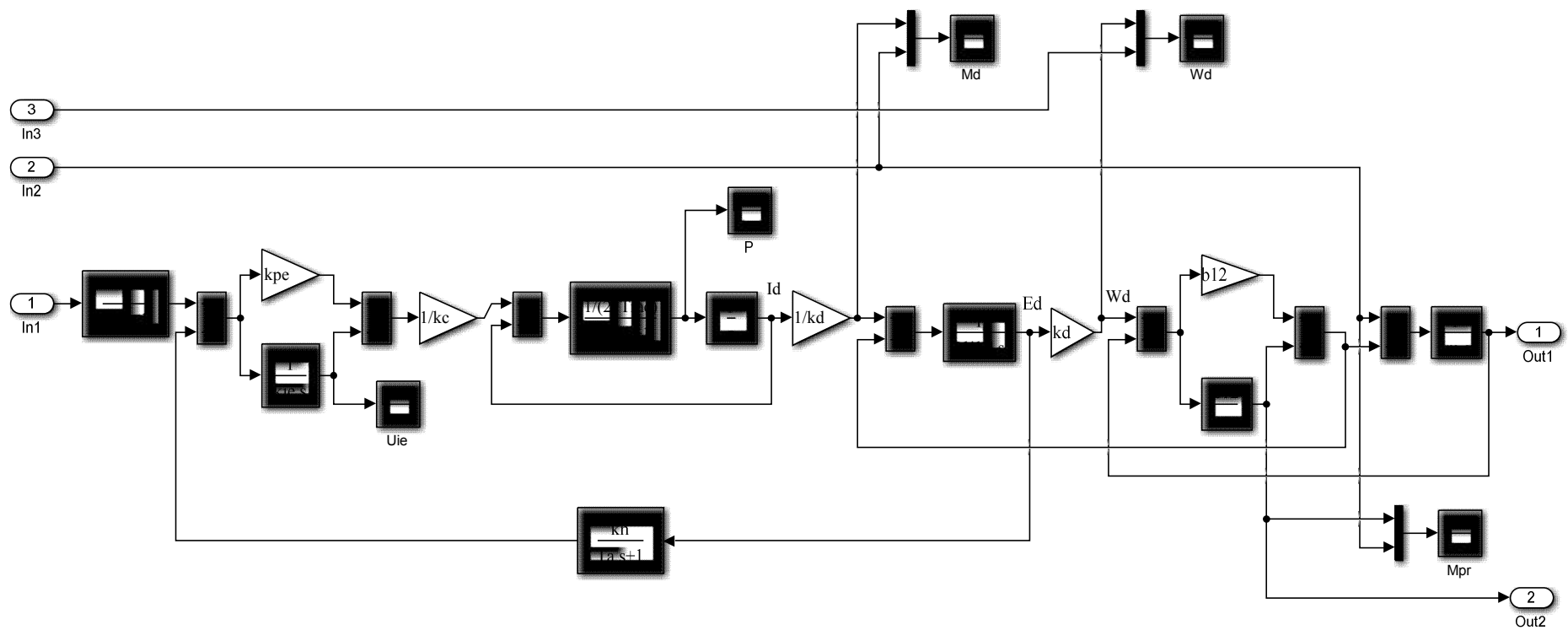


Рисунок 4.2 – Схема моделі об'єкту управління

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Таблиця 4.2 – База правил формування лінгвістичних змінних Fuzzy регулятора

		Помилка регулювання				
		NG	NS	ZR	PS	PG
Момент пружності	NG	PG	PS	PS	PS	PS
	NS	PS	PS	ZR	ZR	ZR
	ZR	PS	PS	ZR	NS	NS
	PS	ZR	ZR	ZR	NS	NS
	PG	NS	NS	NS	NS	NG

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

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

У рядку меню редактора вміщені такі пункти:

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

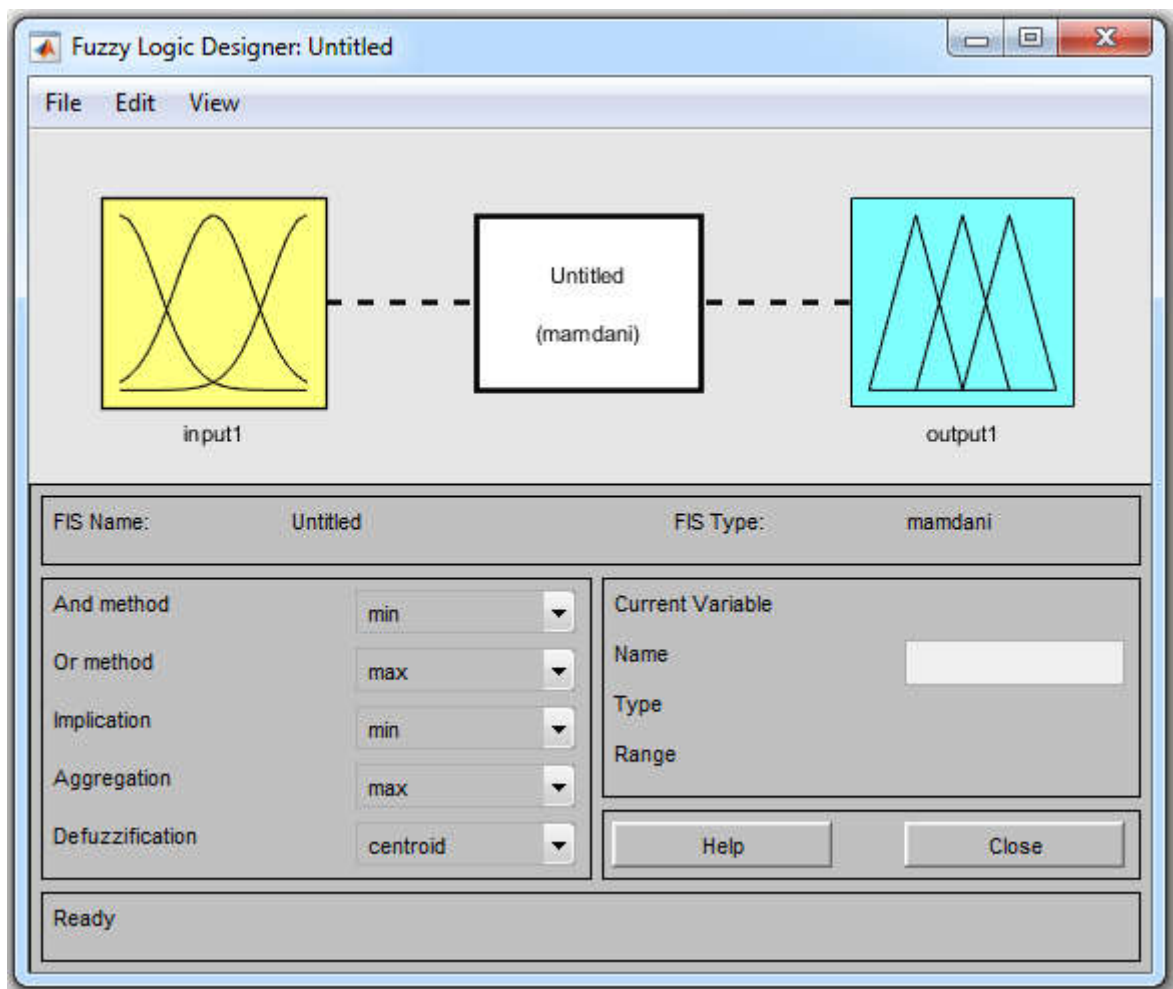


Рисунок 4.3 – Вид вікна FIS Editor

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

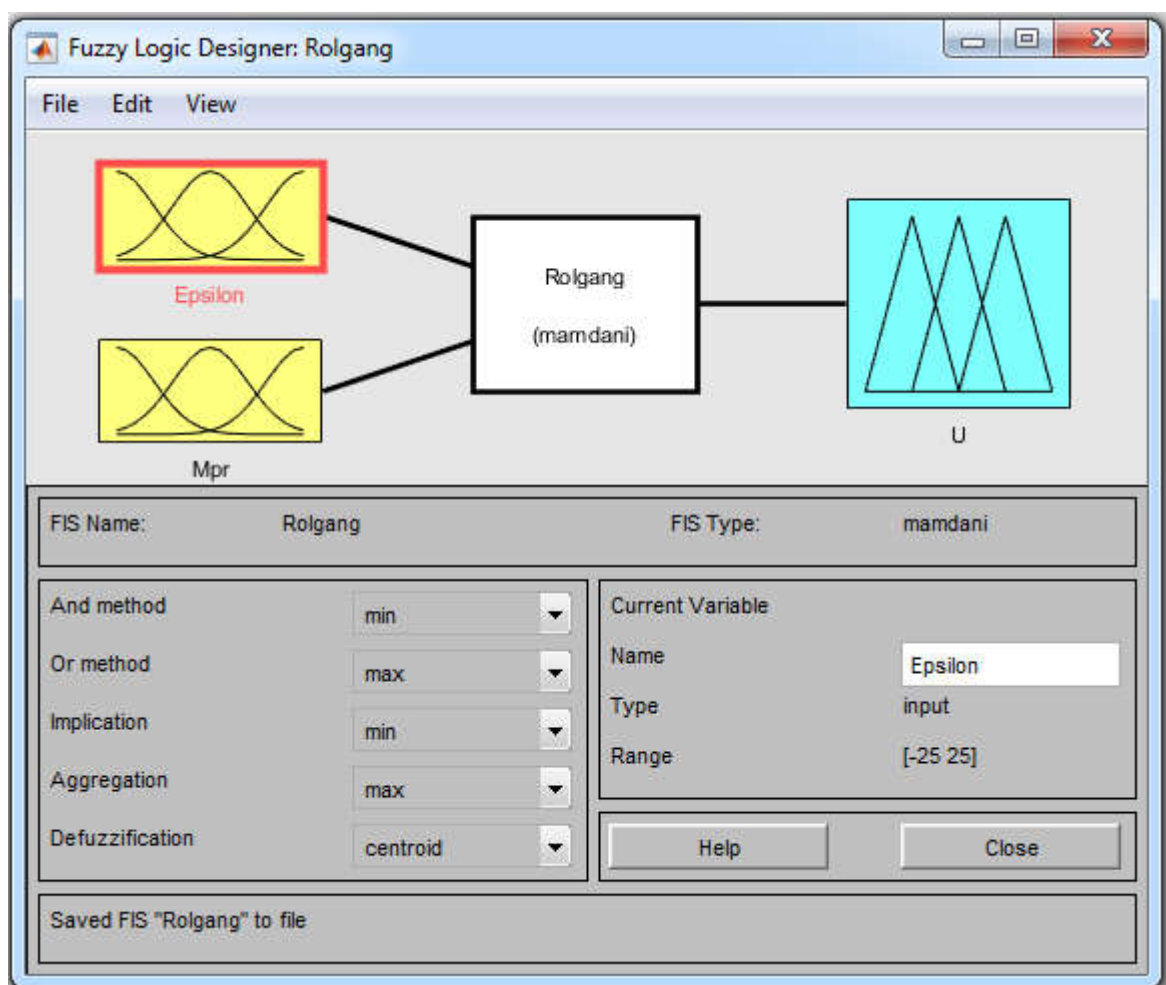


Рисунок 4.4 – Вид вікна FIS Editor після завдання структури системи

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

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

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

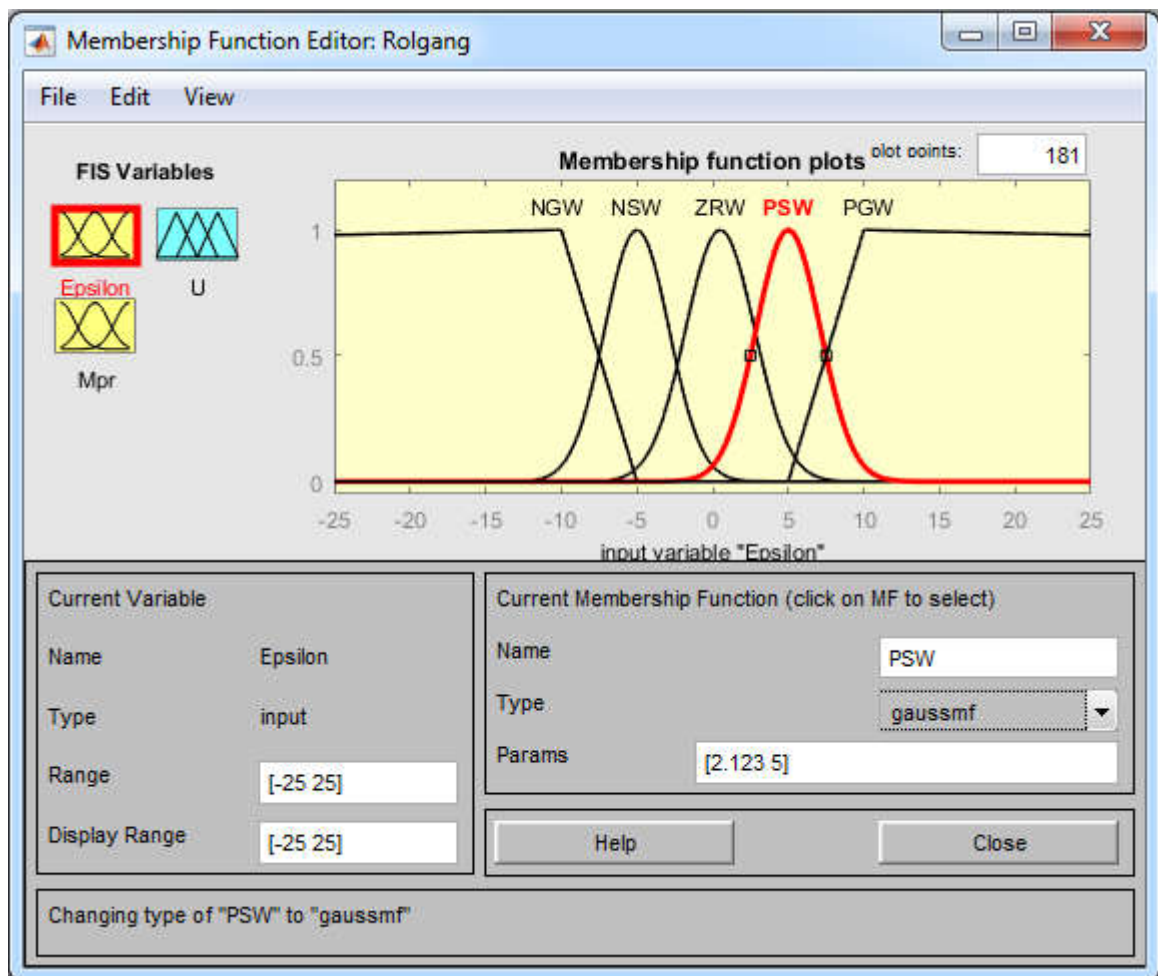


Рисунок 4.5 – Функції приналежності змінної «Epsilon»
(помилка регулювання $\varepsilon(t)$)

Спочатку встановимо діапазон зміни та відображення змінної у полях Range і Display Range від -25 до +25, 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).

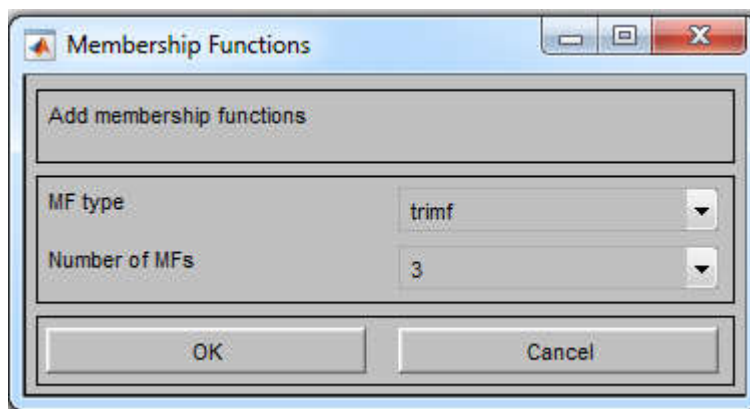


Рисунок 4.6 – Вид вікна завдання типа і кількості функцій приналежності

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 -4000 до +4000, 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).

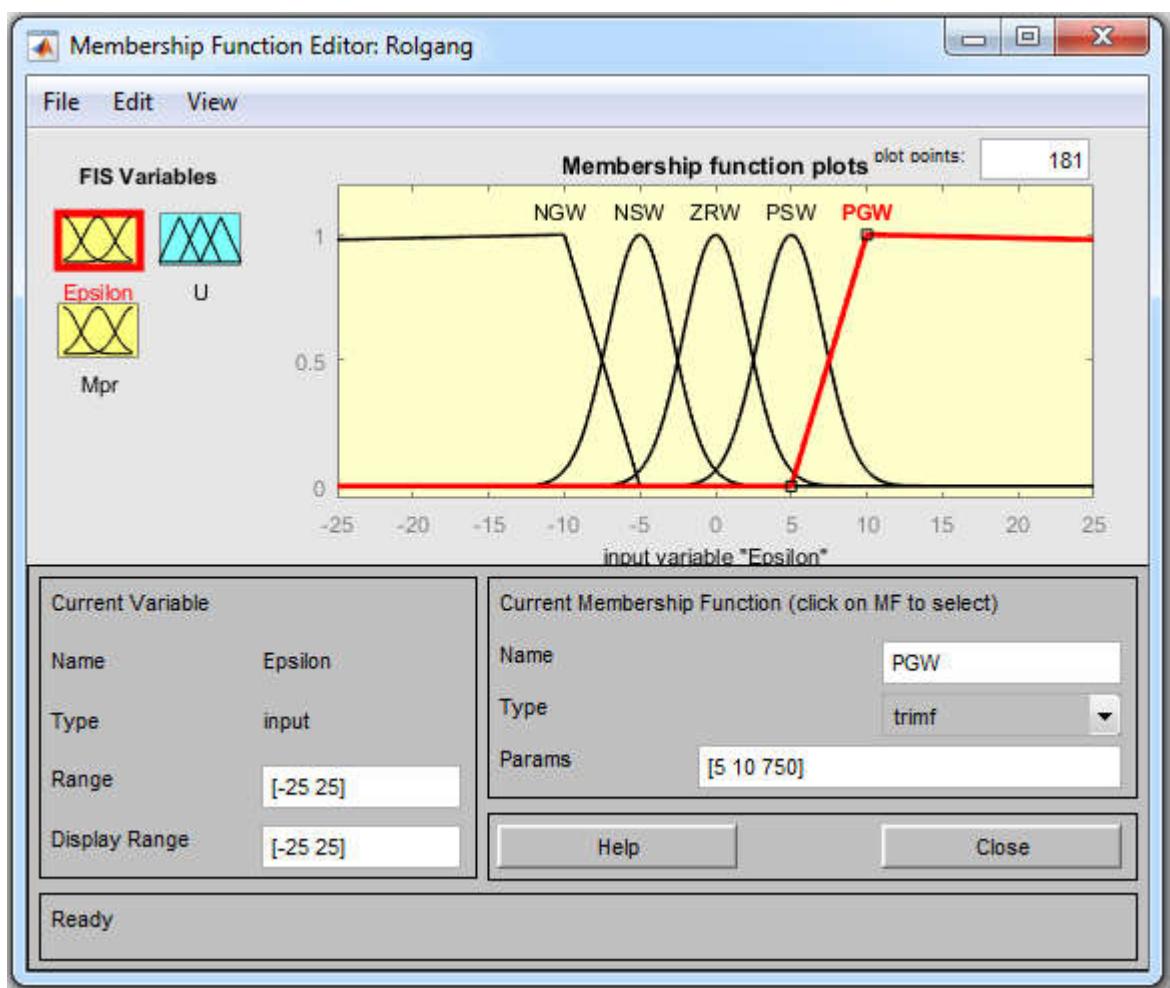


Рисунок 4.7 – Функції приналежності змінної «Mpr» ($M_{np}(t)$)

Для вихідної змінної U ($U(t)$) спочатку встановимо діапазон зміни (від -10 до +10), а потім вкажемо п'ять функцій належності гауссового типу: для центральної функції `gauss2mf`, а для інших - `gaussmf` з наступними назвами: «NGU» (негативна велика для вихідної змінної $U(t)$), «NSU» (негативна мала для вихідної змінної $U(t)$), «ZRU» (дуже мала для вихідної змінної $U(t)$), «PSU» (позитивна мала для вихідної змінної $U(t)$) і «PGU» (позитивна велика для вихідної змінної $U(t)$), як показано на рисунку 4.8. Тип і параметри функцій уточнюються в процесі налаштування Fuzzy регулятора, як було вказано раніше.

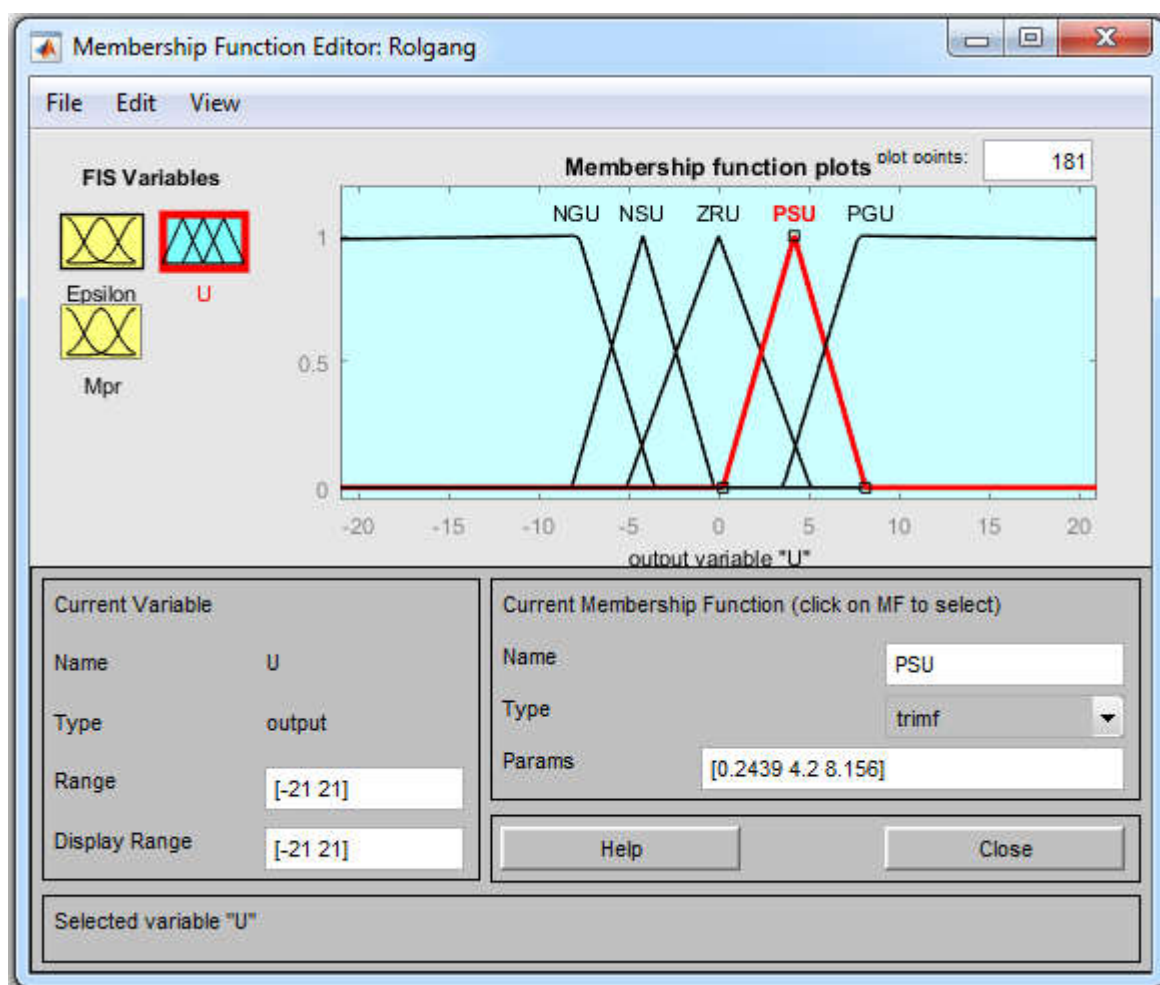


Рисунок 4.8 – Функції приналежності «U» (вихідної змінної $U(t)$)

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

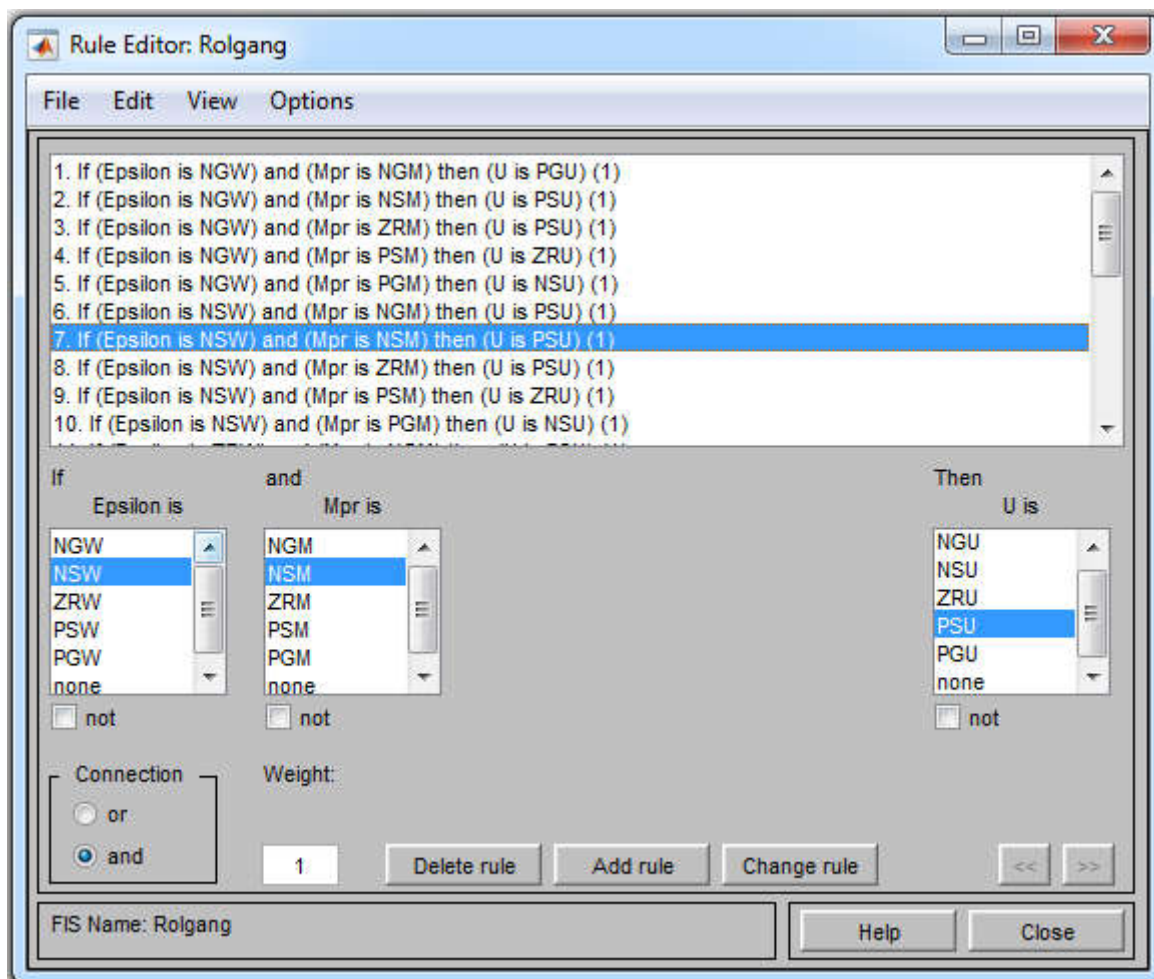


Рисунок 4.9 – Вікно редактора правил

Щоб перевірити систему у дії, перейдемо до меню View. Оберемо команду Rules, що призведе до відкриття вікна (рис. 4.10) іншої програми – перегляду правил (Rule Viewer). У правій частині вікна графічно представлені функції належності аргументів "Epsilon" (помилка регулювання $\varepsilon(t)$) та "Mpr" (момент пружності $M_{\text{пр}}(t)$), 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 призводить до відповідних змін у "Epsilon" та "Mpr" у верхній правій частині вікна, а також у вихідному значенні змінної "U". Таким чином, використовуючи побудовану модель та вікно перегляду правил, можна розв'язувати задачу синтезу Fuzzy регулятора. Переміщення червоної вертикальної лінії наглядно демонструє, як система визначає значення виходу.

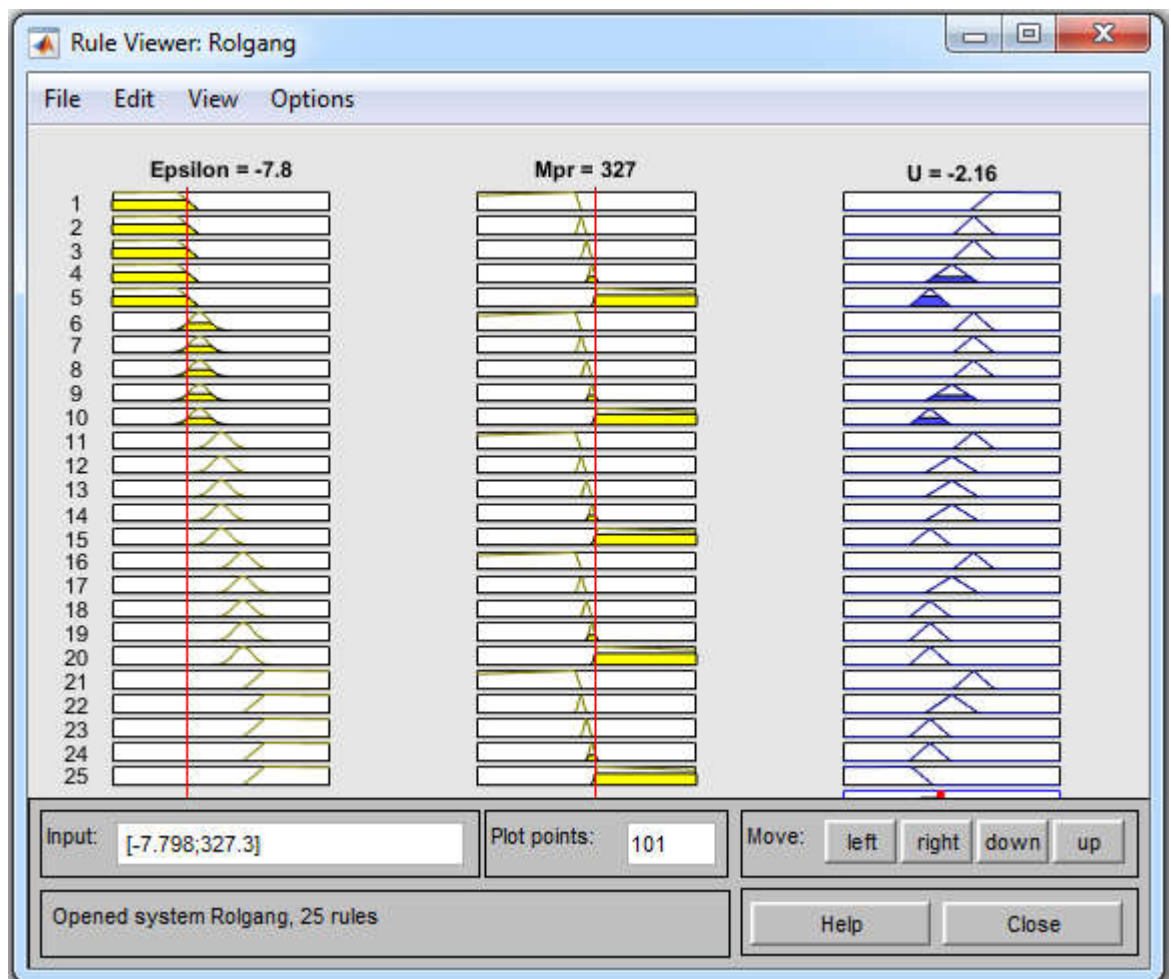


Рисунок 4.10 – Вікно перегляду правил

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

У відкритому вікні, змінюючи назви змінних у полях введення (X (input) та Y (input)), можна налаштовувати і спостерігати одновимірні залежності, наприклад, $U(U(t))$ від момента пружності "Mpr" ($M_{\text{пр}}(t)$).

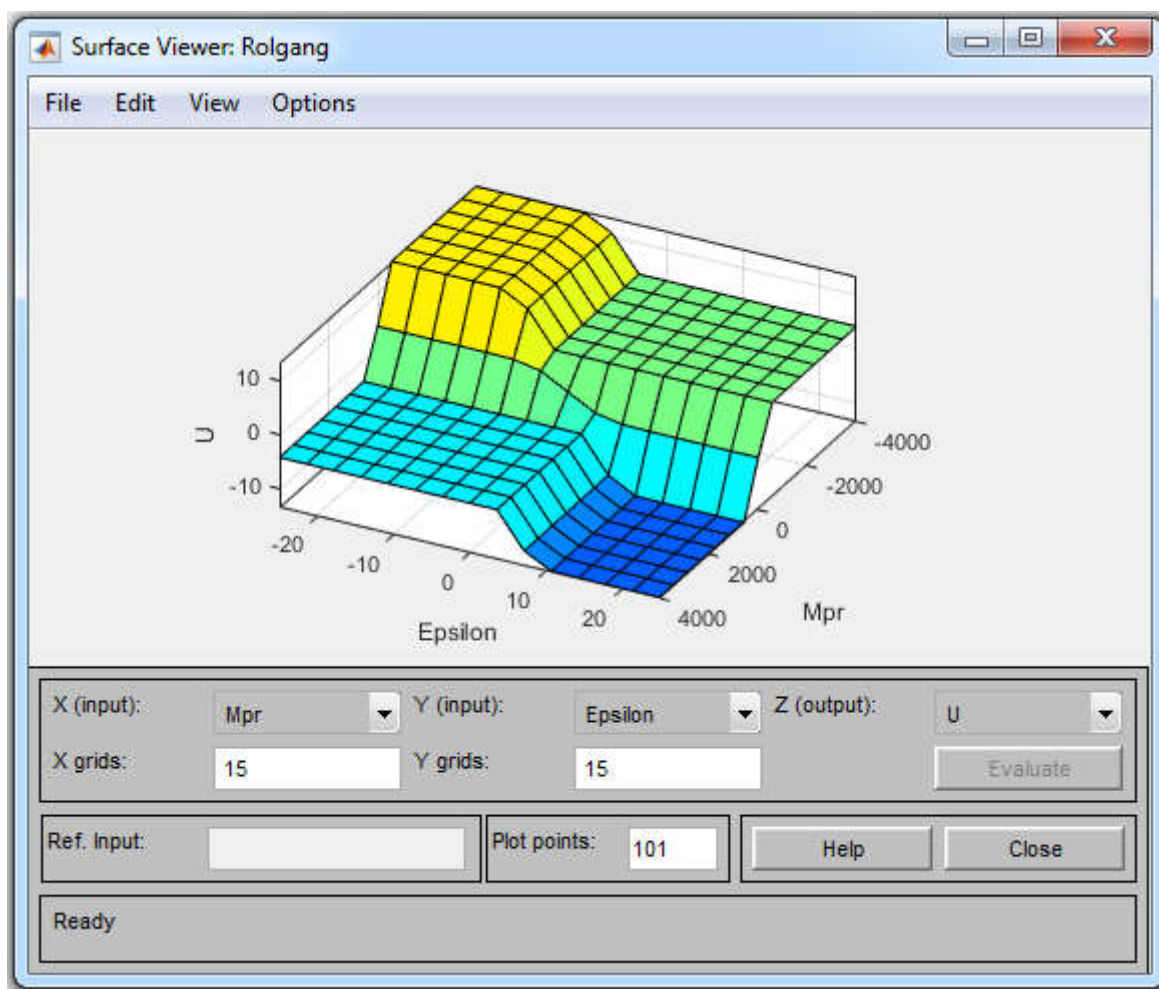


Рисунок 4.11 – Графічний вид залежності вихідної змінної від вхідних

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

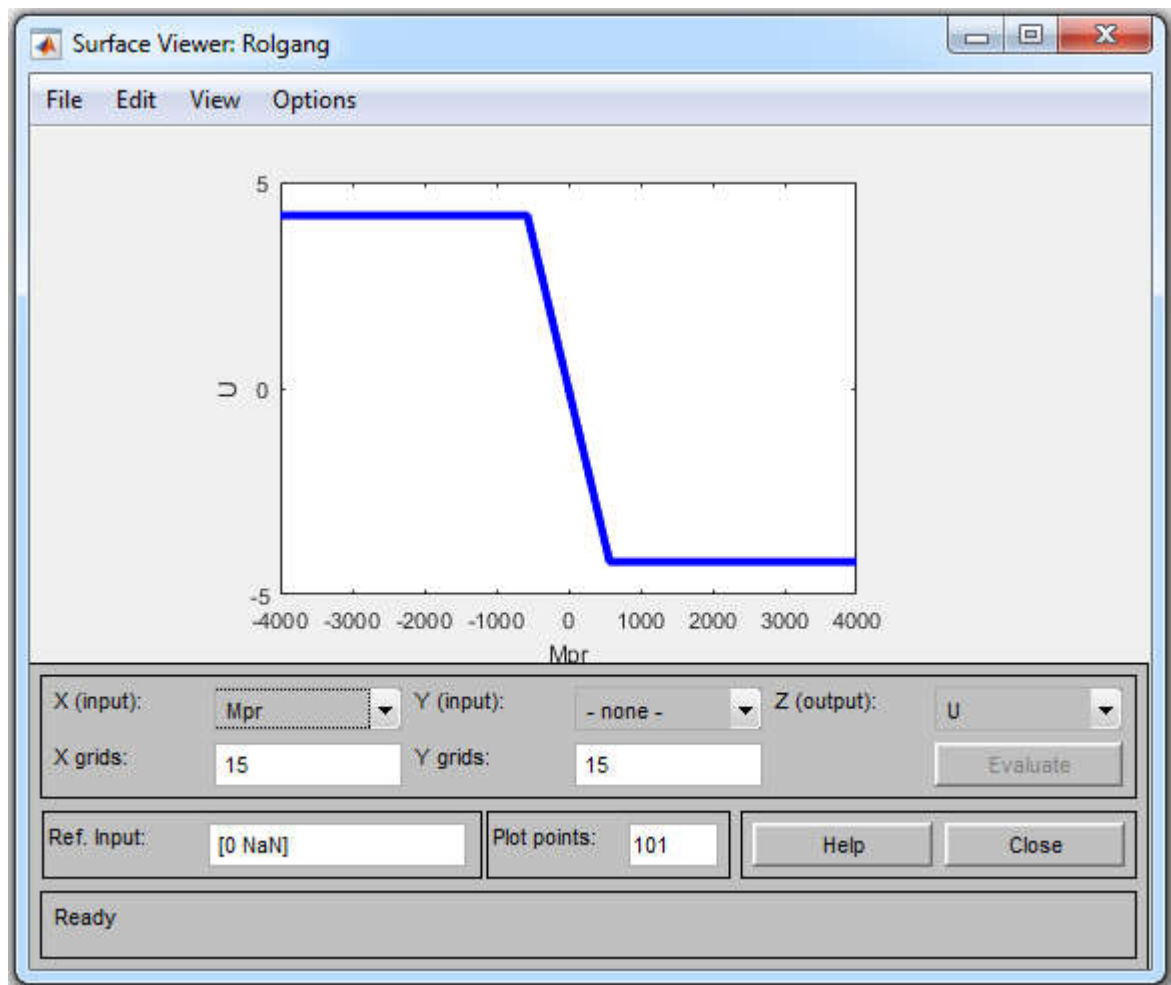


Рисунок 4.12 – Одновимірна залежність вихідний змінної U ($U(t)$) від вхідної – від моменту пружності "Mpr" ($M_{np}(t)$)

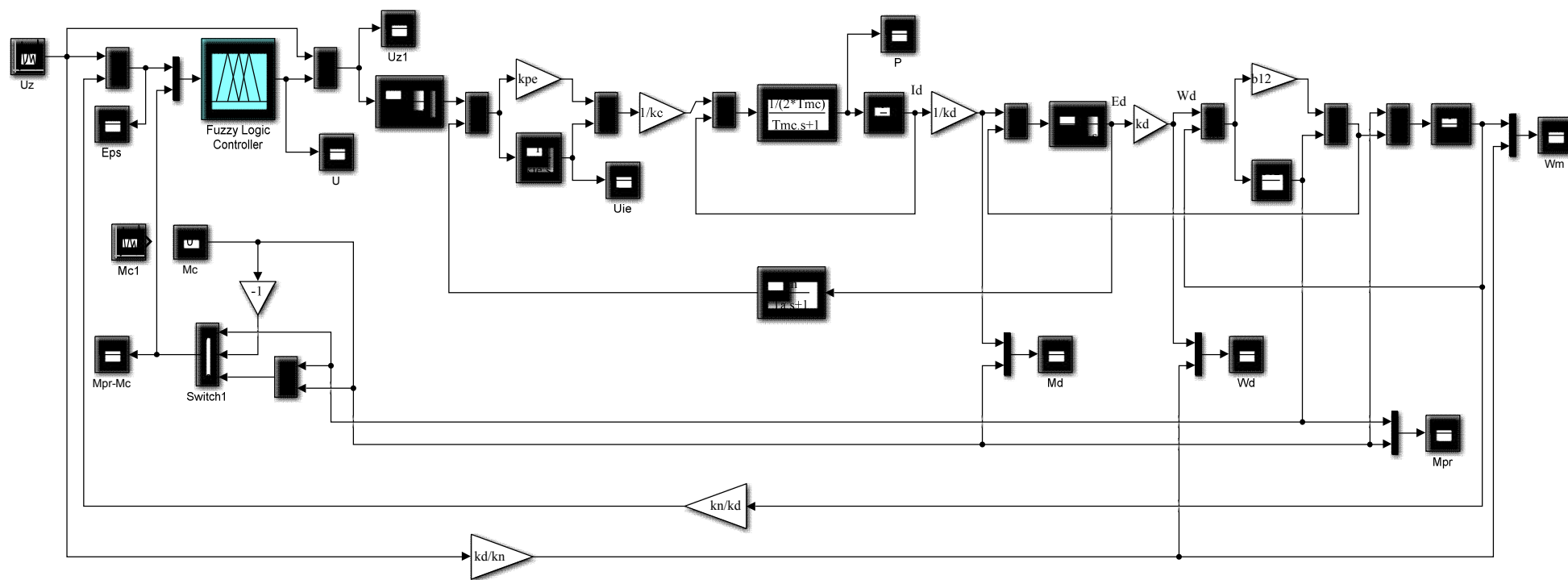
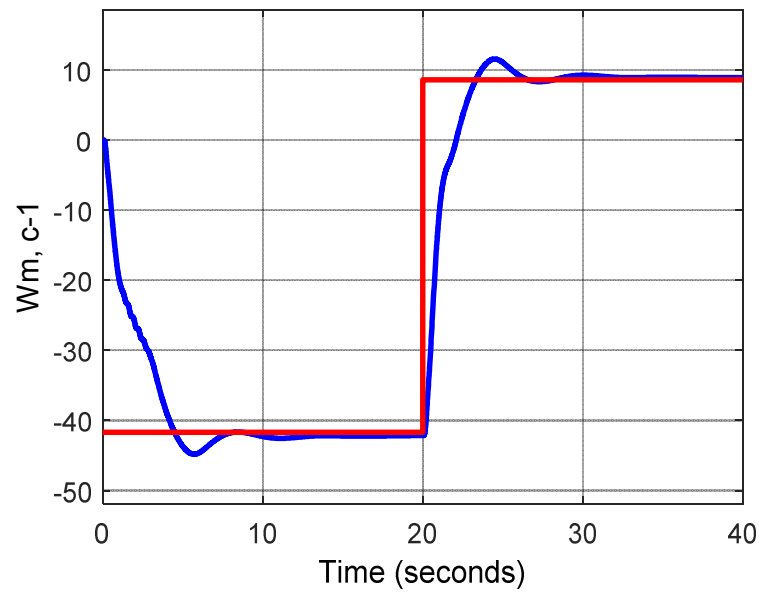
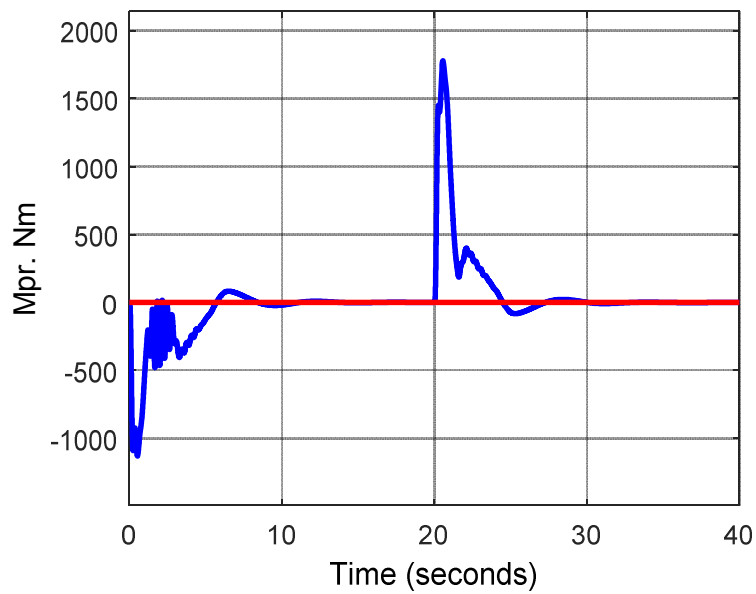


Рисунок 4.13 – Схема моделі двомасової системи з Fuzzy регулятором



a)



б)

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

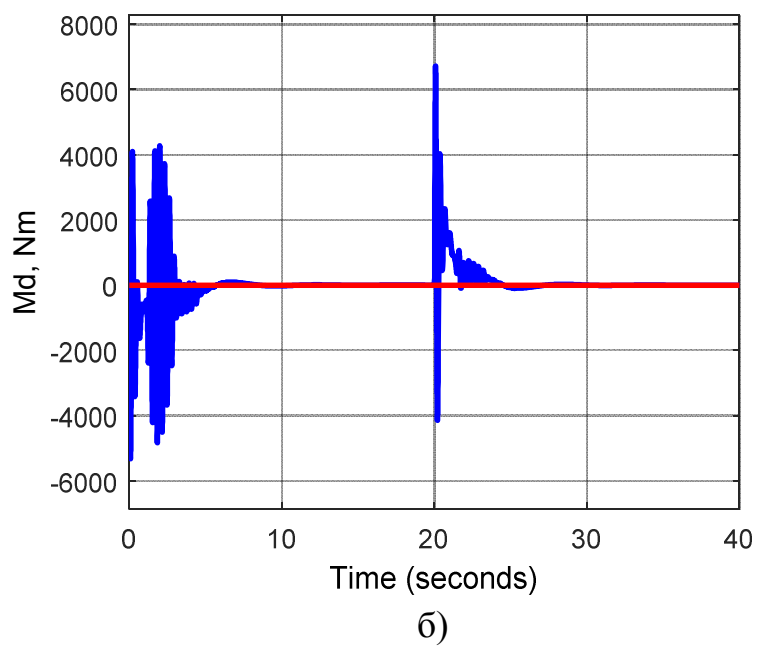
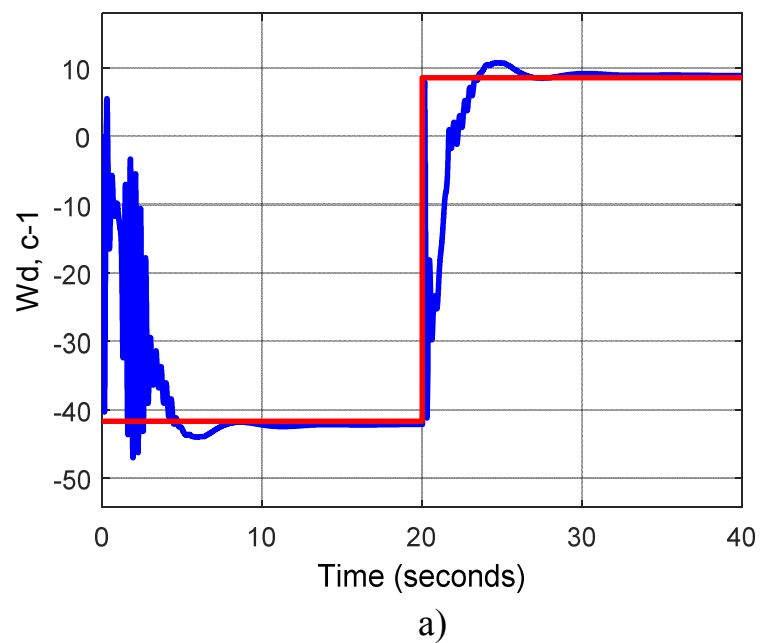


Рисунок 4.15 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і моменту двигуна $M_d = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по задаючій дії

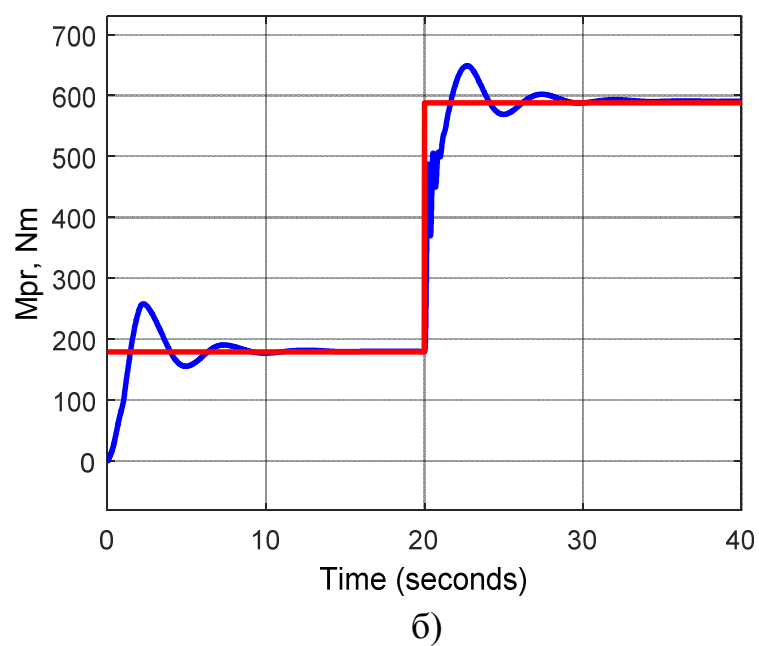
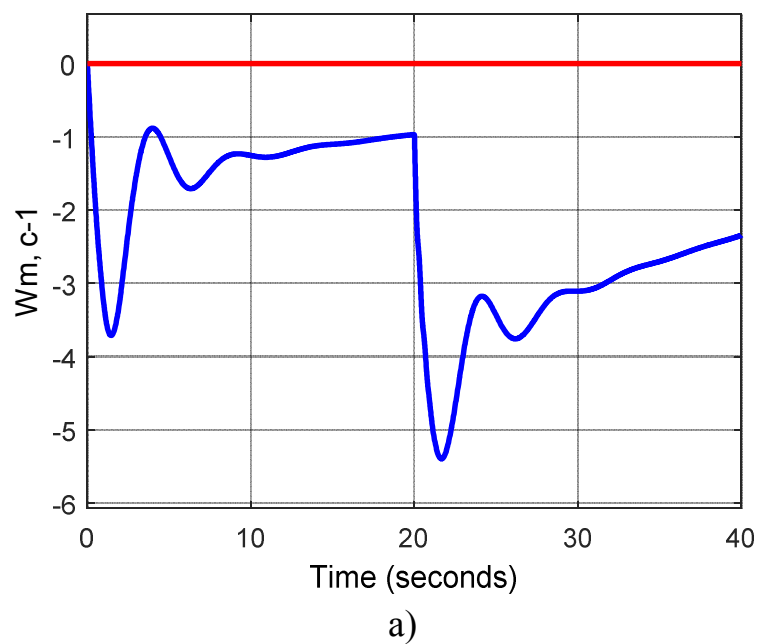


Рисунок 4.16 – Графіки перехідних процесів швидкості механізму $\omega_m = f(t)$ (а) і моменту пружності $M_{пр} = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по збурюючій дії

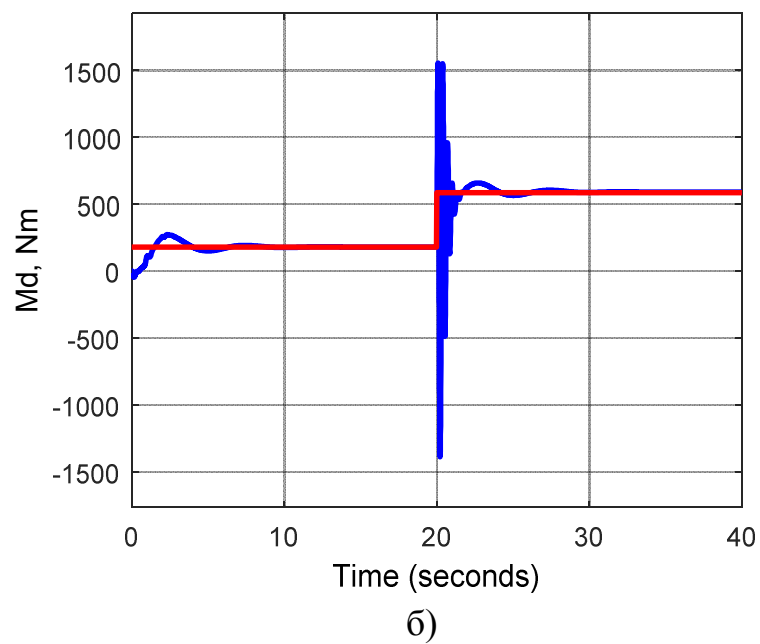
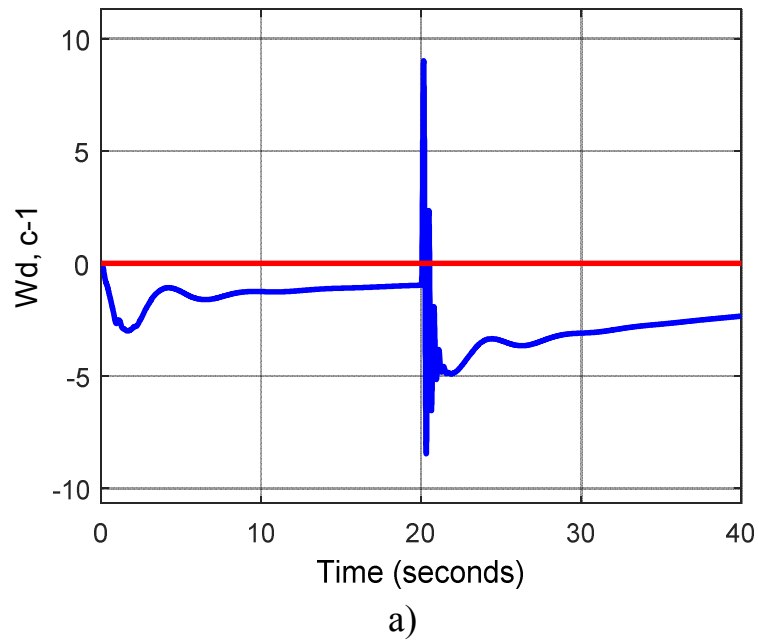


Рисунок 4.17 – Графіки перехідних процесів швидкості двигуна $\omega_d = f(t)$ (а) і моменту двигуна $M_d = f(t)$ (б) двомасової системи з Fuzzy регулятором по збурюючій дії

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 $\omega_z(t)$ і реальною швидкістю обертання механізму $\omega_m(t)$, а також момент пружності $M_{пр}(t)$ 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 $M_{пр}(t)$. 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 $M_{пр}(t)$: $M_{пр}$ – "*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 пуску і навантаження було сформовано базу правил нечітких продукцій. Оскільки

розглядаються дві вхідні лінгвістичні змінні, кожна з яких має 5 термінів, система нечіткого висновку включає 25 правил нечітких продукцій типу «якщо...то».

5. За допомогою основної інтерфейсної програми пакету Fuzzy Logic – редактора нечіткої системи висновку (FIS-редактор) здійснено синтез Fuzzy-регулятора. У процесі синтезу було використано алгоритм виведення Mamdani. Дослідження показали, що змінюючи тип і параметри функцій приналежності, можна сконструювати Fuzzy-регулятор, який знижує динамічні навантаження в багатомасовій системі.

6. Проведено моделювання нечіткої системи з синтезованим Fuzzy-регулятором. Аналіз результатів моделювання показав, що перехідні процеси змінних стану системи в замкнутій системі з Fuzzy-регулятором під час пуску і навантаження мають задовільні характеристики. Система є астатичною, перерегулювання не перевищує 7%, а час регулювання становить 8 с, що відповідає заданим вимогам.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача розробки нечіткої системи управління багатомасовою електромеханічною системою механізму рольганга за ножицями стана гарячої прокатки, що забезпечує високу якість регулювання.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. В результаті аналізу систем управління механізмам рольгангів станів гарячої прокатки, 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 рольганга за ножицями.

2. На підставі аналізу технічних характеристик допоміжних механізмів прокатних станів і умов експлуатації електроприводів рольгангів вибраний електропривод постійного струму, виконаний за системою ТП-Д. Виконана перевірка двигуна за умовами нагріву і перевантажувальної здатності при роботі електроприводу в різних режимах, передбачених технологічним процесом.

3. Проведений вибір і розрахунок системи автоматичного управління параметрами електроприводу. Для управління координатами електроприводу застосована система підлеглого регулювання з внутрішнім контуром струму і зовнішнім контуром ЕРС. 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 з астатизмом другого порядку по задаючій, і астатичною з астатизмом першого порядку 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 податливість зв'язків між двигуном і механізмом. Проведено моделювання системи на ЕОМ. Дослідження показали, що в двомасовій системі перехідні процеси основних координат мають значні коливання. Перерегулювання становить 90%, час перехідного процесу дорівнює 80 секунд.

5. Для додання системі бажаних динамічних характеристик в роботі виконаний синтез системи управління з Fuzzy регулятором. Розглянутий принцип побудови і функціонування Fuzzy регулятора, приведений порядок синтезу Fuzzy регулятора, побудовані процеси в двомасовій системі з Fuzzy регулятором. Аналіз результатів моделювання показав, що перехідні процеси змінних стану системи в замкнутій системі з Fuzzy-регулятором під час пуску і навантаження мають задовільні характеристики. Система є астатичною, перерегулювання не перевищує 7%, а час регулювання становить 8 с, що відповідає заданим вимогам.

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. Синельніков. – 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.: БИ-НОМ, 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. Wang, L. X., and J. M. Mendel. "Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning." IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 3, no. 5, 1992, pp. 807–814.
33. Castro, J. L. "A fuzzy logic controller: Introduction and applications." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 25, no. 4, 1995, pp. 665–685.
34. Kosko, Bart. "Fuzzy systems as universal approximators." IEEE Transactions on Computers, vol. 43, no. 11, 1993, pp. 1329–1333.

35. Бычков В. П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. Учеб. Пособие для вузов. Изд.2-е. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1977. – 391с.
36. Тиристорные электроприводы прокатных станов. Перельмутер В. М. и др. – М., Металлургия, 1978. – 152 с.
37. Бешта О.С., Балахонцев О.В., Бородай В.А. Автоматизований електропривод у прокатному виробництві. – Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, 2010. – 224 с.
38. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К. : Либідь, 2007. – 656 с.
39. Голюк П.Ф., Гречин Т.М. Теорія автоматичного керування: Навчальний посібник. – Л: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 280 с.
40. Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Лисенко В.П. Теорія автоматичного управління: навч. посіб. – К.: Вид. Центр НУБіП України, 2012. – 240 с.
41. 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.
42. 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.
43. Сорока К.О. Теорія автоматичного керування і комп'ютерне моделювання (неперервні лінійні системи). Частина друга. Аналіз систем автоматичного керування засобами комп'ютерного моделювання : навч. посібник. – Харків : ФОП Тімченко, 2010. – 156 с.
44. Євстіфєєв В. О. Теорія автоматичного керування. Частина 1. Безперервні лінійні та нелінійні системи. Навчальний посібник. – Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2006. – 288 с.
45. Євстіфєєв В. О. Теорія автоматичного керування. Частина 2. Спеціальні системи автоматичного керування. Навчальний посібник. – Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2007. – 224 с.

46. І.Г. Абраменко, Д. І. Абраменко Теорія автоматичного керування. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 178 с.
47. 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
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. –СПб: Питер, 2001. –488 с.
53. Круглов В.В., Дли М.И. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечёткой логики и нечёткого вывода. – М.: Физматлит, 2002. – 252 с.
54. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде МАТЛАБ и fuzzyTECH.-СП.:БХБ-Петербург, 2003.-736с.

55. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба – М.: "Горячая линия - Телеком", 2007. – 288 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. Моделювання систем управління в SIMULINK : навч. посібник / В. О. Богомолів, О. Г. Гурко, В. І. Клименко, Д. М. Леонтьєв, О. М. Красюк. Харків ХНАДУ, 2018. – 220 с.

ДОДАТОК А

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

А.1 Визначення і способи завдання нечіткої множини

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

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

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

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

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

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

або у вигляді

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

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

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

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

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

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

Тоді A можна представити, наприклад, у вигляді

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

або у вигляді:

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

Приклади нечітких множин.

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

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

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

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

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

4. Нехай E – множина цілих чисел:

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

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

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

Використовуються наступні поняття.

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

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

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

Терм-множиною називається множина всіх можливих значень лінгвістичної змінної.

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

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

А.2 Функції приналежності нечіткої логіки

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

літичне представлення у вигляді деякої простої математичної функції. Це спрощує не тільки відповідні чисельні розрахунки, але і скорочує обчислювальні ресурси, необхідні для зберігання окремих значень цих функцій приналежності. Необхідність типізації окремих функцій приналежності також обумовлена наявністю реалізацій відповідних функцій у відомих інструментальних засобах (наприклад, в системі MATLAB).

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

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

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

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

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

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

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

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

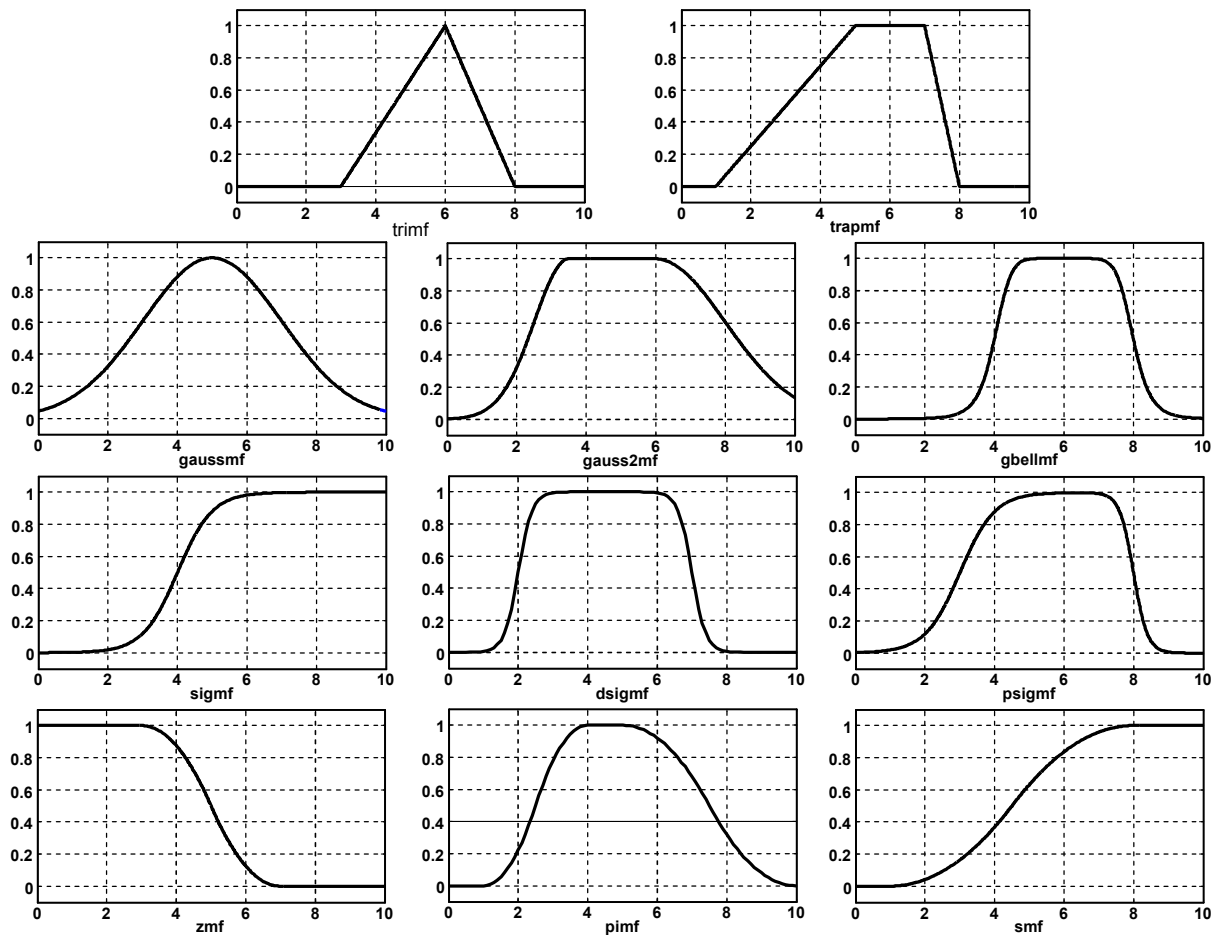


Рисунок А.1 – Типові функції приналежності нечітких множин

ДОДАТОК Б

ОПЕРАЦІЇ НАД НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ

Б.1 Логічні операції

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

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

Позначення: $A \subset B$.

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

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

Позначення: $A = B$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Приклади. Нехай

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

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

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

Тут:

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

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

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

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

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

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

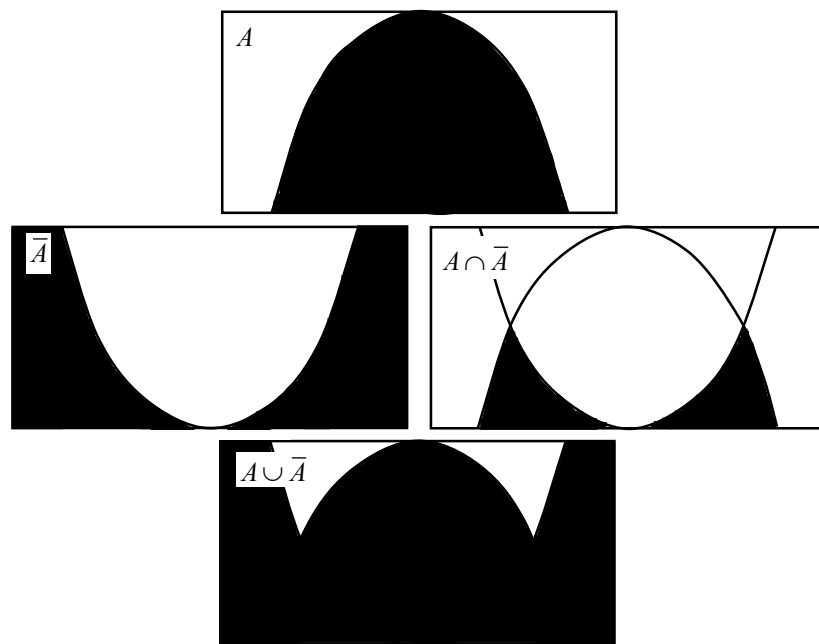


Рисунок Б.1 – Графічна інтерпретація логічних операцій

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

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

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

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

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

Простим випадком трикутних норм є:

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

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

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

Приклади *T* - конорм:

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

Б.2 Алгебраїчні операції з нечіткими множинами

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

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

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

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

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

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

Не виконуються:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

які використовуються при роботі з лінгвістичними невизначеностями.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Приклад. Нехай

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

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

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

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

Тоді

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

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

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

де $\alpha \leq 1$.

ДОДАТОК В

НЕЧІТКІ ВІДНОШЕННЯ

В.1 Способи завдання нечітких відношень

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

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

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

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

Приклади.

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

Таблиця В.1 – Завдання нечіткого відношення

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

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

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

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

В.2 Операції над нечіткими відношеннями

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

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

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

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

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

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

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

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

Для введених операцій справедливі наступні властивості дистрибутивності:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Приклад. Хай

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

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

Тоді

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

При цьому

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

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

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

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

дистрибутивна щодо об'єднання, але недистрибутивна щодо перетину:

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

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

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

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

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

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

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

ДОДАТОК Г

СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ

Г.1 Порядок формування нечітких висновків

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

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

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

.....

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

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

Приклад подібного правила.

Якщо x – «низьке», то y – «високе».

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

$$R = A \rightarrow B,$$

де « $\rightarrow$ » називається нечіткою імплікацією.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

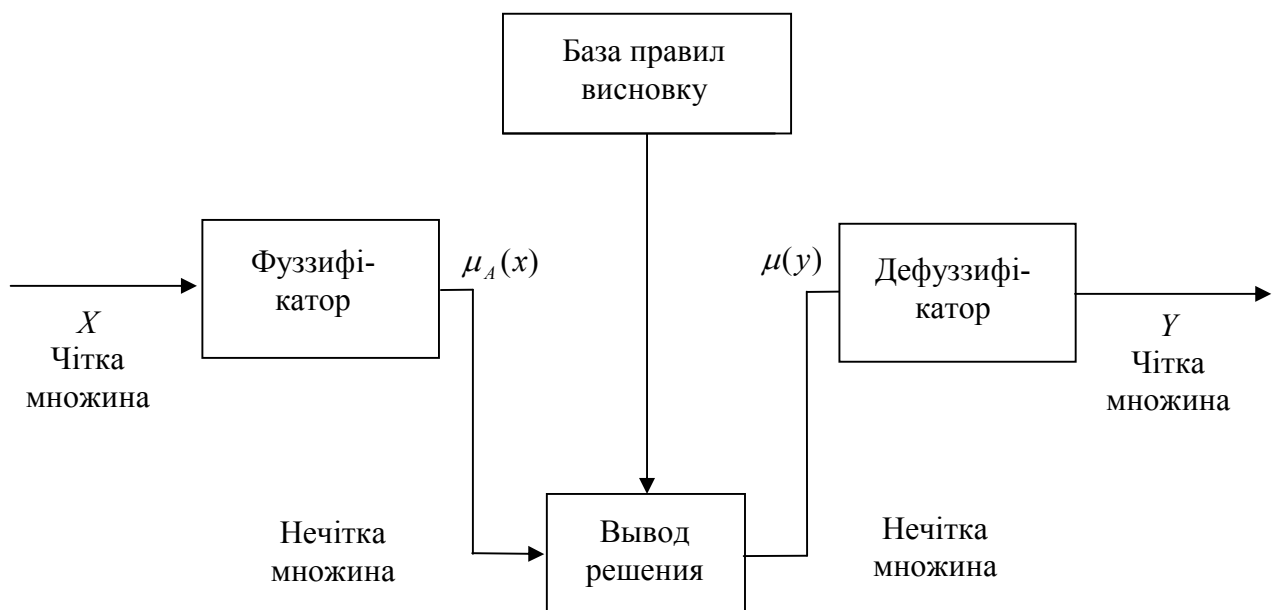


Рисунок Г.1 – Структура нечіткої системи з фузифікатором і дефузифікатором

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

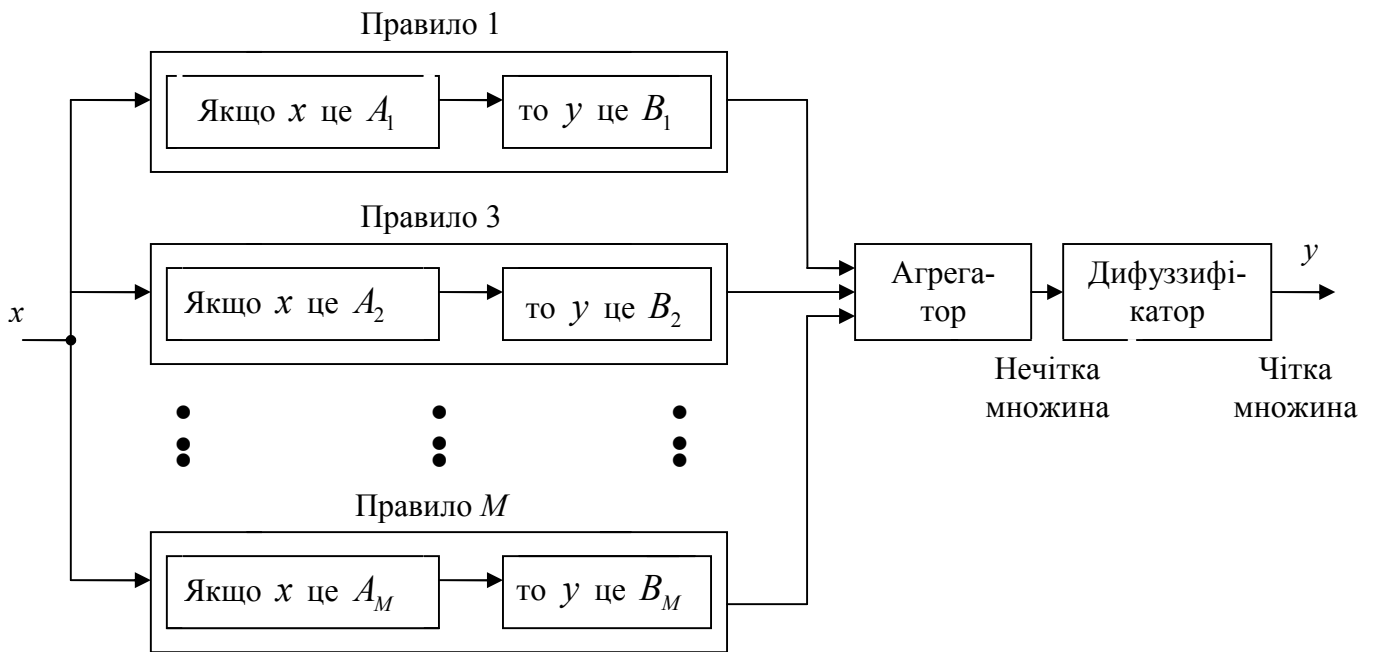


Рисунок Г.2 – Організація висновку в нечіткій системі
за наявності M правил висновку

Приклад. Нехай деяка система описується наступними нечіткими правилами:

P_1 : якщо $x \in A$, тоді $w \in D$,

P_2 : якщо $y \in B$, тоді $w \in E$,

P_3 : якщо $z \in C$, тоді $w \in F$,

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

Процедура отримання логічного висновку ілюструється рис. Г.3.

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

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

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

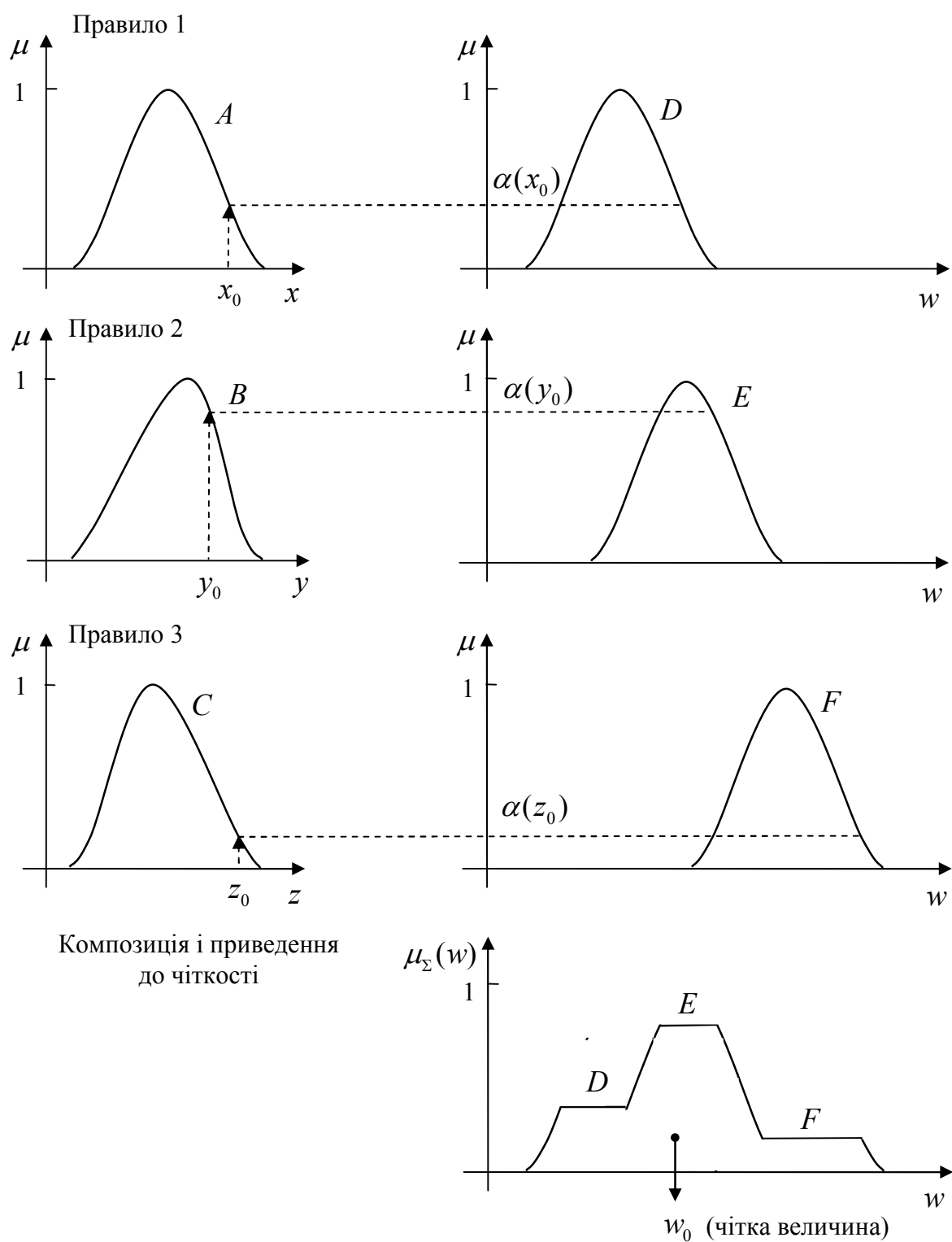


Рисунок Г.3 – Ілюстрація до процедури логічного висновку

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

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

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

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

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

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

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

де x і y – імена вхідних змінних;

z – ім'я змінної висновку;

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

Г.2 Алгоритм Mamdani

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Г.3 Алгоритм Tsukamoto

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

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

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

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

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

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

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2}{\alpha_1 + \alpha_2};$$

у загальному випадку (дискретний варіант центроїдного методу)

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

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

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

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

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

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

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

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

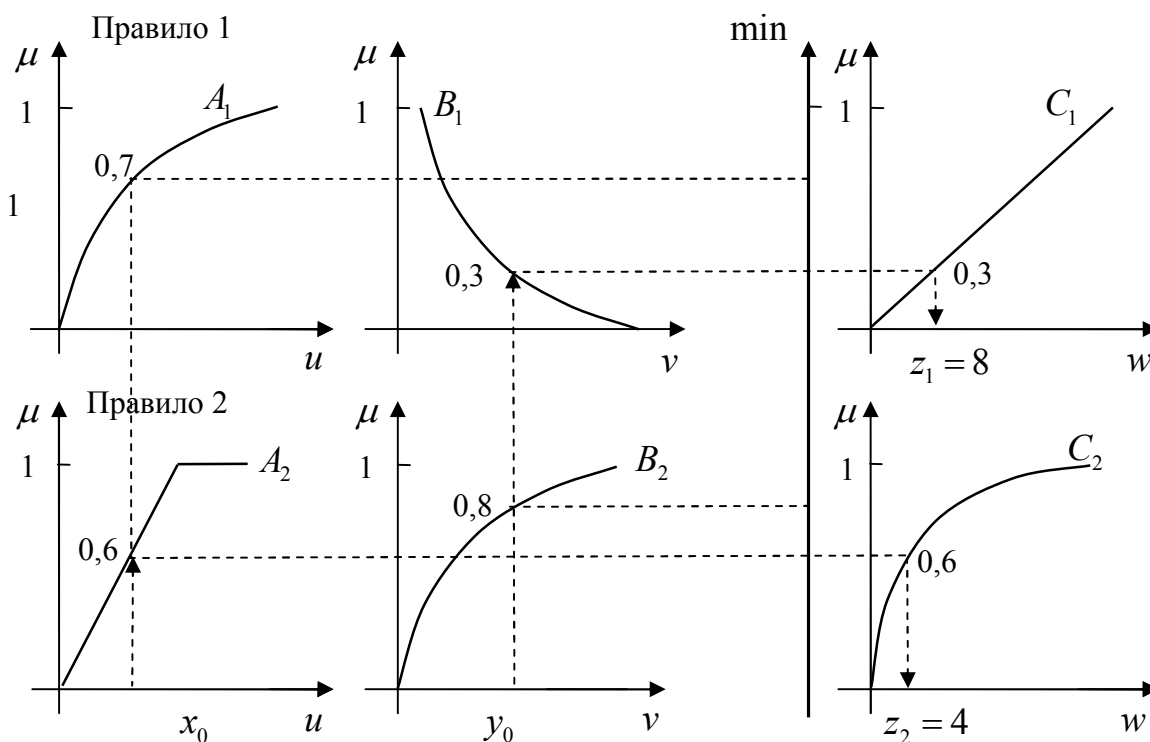


Рисунок Г.4 – Ілюстрації до алгоритму Tsukamoto

Г.4 Алгоритм Sugeno

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

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

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

Представлення алгоритму.

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

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

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

3. На третьому етапі визначається чітке значення змінної висновку:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

Ілюструє алгоритм рис. Г.5.

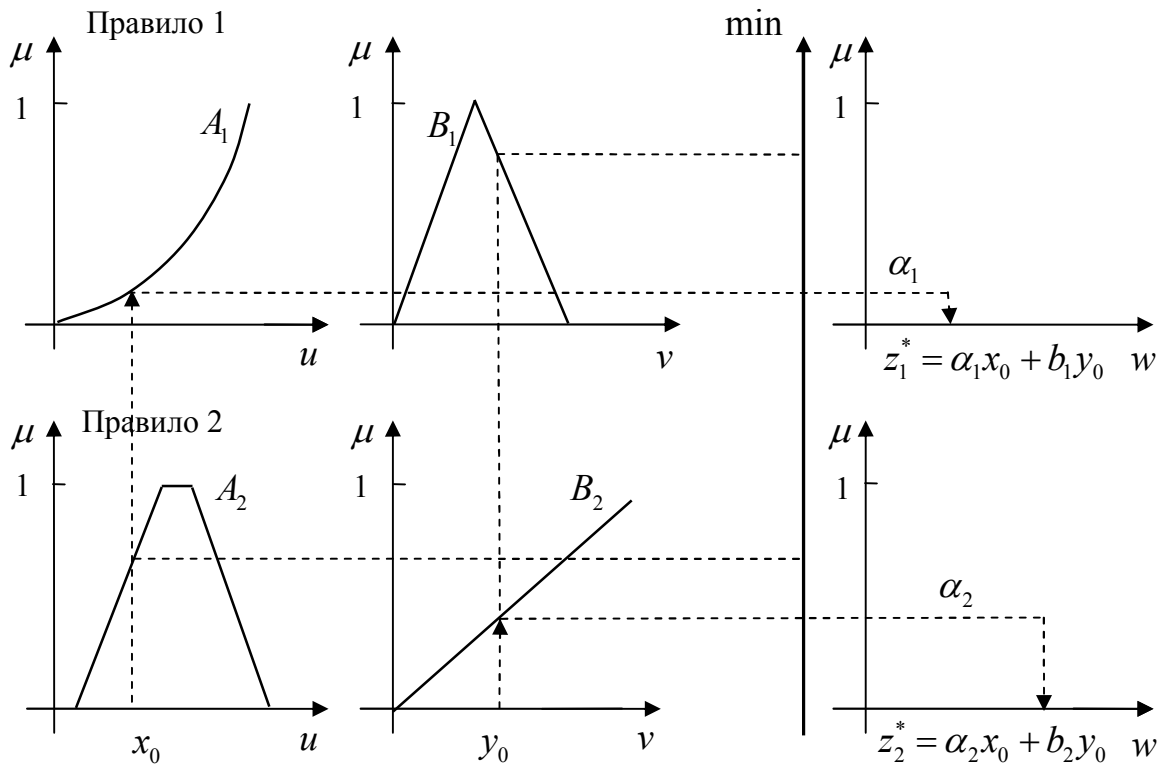


Рисунок Г.5 – Ілюстрація до алгоритму Sugeno

Г.5 Алгоритм Larsen

У алгоритмі Larsen нечітка імплікація моделюється з використанням оператора множення.

Опис алгоритму.

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

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

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

а потім – часткові нечіткі підмножини

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

3. Знаходиться підсумкова нечітка підмножина з функцією приналежності.

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

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

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

Алгоритм Larsen ілюструється рис. Г.6.

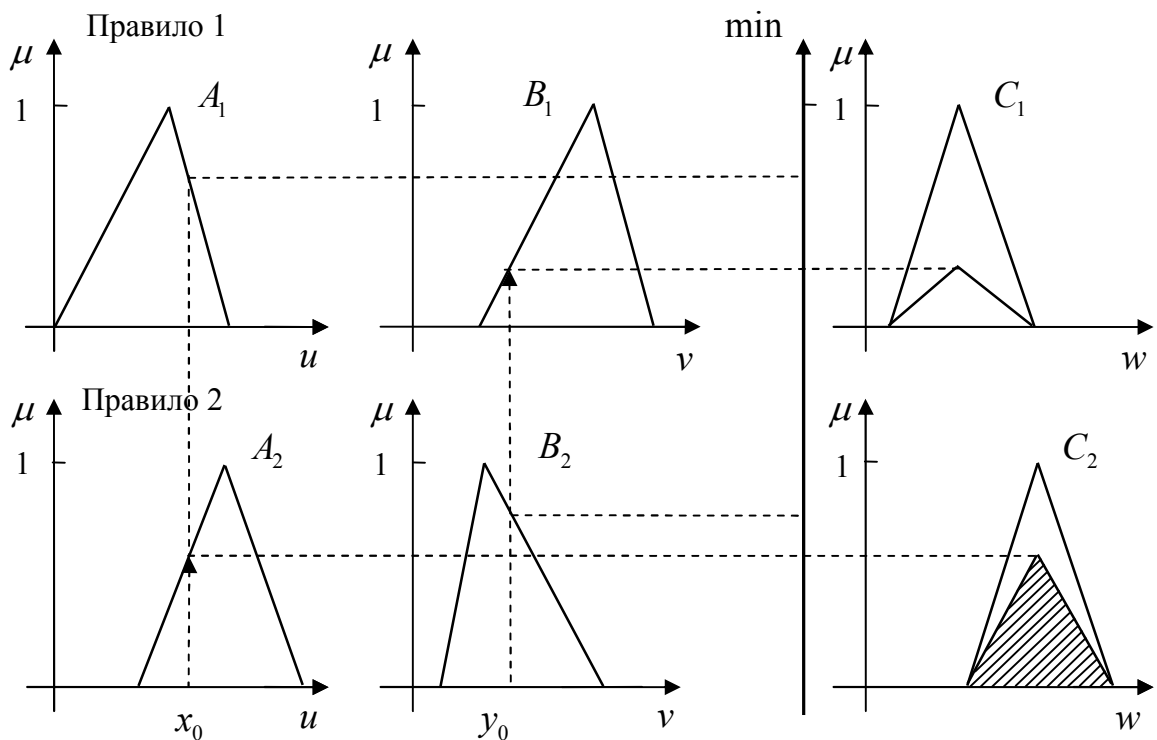


Рисунок Г.6 – Ілюстрація алгоритму Larsen

Г.6. Спрощений алгоритм нечіткого висновку

Початкові правила в даному випадку задаються у вигляді:

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

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

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

Опис алгоритму

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

$$z_0 = \frac{\alpha_1 c_1 + \alpha_2 c_2}{\alpha_1 + \alpha_2},$$

або – в загальному випадку наявності n правил – по формулі

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

Ілюстрація алгоритму приведена на рис. Г.7.

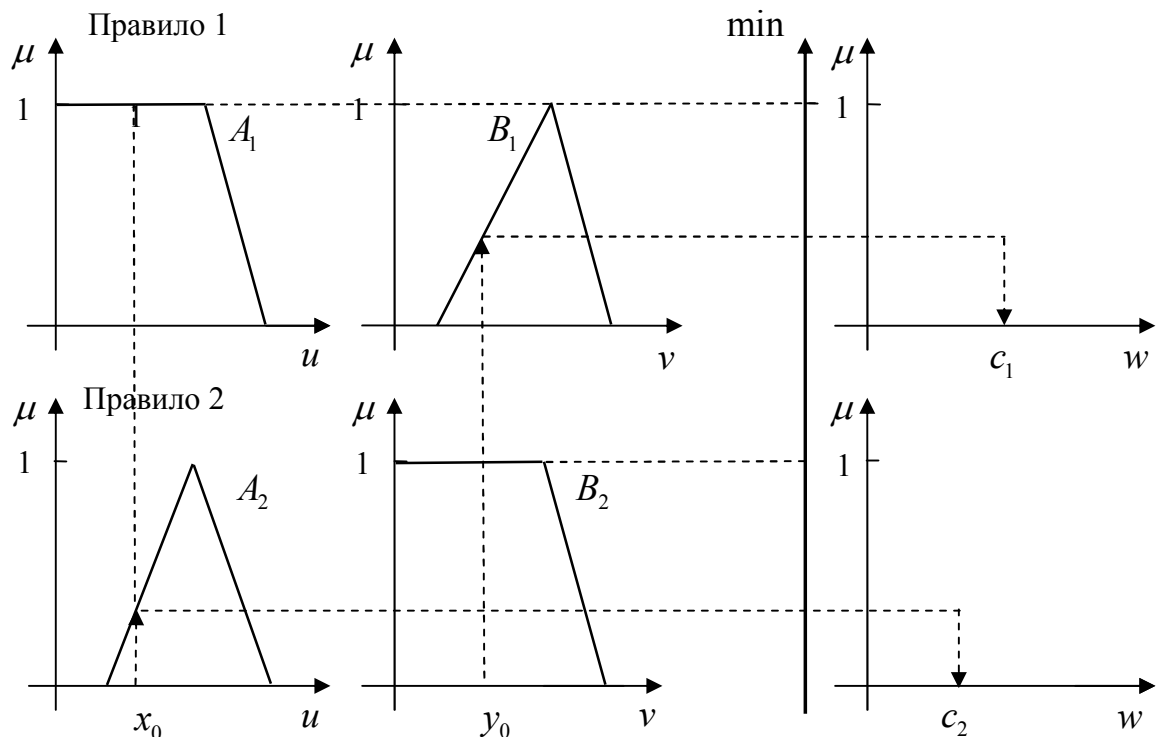


Рисунок Г.7 – Ілюстрація спрощеного алгоритму нечіткого висновку

Г.7 Методи приведення до чіткості

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

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

для дискретного варіанту:

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

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

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

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

$$z_0 = \frac{\int_G z dz}{\int_G dz},$$

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

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

$$z_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_j.$$

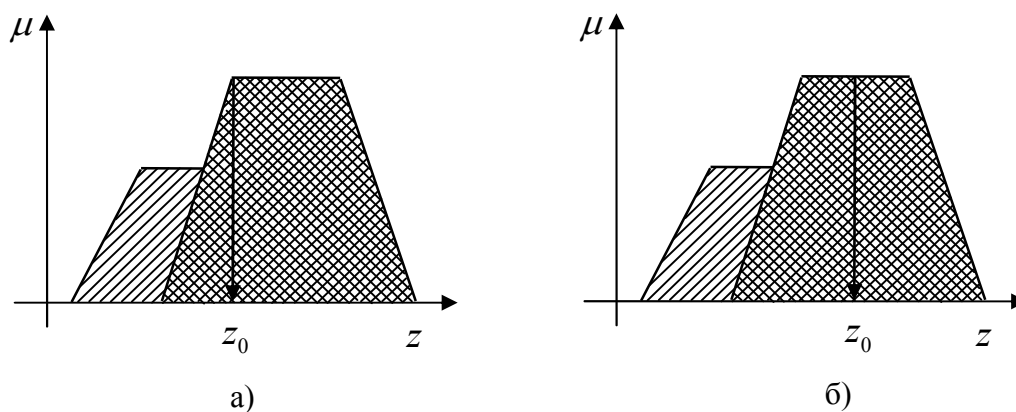


Рисунок Г.8 – Ілюстрація до методів приведення до чіткості:

а) – перший максимум; б) – середній максимум

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

$$z_0 \in \{z \mid \mu_{\Sigma}(z) = \max_z \mu_{\Sigma}(z)\}.$$

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

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

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

ДОДАТОК Д

Файл вихідних даних

```
clear;clc;echo on;

% Система управління електроприводом рольганга
% (3-х роликова секція за ножицями)
% 2024 рік

% Вихідні дані
kd=0.26;
In=380;
Mn=In/kd;
kn=0.109;
ktp=27;
kc=0.028;
Tmc=5e-3;
Ta=0.053;
Te=0.048;
Re=0.0482;
Jd=7,7;
Jm=21,8;
Js=Jd+Jm;
w0=5;
c12=(w0^2)*(Jd*Jm)/(Jd+Jm);
%c12=400.0;
b12=10;
b12=5;
b12=0;
Tme=2*Tmc+Ta;
kpe=Js*kd^2*kc/(2*Tme*kn);
kie=kpe/(4*Tme);
Uz=24;

Uz=24;

% Матриці
A=[-b12/Jm 1/Jm b12/Jm zeros(1,5);
-c12 0 c12 zeros(1,5);
b12/Jd -1/Jd -b12/Jd 1/Jd zeros(1,4);
zeros(1,4) 1/kd 0 0 0;
0 0 0 -kd/(2*Tmc^2) -1/Tmc kpe/(2*Tmc^2*kc) -
kpe/(2*Tmc^2*kc) 1/(2*Tmc^2*kc);
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(5,8);  
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);
```