

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

О.Ю. Колларов

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2020 р.

Дипломна робота

магістра

(освітній ступінь)

на тему Інтелектуальне керування положенням двомасової ЕМС

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛКМ-19

(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Сороколіт Д.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник проф. каф. ЕлІн, д.т.н., с.н.с Тімошенко С. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент:

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

*Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
 запозичень з праць інших авторів без
 відповідних посилань.*

Студент _____

(підпис)

Покровськ – 2020 р.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри**

(Колларов О. Ю.)

« ____ » _____ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Сороколіту Дмитру Олександровичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Інтелектуальне керування положенням двомасової ЕМС
керівник роботи Тімошенко С. М., проф. каф. ЕлІн, д.т.н, с.н.с.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ №

2. Строк подання студентом роботи 07 грудня 2020 року

3. Вихідні дані до роботи: Номінальна потужність електро-
двигуна – 160 кВт, кількість пар полюсів – 6, номінальний струм електро-
двигуна – 390 А, номінальна напруга електродвигуна – 440 В, номінальна
частота обертання електродвигуна – 980 об/хв., величина опору якірного
ланцюга – 0,025 Ом, момент інерції електродвигуна – 58,7 кг·м², стала дви-
гуна – 4,18 В·с, стала часу якірного ланцюга – 82 мс, механічна стала часу
– 84 мс, коефіцієнт підсилення перетворювача – 68,35 В, стала часу пере-
творювача – 1,7 мс, коефіцієнт жорсткості валу – 2,06·10⁵ Н·м, момент
інерції ротора машини – 29,35 кг·м². Зазор в редукторі оброти довільно.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Визначення актуальності питання створення сучасних методів дослідження процесів керування електроприводами.

2. Будова математичної моделі приводу з двигуном постійного струму.

3. Покращення класичної математичної моделі двомасової електромеханічної системи.

4. Проектування фаззі-регулятора положення двомасової ЕМС.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Десять слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Біла Н. С.		
Розділи 1, 2	Колларов О. Ю.		

7. Дата видачі завдання 16 вересня 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Визначення актуальності питання створення сучасних методів дослідження процесів керування електроприводами.	16.09.2020 – 04.10.2020	
2.	Будова математичної моделі приводу з двигуном постійного струму.	05.10.2020 – 18.10.2020	
3.	Покращення класичної математичної моделі двомасової електромеханічної системи.	19.10.2020 – 31.10.2020	
4.	Розрахунок параметрів регуляторів системи.	01.11.2020 – 05.11.2020	
5.	Дослідження системи керування положенням двомасової ЕМС з П- та ПП-регулятором.	06.11.2020 – 27.11.2020	
6.	Проектування фаззі-регулятора положення двомасової ЕМС.	28.11.2020 – 04.12.2020	
7.	Огляд питань охорони праці	05.12.2020 – 07.12.2020	

Студент

(підпис)

Сороколіт Д.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Тімошенко С. М.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Сороколіт Д.О. Інтелектуальне керування положенням двомасової ЕМС / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2020.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі визначені проблемні питання при роботі електроприводів технологічних систем та обґрунтована актуальність створення сучасних методів дослідження процесів керування електроприводами.

У другому розділі була складена класична математична модель електромеханічної системи з двигуном постійного струму з урахуванням основних теоретичних положень про роботу двигуна постійного струму.

У третьому розділі наведено була розроблена і досліджена модель двомасової електромеханічної системи: визначено характеристики складових об'єктів системи, здійснено розробку і визначені параметри регулятора, складена і досліджена система керування положенням двомасової ЕМС з П- та ПІ-регуляторами.

У четвертому розділі спроектовано фаззі-регулятор положення двомасової ЕМС: визначено перспективи застосування фаззі-регуляторів, складена їх функціональна схема та виконано синтез системи регулювання з нечіткими регулятором положення на основі нечіткої логіки в програмному середовищі Matlab.

Ключові слова: електропривод, математична модель, електромеханічна система, регулятор, П-регулятор, ПІ-регулятор, фаззі-регулятор, Matlab.

SUMMARY

Sorokolit D.O. Intelligent position control of two-mass EMC / Graduation qualifying work for obtaining an educational level "master" in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Pokrovsk, 2020.

Thesis consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions, a list of sources and appendices.

The first section identifies problematic issues in the operation of electric drives of technological systems and substantiates the relevance of creating modern methods for studying the control processes of electric drives.

In the second section, a classical mathematical model of an electromechanical system with a DC motor was compiled, taking into account the basic theoretical provisions on the operation of a DC motor.

In the third section the model of two-mass electromechanical system is developed and investigated: characteristics of component objects of system are defined, development and parameters of the regulator are carried out, the control system of position of position of two-mass EMC with P-and PI-regulators is made and investigated.

In the fourth section the fuzzy-regulator of position of two-mass EMC is designed: prospects of application of fuzzy-regulators are defined, their functional scheme is made and synthesis of control system with fuzzy regulator of position on the basis of fuzzy logic in Matlab software environment is executed.

Keywords: electric drive, mathematical model, electromechanical system, regulator, P-regulator, PI-regulator, fuzzy-regulator, Matlab.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ВИЗНАЧЕННЯ ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ ПРИ РОБОТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ	9
1.1 Основні теоретичні положення про електроприводи технологічних систем	9
1.2 Актуальність питання створення сучасних методів дослідження процесів керування електроприводами	13
2 СТВОРЕННЯ КЛАСИЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	16
2.1 Основні теоретичні положення про роботу двигуна постійного струму	16
2.2 Будова математичної моделі приводу з ДПС	19
3 ПОКРАЩЕННЯ КЛАСИЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДВОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	30
3.1 Короткий огляд головних складових об'єктів двомасової системи	30
3.2 Розробка регулятора системи	34
3.3 Розрахунок параметрів регуляторів системи	35
3.3.1 Розрахунок додаткових для розрахунку параметрів	35
3.3.2 Розрахунок параметрів регулятора струму	36
3.3.3 Розрахунок параметрів регулятора швидкості	38

	7
3.3.4 Розрахунок параметрів регулятора положення	39
3.4 Дослідження системи керування положенням двомасової ЕМС з П-регулятором	45
3.5 Дослідження системи керування положенням двомасової ЕМС з ПІ-регулятором	47
4 ПРОЕКТУВАННЯ ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРА ПОЛОЖЕННЯ ДВОМАСОВОЇ ЕМС	50
4.1 Перспективи застосування фаззи-регуляторів	50
4.2 Функціональна схема нечіткого регулятора (фаззи-регулятор)	51
4.3 Синтез системи регулювання з нечіткими регулятором положення на основі нечіткої логіки в програмному середовищі Matlab	53
4.4 Включення нечіткої логіки в Simulink-модель системи	62
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	70
ДОДАТОК Б. ОГЛЯД ПИТАНЬ БЕЗПЕКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ	84
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	103

ВСТУП

Труднощі, що виникають при інженерному проектуванні вимагають здійснення досить суттєвої підтримки з боку наукової спільноти з використанням останніх тенденцій розвитку інформаційних технологій та комп'ютерних систем.

Нинішні електромеханічні системи (ЕМС) страждають від серйозних недоліків при їх експлуатації, які можна пояснити: невідповідним до умов роботи обладнання проектуванням, досить складна структура облаштування, робота розроблених систем у режимах, на які вони не розраховані.

При застосуванні систем автоматизованого проектування (САПР) виникають проблеми недостатнього розуміння та враховування фактичних процесів, що протікають у системах, або алгоритми САПР обмежують свободу вибору того чи іншого технічного рішення і негативно впливають на процес моделювання об'єкта чи системи. Не зважаючи на деякі недоліки, САПР можуть надати незамінну підтримку для обслуговування та визначення кінцевої конструкції спроектованих об'єктів.

Точно можна сказати, що поверхневого опису спостережень та ведення статистичних даних параметрів роботи об'єктів і процесів проектування загалом може бути недостатньо для «глибокої» проробки моделі, що проектується. За цих вимог необхідним є більш ретельне визначення структури об'єкта, що досліджується, та відокремлення найбільш важливих характеристик та параметрів роботи. Тому, при розробці моделей об'єктів електромеханічних систем необхідно з можливо більшою ретельністю визначити застосованість проектних рішень з огляду на особливості протікання відповідних процесів.

1 ВИЗНАЧЕННЯ ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ ПРИ РОБОТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Основні теоретичні положення про електроприводи технологічних систем

Розробку електроприводів починають із завдання здійснення механічним обладнанням певної роботи.

Сучасні технології дозволяють здійснювати спрощення кінематичних механізмів, зменшення застосування механічних гальмівних пристроїв та передавальних редукторів. Цю задачу можна здійснити за рахунок використання більш гнучких та надійних систем електроприводів, реалізують відповідні режими прискорення та уповільнення, дасть можливість здійснювати регулювати та координувати швидкості руху приводних механізмів [1].

Для забезпечення найкращих характеристик електроприводу необхідно постійно контролювати параметри роботи як двигуна, так і механічної частини [1].

В даний час у електроприводах використовують два тип двигунів: асинхронні двигуни з постійним магнітом або асинхронні двигун з короткозамкненим ротором «білчина клітка» та двигуни постійного струму.

Двигуни з постійними магнітами мають більш високу щільність крутного моменту, широкий діапазон швидкостей та крутних моментів, більш компактні розміри та високу ефективність завдяки наявності потужного магнітного поля. У асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором маємо наявне ковзання ротора відносно синхронної швидкості обертання магнітного поля [1].

У двигунах постійного струму з незалежним збудженням електрорушійна сила (ЕРС) самоіндукції відіграє у приводах роль кеуючої

сили в режимах прискорення та уповільнення. Дія ЕРС самоіндукції викликає струм у якорі і крутний момент двигуна змінюється у відповідному узгодженні з цими змінами. Це згладжує стрибки значень струмів та крутних моментів і воно тим сильніше, чим швидше прискорення обертання двигуна – менший статичний момент і момент інерції приводу. Наявність явища згладжування дозволяє здійснювати запуск двигунів на холостому ході шляхом прямого підключення до мережі без зовнішніх пускових елементів. Двигуни постійного струму незалежного збудження мають більший внутрішній опір і допускають більші значення номінальних струмів в обмотках. Частоту обертання можна регулювати шляхом зміни напруги якоря, при цьому критичний опірний момент майже не змінюється і не залежить від частоти обертання [2].

До приводних двигунів пред'являються постійно зростаючі вимоги [3]:

- висока реакція відклику у перехідних процесах,
- дотримання чітко визначеного значення крутного моменту в якомога більшому діапазоні частот обертання (особливо на низьких частотах обертання,
- висока перевантажувальна здатність по крутному моменту,
- дотримання низького значення коливання частоти обертання,
- якомога більша можлива частота обертання,
- низький ступінь нагрівання та високе значення ККД.

Виконання цих вимог забезпечить гарні динамічні характеристики електричного приводу, сприятиме меншому значенню моменту інерції ротора.

Отримання високих значень обертального моменту двигунів можна досягти шляхом впровадження оптимізованої форми магнітного поля, яке може збуджуватися у різний спосіб.

Динамічні режими електроприводів можна схарактеризувати тим, що в них відбуваються різноманітні, взаємопов'язані перехідні процеси – електромагнітні, електромеханічні, теплові та інші. Дані процеси тягнуть за собою зміну відповідних станів станів електроприводів у функції часу [3]:

- електромеханічні: частоту обертання (n), струм у ланцюгах (i), крутний момент на валу (M),
- взаємний вплив динамічних та механічних характеристик: залежність зміни частоти обертання від зміни крутного моменту опору на валу двигуна,
- взаємний вплив динамічних і електромеханічних характеристик: залежність зміни частоти обертання від зміни значення струму в обмотках.

Знання про зміну і взаємний вплив цих характеристик може визначити чітку картину перехідних процесів, що відбуваються в електроприводах.

Виникнення динамічних режимів можна пояснити виникненням різноманітних впливів – керуючих або збурюючих. Ці впливи можуть бути пов'язані із самою наявністю різноманітних перехідних процесів у електроприводах і відображають перехід з одного стану приводу в інший.

З практичної точки зору, врахувати усі перехідні процеси та визначити вплив усіх факторів досить складно або, у більшості випадків, неможливо [3].

Для спрощення дослідження динамічних властивостей приводів та врахування основних впливаючих факторів на протікання перехідних процесів, усі процеси умовно можна розділити на три категорії [3]:

- механічна складова, що характеризує обертові рухи в електроприводі, та загалом усі характеристики рухомих частин електроприводу і приводних механізмів,
- електромагнітна складова, що характеризує усі можливі прояви індуктивності на значення струму, обертального моменту, ковзання та іншого,

– теплова складова, що характеризує теплові процеси нагріву деталей електроприводу під дією процесів перемагнічування, блукаючих струмів, тертя та іншого.

Кожна категорія має різний ступінь впливу на протікання перехідних процесів, шляхом зміни часу цього протікання та отримуваних параметрів. Для загальної характеристики перехідних процесів вводять поняття «постійна часу», яке є поєднуючою характеристикою параметрів роботи електроприводу у перехідних режимах.

Постійна часу механічної складової визначається загальною масою рухомих частин та інерцією частин, що обертаються, приведених до вала електродвигуна.

Постійні часу (число яких залежить від кількості активно-індуктивних ланцюгів) електромагнітної складової характеризують електромагнітну інерцію приводу.

Постійною часу теплової складової при дослідженні перехідних процесів в електроприводах температурну нехтують через практичну її незмінність та сталість для різних режимів роботи.

Для дослідження динамічних режимів електроприводів можна використати теоретичний, експериментальний метод та їх комбінацію.

Експериментальні методи засновані на аналізі відстежених та зафіксованих за допомогою вимірювального обладнання параметрів перехідних процесів. Точність при застосуванні даної методи залежить від класу точності застосованого вимірювального обладнання, точної оцінки умов проведення експерименту та іншого. Проблема застосування даного способу полягає у важкості чи неможливості вимірювання певних змінних або неможливості проведення вимірювань взагалі.

Теоретичні методи досліджень базуються на знаннях фізичної сутності процесів та застосуванні відповідних принципів математичного апарату. Згідно цього методу складається відповідний до процесу математичний опис (формула), яке розв'язується за допомогою числових

методів. Гарним підґрунтям для реалізації розв'язання можуть бути моделі, створені на основі складеного рівняння у спеціалізованих програмних середовищах або за допомогою мов програмування. Вибір відповідного чисельного методу для подальшого моделювання та параметрів управління процесом визначається ступенем точності отриманого результату – критерієм точності є максимальна наближеність поведінки складеної моделі до поведінки реального об'єкта [4].

1.2 Актуальність питання створення сучасних методів дослідження процесів керування електроприводами

Сучасні системи керування у останній час набули широкого розвитку і знайшли широкого застосування у різних системах електроприводу технологічних об'єктів. Завдяки застосуванню даних систем можна досить просто та ефективно керувати такими складними об'єктами як двигун постійного струму й істотно розширити область їхнього застосування.

Такий розвиток тісно пов'язаний з посиленням розвитком засобів мікроелектроніки, яка здатна реалізувати алгоритми управління будь-якої складності для будь-яких вихідних даних.

Найкращим способом дослідження існуючих та створюваних систем керування є математичні моделі електричних машин та засобів керування для сталих і перехідних режимів. Основною рисою цих моделей є попереднє складання математичних рівнянь та залежностей, які з визначеним ступенем точності описують процеси перетворення енергії в досліджуваних електроприводах, реалізують поведінку та реакцію системи приводів при різних режимах роботи та наявності зовнішніх впливів [4].

Будова точної математичної моделі досліджуваного електроприводу і та завдання динаміки перехідних процесів при роботі електроприводів є доволі актуальним завданням.

Математичне моделювання поряд з прикладним програмним забезпеченням набули широкого застосування зокрема для аналізу динаміки та синтезу електромеханічних систем. Першим етапом є аналітичне моделювання електромеханічної системи на підставі здійснення точних методів рішення диференціальних рівнянь, що дозволяє знизити похибки обчислень на відміну від застосування чисельних методів розрахунку. Для аналізування динаміки при роботі електромеханічної системи складають систему диференціальних рівнянь [4].

Характерними режимами роботи електромеханічних систем є статичний і динамічний. Особливої зацікавленості з точки зору моделювання є динамічний режим, при яких відбувається перехід системи з одного стійкого стану в інший під дією зовнішніх впливів. Основним завданням моделювання електромеханічної є опис системи за допомогою диференціальних рівнянь і пошук їх рішення.

У якості режимів для моделювання електромеханічної системи придатні практично усі режимів роботи: пуск, реверсування, гальмування, збільшення та зменшення навантаження.

Складання математичної моделі полягає у складанні опису процесів електромеханічного перетворення енергії за допомогою незалежних змінних, у якості яких можна використати дійсні значення параметрів роботи електроприводів (струми в обмотках, дійсні значення напруг, опори, тощо). Використання цього методу опису та дослідження динамічних процесів поведінки системи може дати безпосереднє уявлення про фізичні процеси, що протікають у системі [4].

Отримані математичні вирази, структурні та функціональні схеми, складені алгоритми роботи дозволяють отримати різноманітні варіанти будови систем керування електроприводами.

Для створення моделей існує безліч прикладних програм, які дозволяють використовувати принципи програмування, які дозволяють реалізувати складені системи рівнянь і програмувати методи їх розв'язання. Для цього необхідно створити у графічному редакторі геометричну модель системи із завданням властивостей і параметрів окремих елементів системи, що дозволяє отримати досить точні результати роботи реальної моделі.

Найкращим до застосування у даному випадку є програмне середовище MatLab з підсистемами SimPowerSistems та Simulink [5].

Прикладні застосунки Simulink і бібліотеки блоків SimPowerSistems за допомогою загальноприйнятих методик створення моделей з використанням графічного інтерфейсу даної програми.

Використання спеціальних можливостей програми дозволяє отримати графічне (наочне) відображення результатів моделювання та «збільшити» масштаб у конкретних точках моделі. Дане програмне забезпечення дозволяє здійснювати різноманітні операції з векторами і матрицями при різноманітних режимах обчислень. Воно дозволяє виконувати як звичайні арифметичні та алгебраїчні операції, так і складні обчислення – звернення матриць, визначення їх значень, векторів, пошук розв'язання системи алгебраїчних рівнянь та інше. Характерною рисою програмного забезпечення є можливість її модифікації і адаптації у будь-який момент до конкретних завдань та пошукових істин [5].

Дане програмне забезпечення надає досить широкі можливості для роботи з сигналами різного походження – аналогових чи цифрових, що дозволяє досить просто і у доступній формі здійснювати проектування та розрахунок електричних пристроїв (тригерів, фільтрів, перетворювачів та іншого) з отриманням частотних, імпульсних та перехідних характеристик, здійснення спектрального аналізу та синтезу.

2 СТВОРЕННЯ КЛАСИЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 Основні теоретичні положення про роботу двигуна постійного струму

Умовою ефективного електро механічного перетворення енергії у двигунах постійного струму є наявність постійного потоку змінного струму в обмотці якоря [6].

Досягнення даної умови можливо за рахунок керування роботою колектора, який здійснює перемикання та регулювання постійний струм від джерела живлення.

Динамічні параметри двигунів постійного струму залежать від природи струму джерела живлення. Для опису електро механічних процесів у двигуні постійного струму можна використати систему рівнянь [6]:

$$\left. \begin{aligned} U &= E_a + I_a(R_a + R_{ад}). \\ E_a &= C\Phi\omega, M = C\Phi I_a. \\ \omega(I_a) &= \frac{U}{C \cdot \Phi} - \frac{I_a \cdot (R_a + R_{ад})}{C \cdot \Phi} = \omega_0 - \Delta\omega. \\ \omega(M) &= \frac{U}{C \cdot \Phi} - \frac{M \cdot (R_a + R_{ад})}{(C \cdot \Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

де U – напруга обмотки якоря, В,

I_a – струм обмотки якоря, А,

R_a – опір обмотки якоря, Ом,

$R_{ад}$ – додатковий опір в ланцюзі якоря, Ом,

C – постійна для конкретної машини [6]:

$$C = \frac{pN}{2\pi\alpha} \quad (2.2)$$

p – число пар полюсів,

N – число ефективних провідників обмотки якоря,

ω – кутова швидкість,

Φ – магнітний потік у зазорі [6]:

$$\Phi = \alpha_\delta B_\delta \tau_a \quad (2.3)$$

α_δ – коефіцієнт полюсної дуги, $\alpha_\delta = 0,6 - 0,75$,

τ – полюсний поділ [6]:

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} D_a \quad (2.4)$$

l_a – діаметр и довжина якоря відповідно,

B_δ – індукція у зазорі, $B_\delta = (0,7 - 1,0)$ Тл [6],

ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу [6]:

$$\omega_0 = \frac{U}{C\Phi} \quad (2.5)$$

$\Delta\omega$ – зниження швидкості під впливом навантаження.

Двомасові електромеханічні системи можуть розглядатися як мехатронні системи, що включають різноманітні електромеханічні об'єкти з урахуванням їхньої геометрії, деформаційними змінами та інших параметрів. Факторами, що впливають на ефективність роботи електромеханічних систем є: пружні деформації, пружні коливання, параметрична невизначеність, неможливість виміряти всі змінні, що характеризують роботу системи [7].

Для складання лінеаризованої математичної моделі двомасової електромеханічної системи можна знехтувати електромагнітною інерцією двигуна [7]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_2 &= \omega_2 \\ \dot{\omega}_2 &= \frac{M_e}{J_2} \\ \dot{M}_e &= p(\omega_1 - \omega_2) \\ \dot{\omega}_1 &= \frac{k_m \cdot k_p \cdot k_3 \cdot b_{ш} \cdot b_{п}}{J_1 R} u_c - \frac{k_m \cdot k_p \cdot k_3 \cdot b_{ш} \cdot b_{п}}{J_1 R} q_2 - \\ &\quad - \frac{k_m \cdot k_{EPC} + k_m \cdot k_{пз} \cdot k_p \cdot b_c}{J_1 R} \omega_1 - \frac{M_e}{J_1} \\ u_c &= u_0 + u_{зз} + u_a \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

де q_2 – похідна вихідної кутової швидкості, рад²/хв.

ω_2 – вихідна кутова швидкість, рад/хв,

M_e – крутний момент пружності, Н·м,

J_2 – другий масовий момент інерції, кг·м²,

p – жорсткість ланки, Н,

ω_1 – кутова швидкість двигуна, рад/хв,

J_1 – момент інерції двигуна, кг·м²,

R – опір обмотки якоря двигуна, Ом,

k_{EPC} – константа, що визначає виробку ЕРС двигуна,

k_p – константа, що визначає конструкцію двигуна,

k_n – коефіцієнт підсилення,

b_n – коефіцієнт підсилення під впливом маси технологічного об'єкта,

$b_{ш}$ – коефіцієнт, що характеризує швидкість двигуна,

k_3 – коефіцієнт зворотного зв'язку,

$k_{нз}$ – коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку,

u_c – загальна дія керування,

u_0 – задане значення сигналу керування,

φ – бажане кутове положення другої маси,

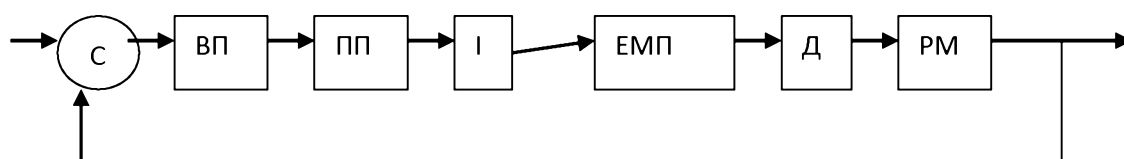
$u_{зз}$ – повна дія зворотного зв'язку,

u_a – адаптивна дія управління.

2.2 Будова математичної моделі приводу з ДПС

Здійснюємо моделювання роботи двигуна у різних режимах роботи з урахуванням наявної нелінійності.

Узагальнена функціональна схема приводу наведена на рис. 2.1 [8].



С – суматор, ВП – вимірювальний пристрій, ПП – попередній підсилювач, І – інтегратор, ЕМП – електромашичний підсилювач, Д – двигун, РМ – робоча машина

Рисунок 2.1 – Узагальнена функціональна схема приводу

Визначаємо параметри двигуна:

– механічну постійну двигуна визначимо за формулою [9]:

$$C_M = \frac{M_{ном}}{I_o^{ном}} = \frac{2,6 \cdot 10^5}{390} = 667 \frac{H \cdot m}{A} \quad (2.7)$$

– електричну постійну двигуна визначимо за формулою [9]:

$$C_E = \frac{U_D^{ном} - I_D^{ном} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_D} \quad (2.8)$$

де $U_D^{ном}$ – номінальна напруга двигуна, $U_D^{ном} = 440$ В,

$I_D^{ном}$ – номінальний струм двигуна, $I_D^{ном} = 390$ А,

$R_{\text{я}}$ – опір якоря двигуна, $R_{\text{я}} = 0,025$ Ом,

ω_D – номінальна швидкість обертання валу двигуна, $\omega_D = 103$ рад/хв.

$$C_E = \frac{440 - 390 \cdot 0,025}{103} = 4,18 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$$

– індуктивність якоря двигуна [9]:

$$L_{\text{я}} = \frac{30 \cdot \beta \cdot U_D^{ном}}{\pi \cdot p \cdot n_{ном} \cdot I_D^{ном}} \quad (2.9)$$

де β – коефіцієнт, що враховує конструктивне виконання двигуна, $\beta = 0,25$,

p – число пар полюсів, $p = 6$,

$n_{ном}$ – номінальна частота обертання валу двигуна, $n_{ном} = 980$ об./хв.

$$L_{\text{я}} = \frac{30 \cdot 0,25 \cdot 440}{3,14 \cdot 6 \cdot 980 \cdot 390} = 45,83 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Передавальна функція ЕМП [9]:

$$W(p) = \frac{K_{ЕМП}}{(T_{кер} \cdot p + 1)(T_{кл} \cdot p + 1)} \quad (2.10)$$

де $K_{EMП}$ – характеристичний коефіцієнт електромагнітного підсилювача $K_{EMП} = 10$,

$T_{кер.}$ – постійна часу обмотки керування, $T_{кер.} = 0,075$ с,

$T_{кл}$ – постійна часу короткозамкненого ланцюга, $T_{кл} = 0,04$ с.

$$W(p) = \frac{10}{(0,075 \cdot p + 1)(0,05 \cdot p + 1)}$$

Передавальна функція двигуна має вигляд [9]:

$$W_D(p) = \frac{K_D}{p \cdot (T_M \cdot p + 1)(T_E \cdot p + 1)} \quad (2.11)$$

де K_D – коефіцієнт передачі для двигуна [9]:

$$K_D = \frac{1}{C_E} = \frac{1}{4,18} = 0,2392 \quad (2.12)$$

– електромагнітна постійна часу [9]:

$$T_M = \frac{0,02 \cdot R_D}{C_E \cdot C_M} = \frac{0,02 \cdot 4,15}{4,18 \cdot 667} = 0,297 \text{ с} \quad (2.13)$$

– значення електромеханічної сталої часу визначимо за формулою [9]:

$$T_E = \frac{L_{я}}{R_{я}} = \frac{45,83 \cdot 10^{-3}}{0,025} = 1,833 \text{ с} \quad (2.14)$$

$T_M = 0,297 > 4 \cdot T_E = 4 \cdot 1,833 = 7,332$ – умова не виконується, значить значенням T_E нехтуємо.

$$W(p) = \frac{0,2393}{p \cdot (1 + 0,297p)}$$

Математична модель системи без врахування наявної нелінійності представлено на рис. 2.2 [10]:

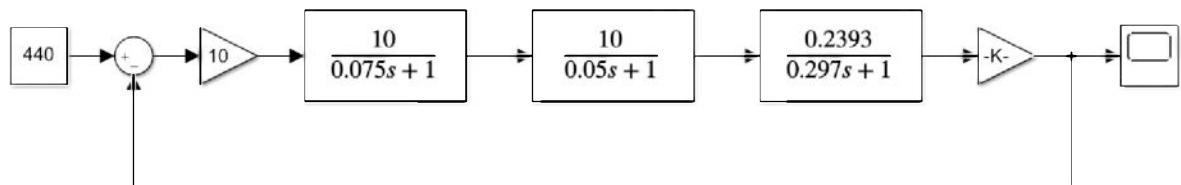


Рисунок 2.2 – Математична модель системи без врахування наявної нелінійності

У результаті моделювання отримаємо графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна (рис. 2.3).

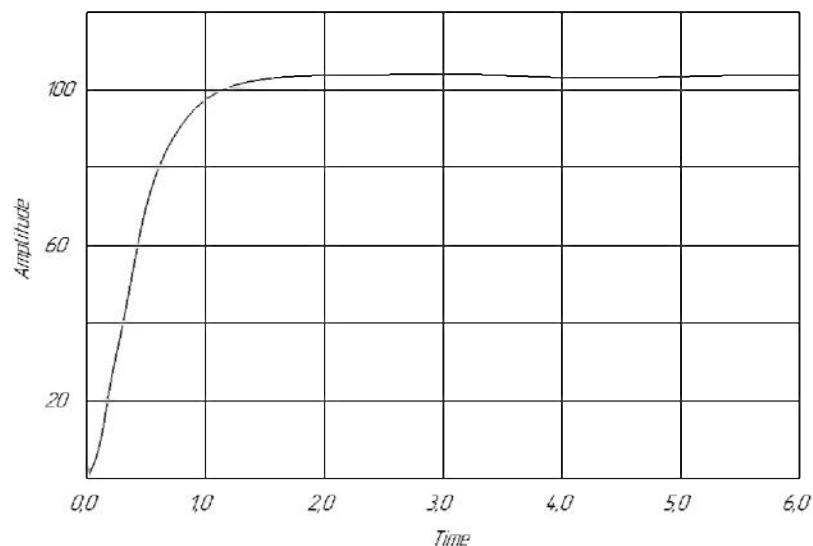


Рисунок 2.3 – Результати моделювання – графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна

З графічних залежностей виходить, що перерегулювання відсутнє (швидкодія спрацювання на рівні 1 с).

На рис. 2.4 наведено математичну модель з урахуванням наявної нелінійності [10].

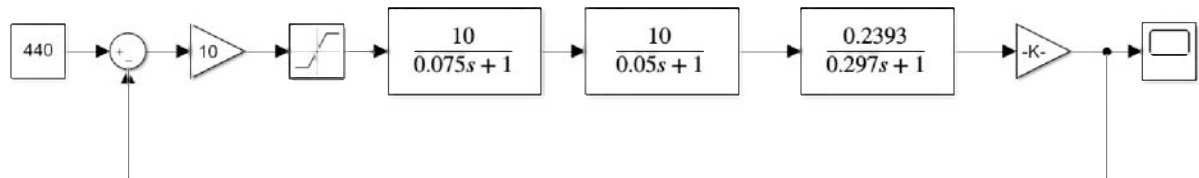


Рисунок 2.4 – Математична модель з урахуванням наявної нелінійності

Вигляд графіка перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна представлено на рис. 2.5.

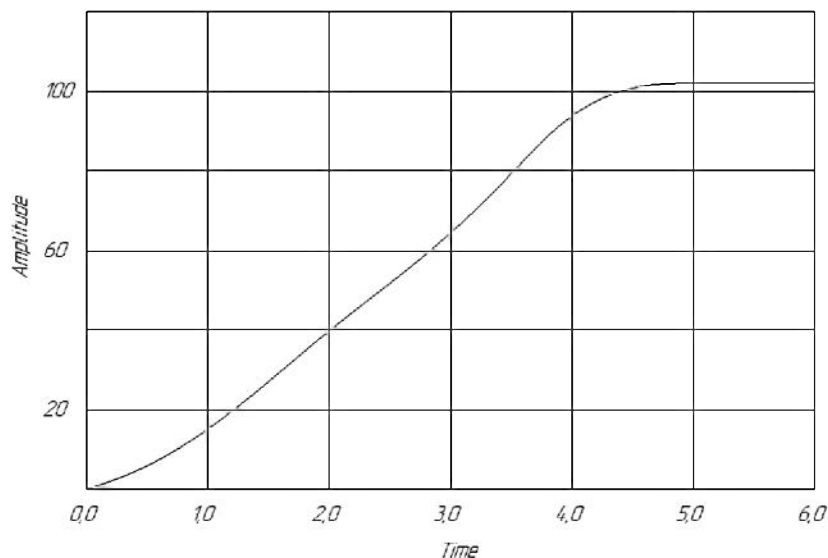


Рисунок 2.5 – Результати моделювання – графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна з урахуванням наявної нелінійності

Наявна нелінійність зменшила швидкодію спрацювання розробленої системи до 4,5 с.

У разі збільшення меж нелінійності (рис. 2.6), швидкодія спрацювання системи підвищується (до 2 с).

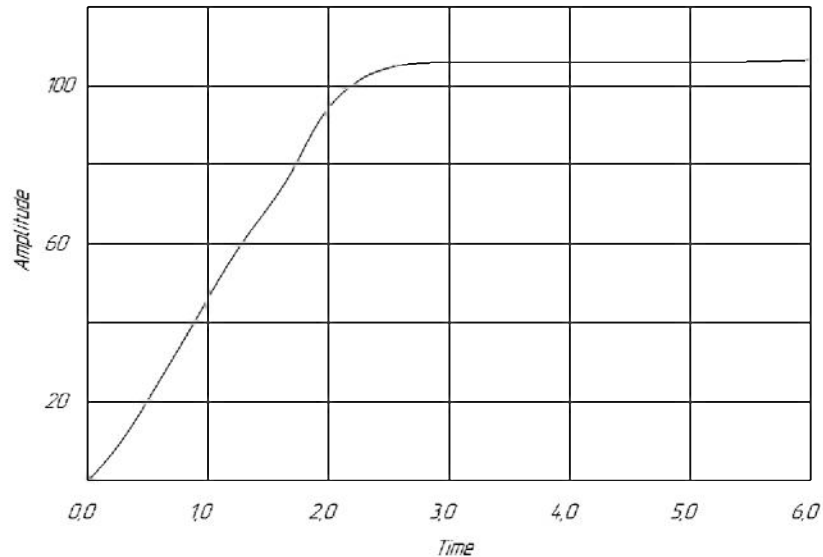


Рисунок 2.6 – Результати моделювання – графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна (при збільшенні меж нелінійності)

Математична модель з ненавантаженим двигуном (момент опору дорівнює 0) наведено на рис. 2.7 [10].

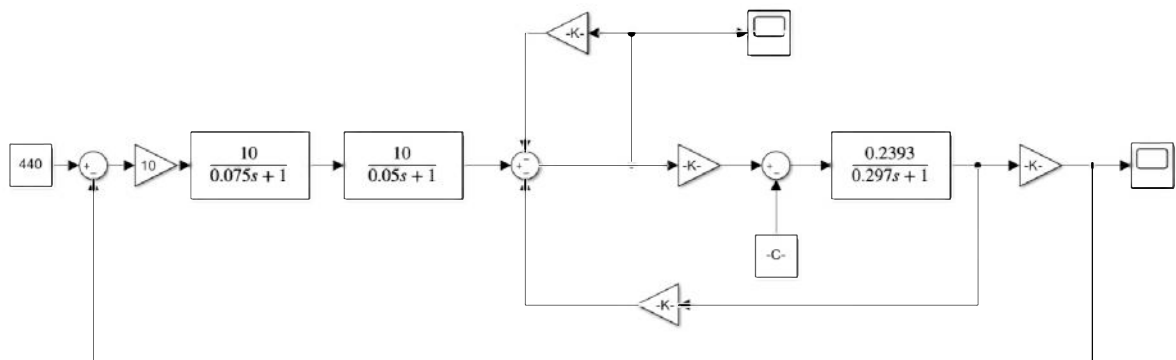


Рисунок 2.7 – Математична модель з ненавантаженим двигуном (без урахування наявної нелінійності)

Графік перехідного процесу зміни струму якоря ДПС набуде вигляду, представленого на рис. 2.8.

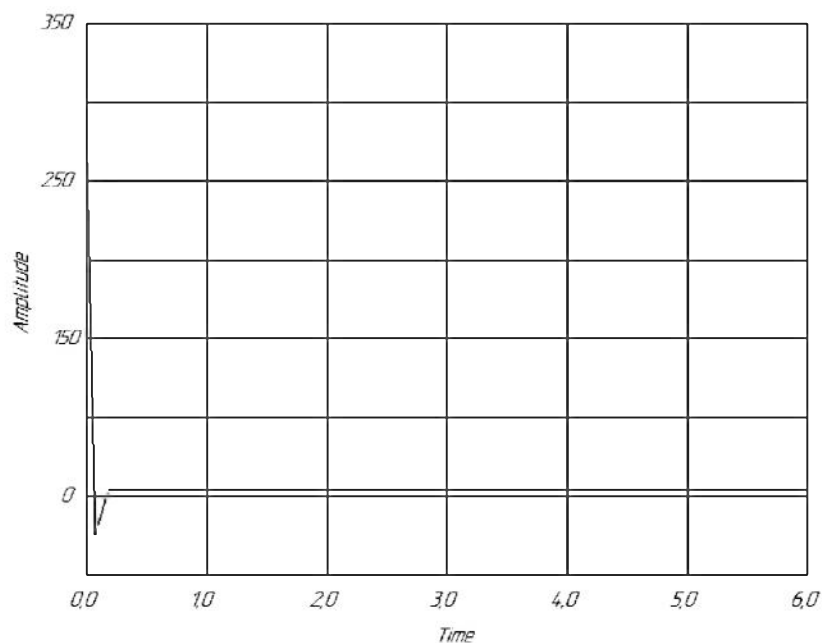


Рисунок 2.8 – Графік перехідного процесу зміни струму якоря ДПС

Для подолання моменту опору, момент, що розвивається двигуном, повинен бути вищим за номінальне значення, що пояснює наявний стрибок струму на початку перехідного процесу, а графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна набуде вигляду, представленого на рис. 2.9.

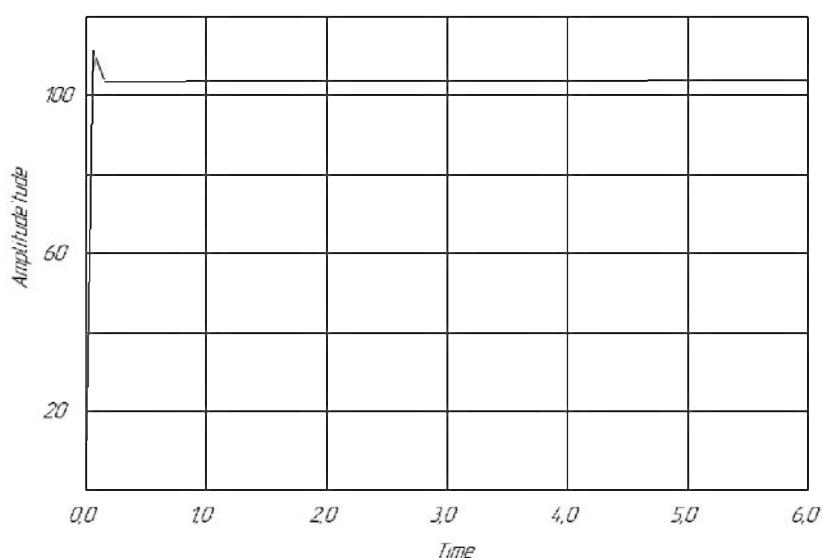


Рисунок 2.9 – Графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна під час пуску ДПС

Збільшивши момент опору до значень, що дорівнюють номінальному його значенню побудуємо графік перехідного процесу струму якоря двигуна (рис. 2.10) і графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна (рис. 2.11).

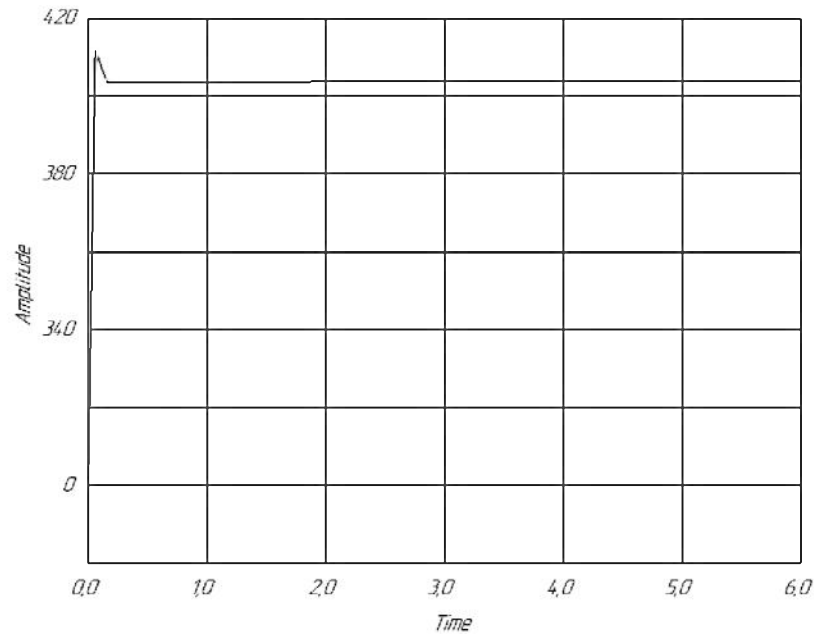


Рисунок 2.10 – Графік перехідного процесу струму якоря двигуна

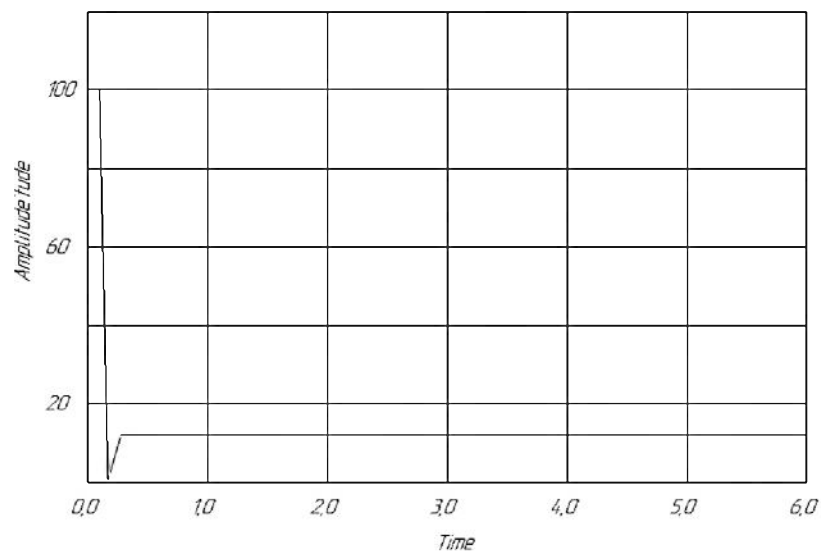


Рисунок 2.12 – Перехідний процес зміни кутової швидкості обертання валу двигуна

Значення досліджуваних параметрів змінюється (збільшується) стрибкоподібно, що свідчить про подолання опору навантаження.

Математична модель з наявною нелінійністю і ненавантаженим двигуном (моменту опору дорівнює 0) представлено на рис. 2.13 [10].

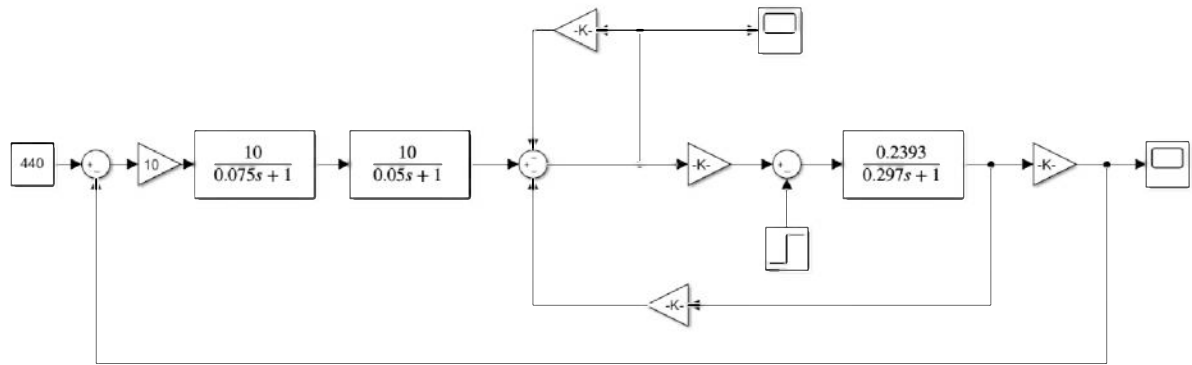


Рисунок 2.13 – Математична модель з ненавантаженим двигуном (з урахуванням наявної нелінійності)

Графік перехідного процесу зміни струму якоря двигуна представлено на рис. 2.14, а графік перехідного процесу зміни кутової швидкості – на рис. 2.15.

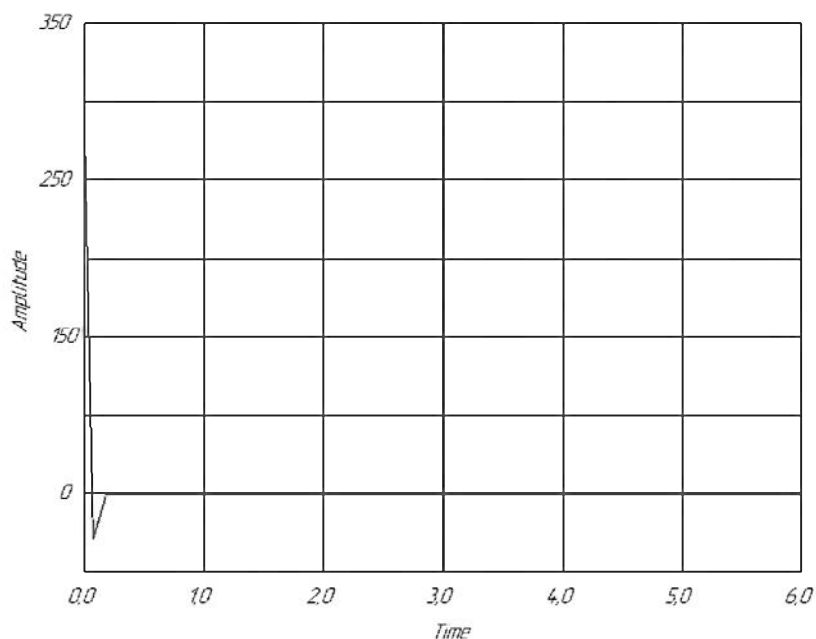


Рисунок 2.14 – Графік перехідного процесу струму якоря двигуна (з урахуванням наявної нелінійності)

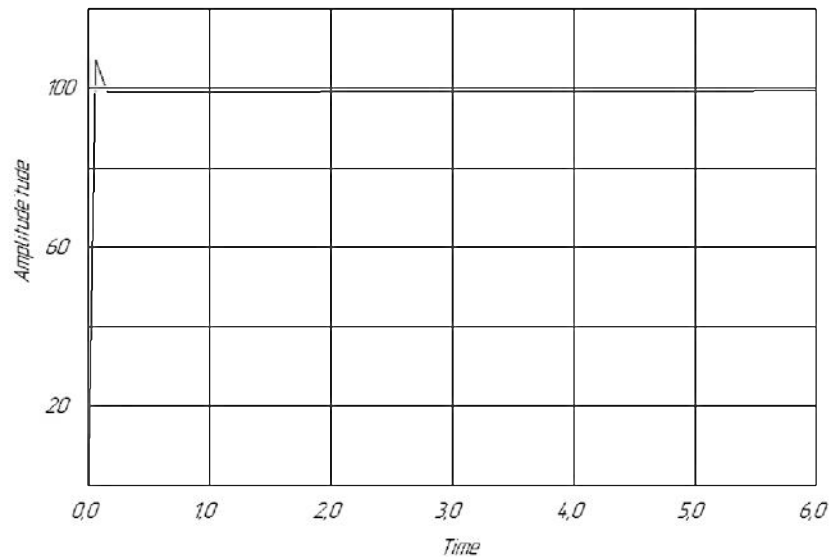


Рисунок 2.15 – Перехідний процес зміни кутової швидкості обертання валу двигуна (з урахуванням наявної нелінійності)

Збільшивши момент опору до значень, що дорівнюють номінальному його значенню побудуємо графік перехідного процесу струму якоря двигуна (рис. 2.16) і графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна (рис. 2.17).

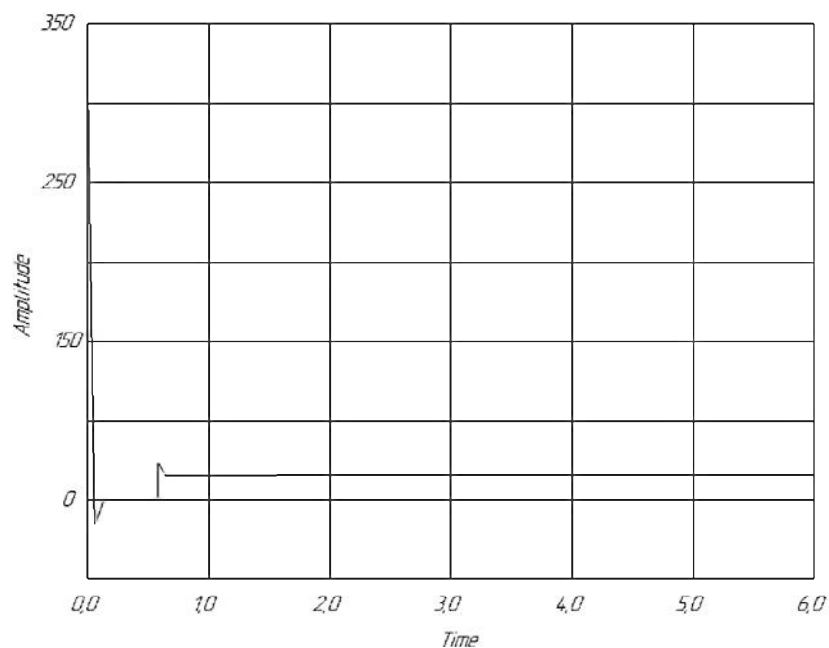


Рисунок 2.16 – Перехідний процес зміни струму якоря двигуна (з урахуванням наявної нелінійності) при номінальному навантаженні

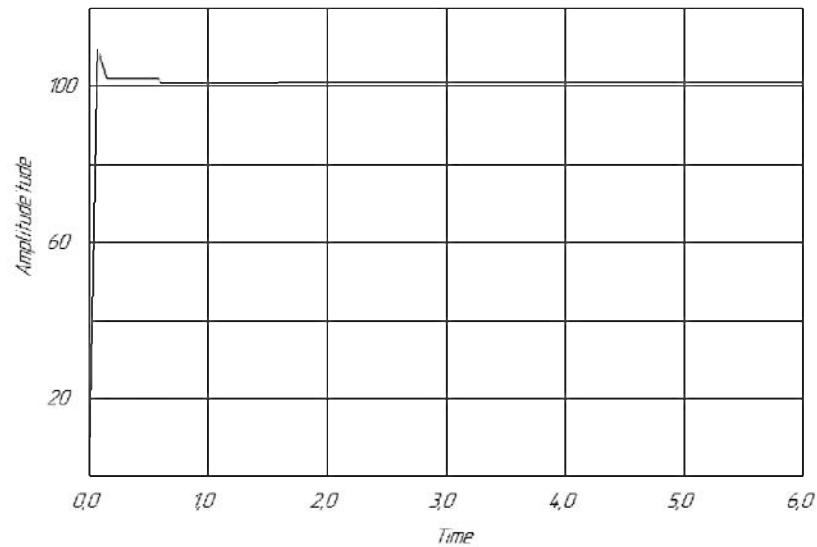


Рисунок 2.16 – Перехідний процес зміни кутової швидкості обертання валу двигуна (з урахуванням наявної нелінійності) при номінальному навантаженні

Створена математична модель приводу дозволила здійснити моделювати робота ДПС при різних режимах його роботи без та з урахуванням наявної нелінійності.

3 ПОКРАЩЕННЯ КЛАСИЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДВОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Короткий огляд головних складових об'єктів двомасової системи

Об'єктом дослідження є електропривод постійного струму, що приводить до руху робочу машину (параметри системи представлені в табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Параметри системи, що підлягає дослідженню

Найменування параметру	Числове значення	Одиниця виміру
Номінальна потужність електродвигуна P	160	кВ
Кількість пар полюсів $2p$	6	–
Номінальний струм електродвигуна I	390	А
Номінальна напруга електродвигуна U	440	В
Номінальна частота обертання електродвигуна n	980	об/хв
Величина опору якірного ланцюга $R_{\text{я}}$	0,025	Ом
Момент інерції електродвигуна J_1	58,7	кг·м ²
Стала двигуна k	4,18	В·с
Стала часу якірного ланцюга $T_{\text{я}}$	82	мс
Механічна стала часу T_M	84	мс
Коефіцієнт підсилення перетворювача $K_{\text{п}}$	68,35	В
Стала часу перетворювача $T_{\text{п}}$	1,7	мс
Коефіцієнт жорсткості вала C	$2,06 \cdot 10^5$	Н·м
Момент інерції робочої машини J_2	29,35	кг·м ²

На рис. 3.1 наведено зображення моделі двомасової системи. Електродвигун та робоча машина поєднані між собою за допомогою валу.

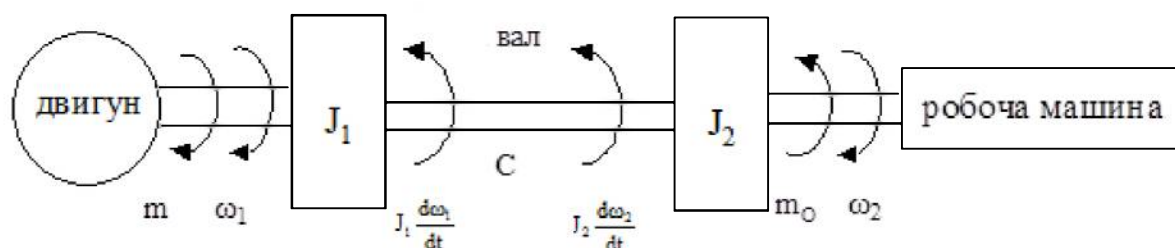


Рисунок 3.1 – Двомасова система електроприводу

Математична модель системи складається з урахуванням властивостей довгого вала, наявності зазору в редукторі. Система містить класичні регулятори струму, швидкості двигуна та положення, які оптимізовані за модульним оптимумом. Задане значення вихідної величини системи змінюється за лінійним законом.

Схеми з передавальними функціями складається з наступних елементів:

– перетворювач ДПС (система ТПД є найпоширеніших систем регулювання приводів постійного струму, забезпечують ККД 97%, мають статичну похибку 0,1–0,3%, діапазон регулювання 1:100, а у деяких випадках – 1:1000):

Математичний опис перетворювача ДПС [11]:

$$(T_{\Pi}p + 1)\Delta U_2(t) = K_{\Pi}\Delta U_1(t) \quad (3.1)$$

де U_1 – напруга на вході ТП, В,

U_2 – напруга на виході ТП, В,

K_{Π} – коефіцієнт передачі ТП,

T_{Π} – постійна часу ТП.

Передавальна функція елементу [11]:

$$W_{\Pi}(p) = \frac{K_{\Pi}}{T_{\Pi}p + 1} \quad (3.2)$$

– однополярний датчик кутових переміщень (регулятор положення).

Математичний опис елементу [11]:

$$\Delta U(t) = K_{\text{ДС}} \Delta \varphi, \quad (3.3)$$

де φ – кут повороту движку потенціометра (вимірювана величина);

U – напруга на виході датчика;

$K_{\text{ДС}}$ – коефіцієнт передачі датчика.

Передавальна функція елементу [11]:

$$W_{\text{ОД}}(p) = K_{\text{ДС}}. \quad (3.4)$$

– датчик швидкості (регулятор швидкості). Математичний опис елементу [11]:

$$\Delta U(t) = K_{\text{Ш}} \Delta \omega(t) \quad (3.5)$$

Передавальна функція елементу [11]:

$$W_{\text{Ш}}(p) = K_{\text{Ш}}. \quad (3.6)$$

– двигун постійного струму (ДПС). Математичний опис елементу [11]:

$$(T_e T_M p^2 + T_M p + 1) \Delta \omega(t) = K_{Д1} \Delta U_{я}(t) - K_{Д2} (T_e + 1) \Delta \varphi_H(t)$$

або

$$(3.7)$$

$$(T_e T_M p^2 + T_M p + 1) p \Delta \varphi(t) = K_{Д1} \Delta U_{я}(t) - K_{Д2} (T_e p + 1) \Delta M_c(t),$$

де ω – частота обертання вихідного валу;

φ – кут повороту вихідного валу;

$U_{я}$ – напруга на якорі;

M_c – момент опору на валу;

$K_{Д1}, K_{Д2}$ – коефіцієнти передачі по напрузі і моменту;

T_e, T_M – електромагнітна і електромеханічна постійні часу.

Передавальна функція елементу [11]:

$$W_{ДПС(u)}(p) = \frac{K_{Д1}}{T_e T_M p^2 + T_M p + 1} \text{ або } W_{ДПС(m)}(p) = \frac{K_{Д2}(T_e p + 1)}{p(T_e T_M p^2 + T_M p + 1)}. \quad (3.8)$$

Структурна схема САК (рис. 3.2) – схема, яка визначає основні функціональні частини виробу, їх взаємозв'язки та призначення. Під функціональною частиною розуміють складову частину схеми.

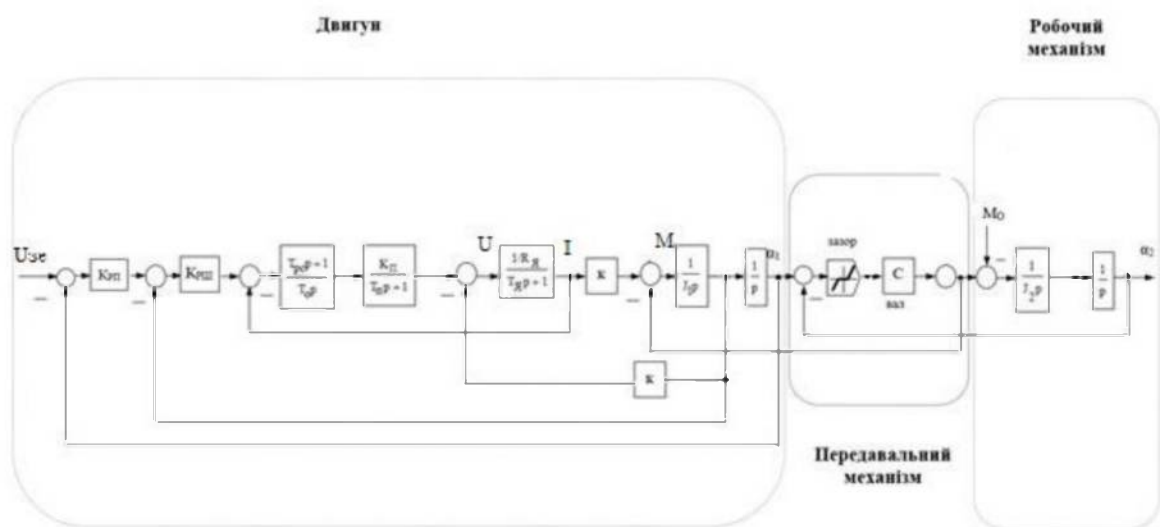


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи електроприводу з двигуном постійного струму

Структурна схема призначена для відображення загальної структури пристрою, тобто його основних блоків, вузлів, частин та головних зв'язків між ними. Із структурної схеми повинно бути зрозуміло, навіщо потрібний даний пристрій і як він працює в основних режимах роботи, як взаємодіють його частини.

3.2 Розробка регулятора системи

Враховуючи наведені вище відомості, приймаємо рішення зробити систему підлеглого регулювання триконтурною [12]:

- контур по струму,
- контур по швидкості,
- контур по положенню.

Регулятор струму

Регулятор струму призначено для обмеження струму якоря у перехідних режимах. Класичний регулятор струму являє собою ПІ-регулятор безпосередньо в контурі і нелінійність типу обмеження на вході даного контуру.

Дана конструкція має наступне обґрунтування [12]:

- завдяки наявності ПІ-регулятора в контурі, останній стає астатичним і навіть перший порядок астатизму (коли інтегратор є єдиним на всю систему) дозволяє ліквідувати статичну помилку,

- оскільки на вході даного контуру є нелінійність типу обмеження, то у сталих режимах величина струму не може перевищувати встановлене обмеження (в нашому випадку два ампера). Однак, незважаючи на цю нелінійність, значення струму в перехідних режимах можуть короткочасно перевищувати встановлене обмеження. Тому необхідно забезпечити максимально можливе швидкодію даного контуру.

Регулятор швидкості

Оскільки в досліджуваній системі обмежувати кутову швидкість навантаження немає необхідності, то регулятор швидкості може бути пропорційним.

Регулятор положення

Ми можемо взяти П або ПІД регулятор, але ПІД може бути використаний в разі, коли необхідно усунути статичну помилку, обумовлену зовнішніми обурення, а в даному випадку цього не потрібно, тому буде обраний П-регулятор [12].

3.3 Розрахунок параметрів регуляторів системи

3.3.1 Розрахунок додаткових для розрахунку параметрів

Номінальна частота обертання [13]:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = 102,57 \text{ рад/с}, \quad (3.9)$$

Номінальний момент двигуна [13]:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \cdot 1000 = \frac{160}{102,57} \cdot 1000 = 1560 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.10)$$

Конструкційна стала машини (коефіцієнт моменту) [13]:

$$C_m = \frac{M_n}{I_n} = \frac{1560}{390} = 4 \text{ В} \cdot \text{с} \quad (3.11)$$

Індуктивність якоря [13]:

$$L_{\text{я}} = K \cdot \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}} \cdot n_{\text{н}} \cdot 2p} = \frac{4,18 \cdot 440}{390 \cdot 980 \cdot 12} = 0,0004 \text{ Гн} \quad (3.12)$$

Коефіцієнт передачі двигуна [13]:

$$K_{\text{д}} = \frac{1}{C_{\text{м}}} = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ В} \cdot \text{с}^{-1} \quad (3.13)$$

3.3.2 Розрахунок параметрів регулятора струму

Контур струму необхідно налаштовувати виходячи з необхідності обмеження струму якоря двигуна на допустимому рівні, то при аналізі схеми внутрішньої зворотним зв'язком по ЕРС двигуна нехтують, а контур налаштовують на оптимум по модулю. При такому підході регулятор струму виходить пропорційно-інтегрального типу з функцією приналежності [14]:

$$W_{\text{pc}}(p) = k_{\text{pc}} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{\text{pc}} \cdot p} \right), \quad (3.14)$$

де $T_{\text{pc}} = T_{\text{я}} = 0,082$ – стала часу регулятора, с.

Коефіцієнт передачі регулятора струму [14]:

$$k_{\text{pc}} = \left(\frac{T_{\text{я}} \cdot \sum R_{\text{я}}}{\alpha_{\mu\text{с}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{с}} \cdot T_{\mu\text{с}}} \right), \quad (3.15)$$

де $\alpha_{\mu c} = 1 \dots 6$ – коефіцієнт настройки на модульний оптимум контуру струму (обираємо 2, як стандартний коефіцієнт налаштування),

K_{Π} – коефіцієнт підсилення перетворювача,

K_c – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом,

$T_{\mu c} = T_{\Pi} + T_{\text{я}} = 0,017 + 0,082 = 0,099$ – сумарна мала стала часу,

$\sum R_{\text{я}} = 0,025 + 0,0071 + 25,6 = 25,63$ – сумарний опір обмотки якоря.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом [14]:

$$k_c = \frac{U_{\text{зс}}}{I_{\text{дв}}} = \frac{440}{390} = 1,12, \quad (3.16)$$

де $U_{\text{зс}}$ – максимальна напруга завдання на струм двигуна, В

$I_{\text{дв}}$ – максимально допустимий струм якоря двигуна, А.

$$k_{\text{pc}} = \frac{0,082 \cdot 25,63}{2 \cdot 68,35 \cdot 1,12 \cdot 0,099} = 0,135, \quad (3.17)$$

$$W_{\text{pc}}(p) = k_{\text{pc}} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{\text{pc}} \cdot p} \right) = 0,135 + \frac{0,135}{0,082 \cdot p} \quad (3.18)$$

З пропорційно-інтегральним регулятором струму статична похибка регулювання струму прагне до нуля, так як такий регулятор теоретично має нескінченно великий коефіцієнт посилення.

3.3.3 Розрахунок параметрів регулятора швидкості

Розімкнутий контур швидкості включає в себе регулятор швидкості, оптимізований внутрішній контур струму, інтегруюча ланка об'єкта управління, датчик швидкості. Контур швидкості налаштовується на модульний оптимум.

При налаштуванні контуру швидкості на модульний оптимум регулятор швидкості виходить пропорційного типу з передавальною функцією [15]:

$$W_{\text{рш}}(p) = k_{\text{рш}} = \frac{J_1 \cdot k_T}{K \cdot k_{\text{ш}} \cdot \alpha_{\mu\text{с}} \cdot T_{\mu\text{ш}}}, \quad (3.19)$$

де J_1 – момент інерції електроприводу,

$\alpha_{\mu\text{с}} = 2$ – стандартній коефіцієнт налаштування на модульний оптимум,

k – стала двигуна,

$T_{\mu\text{ш}} = \alpha_{\mu\text{с}} \cdot T_{\mu\text{с}} + T_{\text{м}} = 0,282\text{с}$ – сумарна мала стала часу,

$k_{\text{ш}}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю, який розраховуємо за формулою [15]:

$$k_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{зс}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{440}{102,57} = 4,28, \text{ тоді} \quad (3.20)$$

$$k_{\text{рш}} = \frac{58,7 \cdot 1,12}{4,18 \cdot 4,28 \cdot 2 \cdot 0,282} = 6,515. \quad (3.21)$$

Електропривод з ПІ-регулятором швидкості має меншу швидкодію при відпрацюванні керуючого впливу, але в ньому теоретично відсутня похибка підтримки швидкості при зміні моменту на валу двигуна.

Динамічні провали швидкості при стрибкоподібному зміні навантаження на валу двигуна притаманні обома типам регуляторів.

3.3.4 Розрахунок параметрів регулятора положення

Коефіцієнт підсилення регулятора положення визначається за формулою [15]:

$$K_{PI} = \frac{D_{\omega}}{K_{PI} \cdot K_{KC}}, \quad (3.22)$$

де D_{ω} – добротність контуру швидкості: [15]

$$D_{\omega} = \frac{1}{10 \cdot T_{KC}}, \quad (3.23)$$

K_{PI} – коефіцієнт підсилення датчика положення, прийmemo $K_{PI}=1$,

$$K_{PI} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu PI} \cdot K_{PI}} = \frac{1}{2 \cdot 0.0068 \cdot 1} = 73,529. \quad (3.24)$$

Параметри регуляторів струму, швидкості та положення зводимо до табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок системи підпорядкованого регулювання положення

Регулятор	Розрахунок параметрів
ПІ-регулятор струму	$k_{pc} = \left(\frac{T_{я} \cdot \sum R_{я}}{\alpha_{\mu c} \cdot K_{п} \cdot K_{с} \cdot T_{\mu c}} \right) = 0,135.$
П-регулятор швидкості	$k_{pш} = \frac{J_1 \cdot k_{т}}{K \cdot k_{ш} \cdot \alpha_{\mu c} \cdot T_{\mu ш}} = 6,515.$
П-регулятор положення	$K_{pp} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu ш} \cdot K_{дш}} = \frac{1}{2 \cdot 0.0068 \cdot 1} = 73,529.$

Моделювання здійснювалося за допомогою прикладного пакету Matlab, який дозволяє реалізувати з пакетом імітаційного моделювання Simulink. Модель готової системи керування положенням двомасової ЕМС представлено на рис. 3.3. Вона повністю відповідає структурній схемі системи, що була розроблена раніше (рис. 3.2).

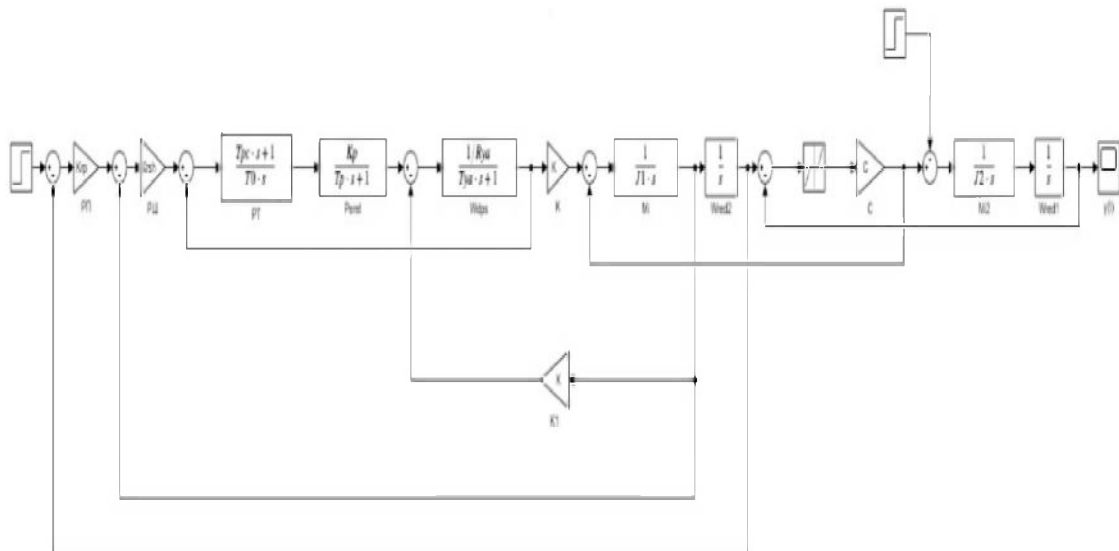


Рисунок 3.3 – Модель системи керування положенням двомасової ЕМС

Для оцінки динамічних властивостей ланок використовують часові та частотні характеристики. До часових характеристик належать перехідна функція та імпульсна перехідна функція.

Перехідна функція ланки $h(t)$ визначає її реакцію на одиничну ступінчасту дію $x_{ex}(t)=I(t)$ і характеризує перехід від одного усталеного стану до іншого.

Одинична ступінчаста дія визначається залежністю [15]:

$$x_{ex}(t) = I(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0 \\ 0, & \text{при } t < 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

Перехідну функцію можна визначити наступним чином [15]:

$$W(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}, \quad h(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k) \cdot e^{p_k \cdot t}}{p_k \cdot F_2(p_k)}. \quad (3.26)$$

Результати моделювання перехідної функції системи керування положенням двомасової ЕМС наведено на рис. 3.4.

Аналіз літературних джерел показав, що застосування класичних регуляторів при керування положенням двомасової ЕМС призводить до зниження похибок результатів розрахунків, що визначається зменшенням перерегулюванням процесу та невеликою затримкою процесу керування.

Передавальна функція двигуна визначається:

$$W_d(p) = \frac{K_d}{T_\varepsilon T_m p^2 + T_m p + 1} = \frac{0,25}{0,001344 p^2 + 0,084 s + 1} \quad (3.27)$$

Передавальна функція редуктора визначається:

$$W_p(p) = \frac{1}{i \cdot p} = \frac{1}{100p} \quad (3.28)$$

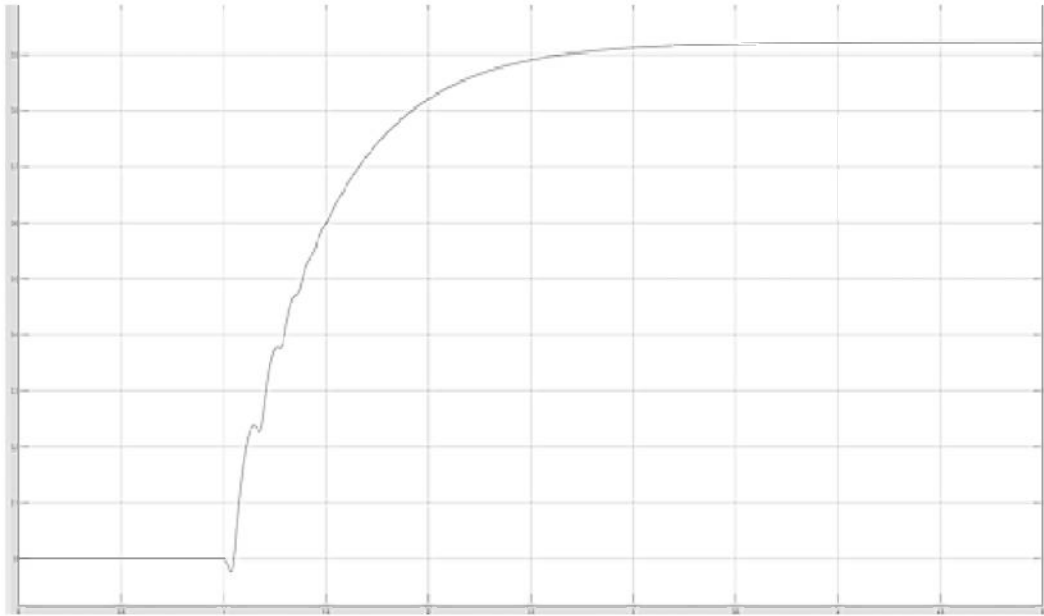


Рисунок 3.4 – Вигляд перехідної функції системи керування положенням двомасової ЕМС за результатами моделювання

Передавальна функція розімкнутої системи [15]:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{(T_\Delta T_M p^2 + T_M p + 1) \cdot p} \quad (3.29)$$

Передавальна функція замкнутого контуру [15]:

$$P(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} \quad (3.30)$$

Розрахуємо критичний коефіцієнт посилення заступної системи [15]:

$$T_\Delta T_M p^3 + T_M p^2 + p + K_{кр} = 0 \quad (3.31)$$

$$0,001344p^3 + 0,084p^2 + p + K_{кр} = 0$$

$$p = j\omega \quad (3.32)$$

$$-j0,001344w^3 - 0,084w^2 + jw + K_{кр} = 0$$

$$P(w) = -0,084w^2 + K_{кр} = 0 \quad (3.33)$$

$$Q(jw) = w - 0,001344w^3 = 0 \quad (3.34)$$

$$0,001344w^2 = 1 \quad (3.35)$$

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{1}{0,001344}} = 27,277 \quad (3.36)$$

$$-0,084 \cdot 27,277^2 + K_{кр} = 0 \quad (3.37)$$

$$K_{кр} = 62,4989$$

Задане значення статичної помилки визначається [15]:

$$K_p = (0,8_0,9 \cdot K_{кр}) \quad (3.38)$$

$$K_p = 0,8 \cdot K_{кр} = 0,8 \cdot 62,4989 = 50$$

Період сталих коливань при $T_{кр} = 12$ [15]:

$$h = 0,1 \cdot T_{кр} = 1,2 \quad (3.39)$$

Статична помилка системи, що викликана моментом навантаження [15]:

$$S_f = \frac{M_c}{K_p \cdot \beta \cdot i} = \frac{1500}{50 \cdot 22,7 \cdot 100} = 0,013 \quad (3.40)$$

Для визначення коефіцієнтів регуляторів методом критичних підсилень використовуємо залежності, визначені у табл. 3.3

Таблиця 3.3 – Розрахункові формули для визначення коефіцієнтів регуляторів методом критичних підсилень

	Автор	Тип рег.	K_P	K_I	K_D
Декремент затухання	Циглера-Никольса	П	$0,5 \cdot K_{кр}$		
		ПІ	$0,45 \cdot K_{кр}$	$T_{кр}/1,2$	
		ПІД	$0,6 \cdot K_{кр}$	$T_{кр}/2$	$T_{кр}/8$
Мінімальна помилка	Шинслей	П	$0,5 \cdot K_{кр}$		
		ПІ	$0,5 \cdot K_{кр}$	$T_{кр}/1,3$	
		ПІД	$0,25 \cdot K_{кр}$	$T_{кр}/2$	$T_{кр}/8$

Параметри П-регулятора [16]:

$$K_P = 0,5 \cdot K_{кр} = 25, \quad K_I = 0, \quad K_D = 0.$$

Параметри ПІ-регулятора [16]:

$$K_P = 0,5 \cdot K_{кр} = 25, \quad K_I = \frac{h}{2 \cdot \frac{T_{кр}}{2,3}} = 0,0113, \quad K_D = 0.$$

3.4 Дослідження системи керування положенням двомасової ЕМС з П-регулятором

За способом дії розрізняють регулятори *прямої* і *непрямої* дії. До регуляторів прямої дії відносять такі регулятори, у яких зусилля, необхідне для переміщення органу регулювання, виникає за рахунок зміни вихідного параметра без підведення додаткової енергії. Зрозуміло, що в цьому випадку датчик (чутливий елемент) є одночасно і виконавчим механізмом. Стабілізуючі регулятори класифікуються на інтегральні (І), пропорційні (П) і пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) [17].

П-регулятор являє собою один з найпростіших і розповсюджених пристроїв та алгоритмів управління. П-регулятор - це пристрій, який формує керуючий сигнал. П-регулятор видає вихідний сигнал, пропорційний вхідному, з коефіцієнтом пропорційності K . Передавальна функція: $W(p) = k$.

Використовуючи середовище Matlab, можна розрахувати його передавальну функцію та коефіцієнти регулятора за допомогою компонента Matlab PID Tuner. Модель з П-регулятором, створена у пакеті Simulink представлено на рис. 3.5 [18].

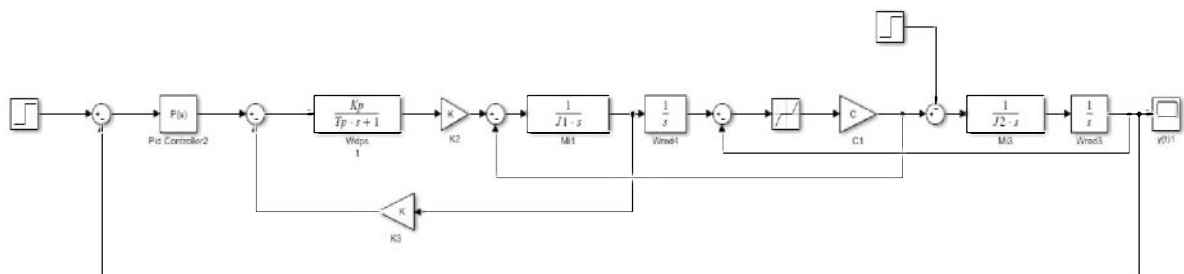


Рисунок 3.5 – Створена модель системи з П-регулятором

Коефіцієнти П-регулятора показано на прикладі блока PID Controller (рис. 3.6):

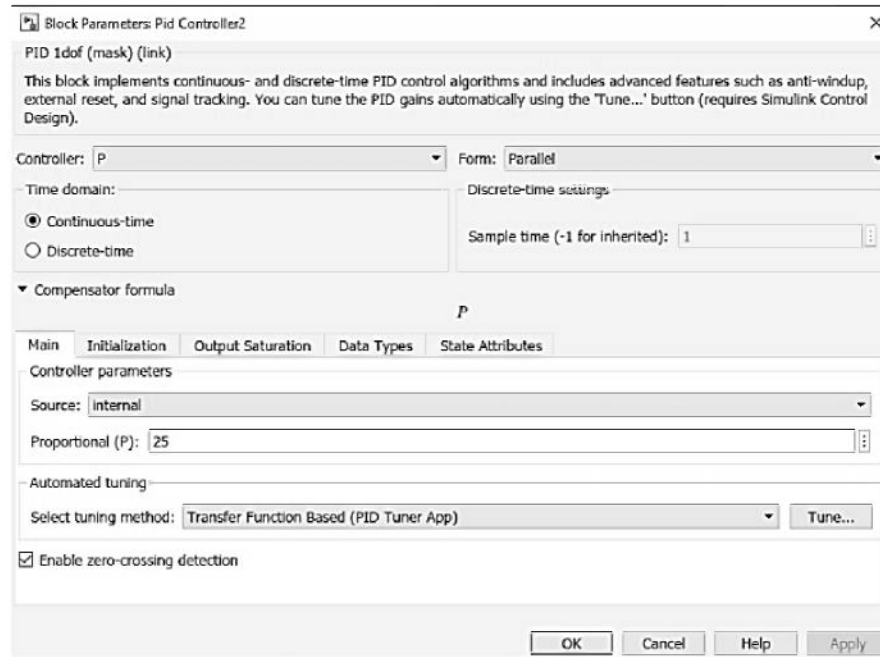


Рисунок 3.6 – Розрахункові параметри П-регулятора

Розраховані параметри регулятора використаємо для подальшого моделювання у середовищі Matlab та побудувати перехідну функцію системи керування положенням двомасової ЕМС (рис. 3.7).

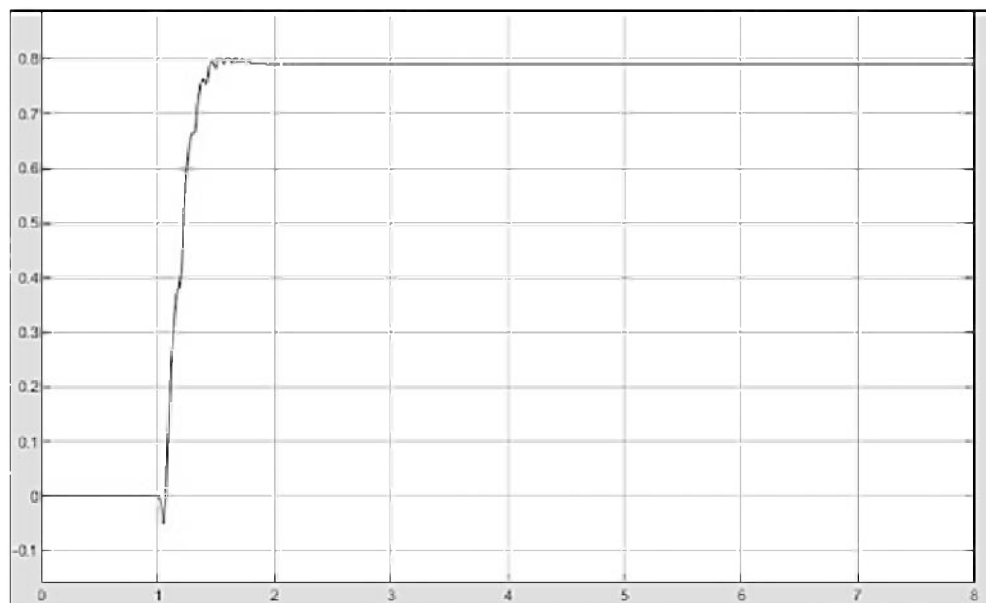


Рисунок 3.7 – Вигляд перехідної функції системи керування положенням двомасової ЕМС з П-регулятором

Аналіз виконаних досліджень показує, що застосування стандартного П-регулятора при керування положенням двомасової ЕМС призводить до значних похибок, що характеризується суттєвим перерегулюванням процесу та великою затримкою розрахунків.

3.5 Дослідження системи керування положенням двомасової ЕМС з ПІ-регулятором

ПІ-регулятор є одним з найбільш універсальних регуляторів, який безпосередньо складається з П-регулятора з додатковою інтегральною складовою. І-складова, що доповнює алгоритм, необхідна для усунення статичної помилки, що є характерною для П-регулятора. Ця інтегральна частина є накопичувальною, і таким чином дозволяє здійснити те, що ПІ-регулятор враховує в даний момент часу попередню історію зміни вхідної величини.

Передавальна функція визначається [17]:

$$W(p) = K \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad (3.41)$$

Використовуючи середовище Matlab, можна розрахувати його передавальну функцію та коефіцієнти регулятора за допомогою стандартного модуля Matlab PID Tuner (рис. 1.10). Побудуємо модель в пакеті Simulink з Р-регулятором (рис. 1.9) [18].

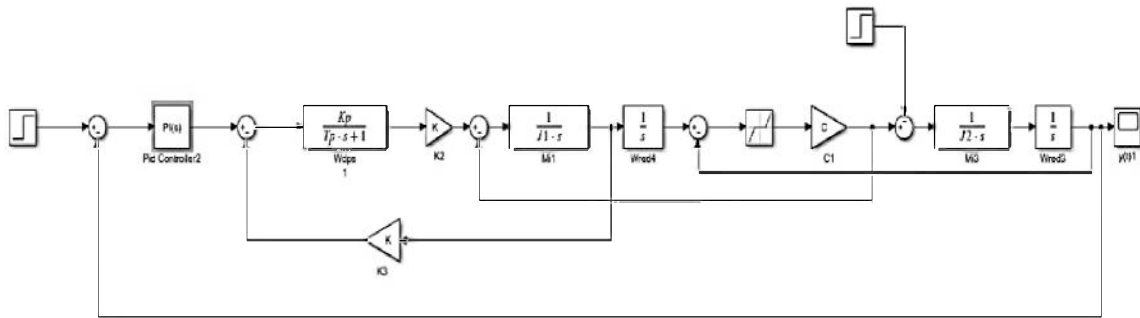


Рисунок 3.8 – Модель системи з ПІ-регулятором

Розраховані коефіцієнти регулятора показані на прикладі блоку PID Controller, що представлено на рис. 3.9.

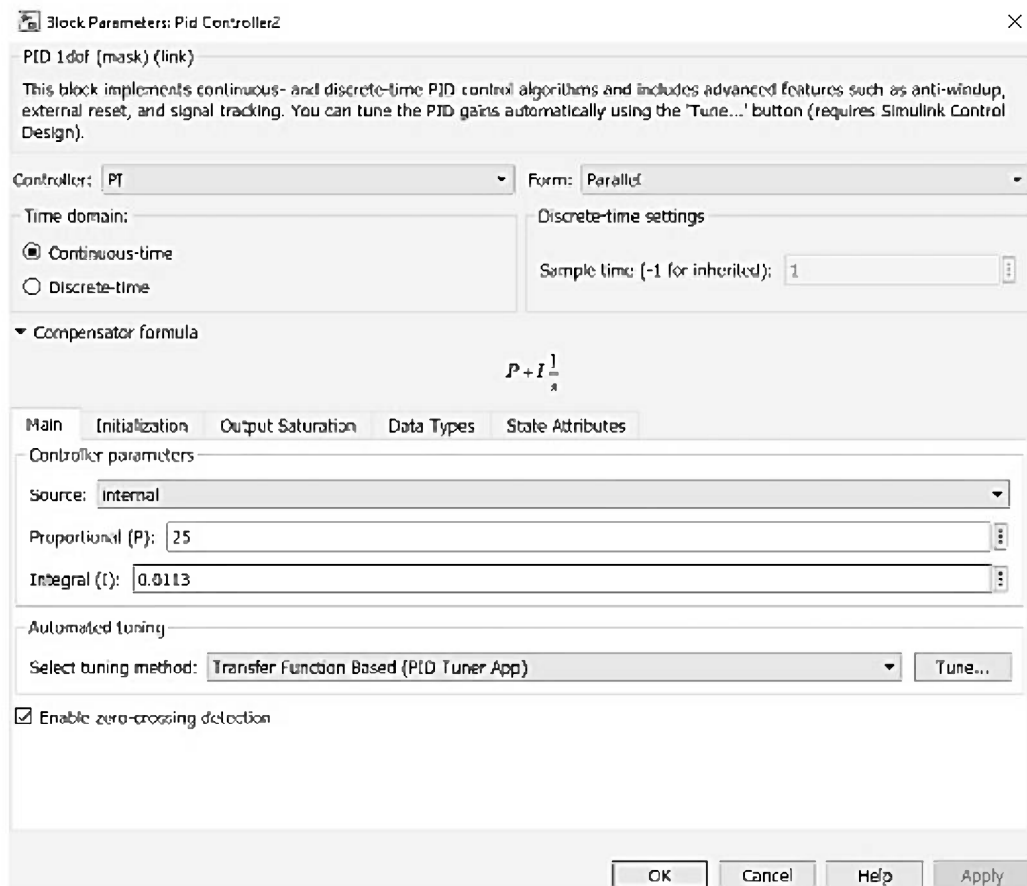


Рисунок 3.8 – Модель системи з ПІ-регулятором

Після розрахунку параметрів регулятора виконуємо відповідне моделювання у середовищі Matlab та будуємо перехідну функцію системи керування положенням двомасової ЕМС (рис. 3.9).

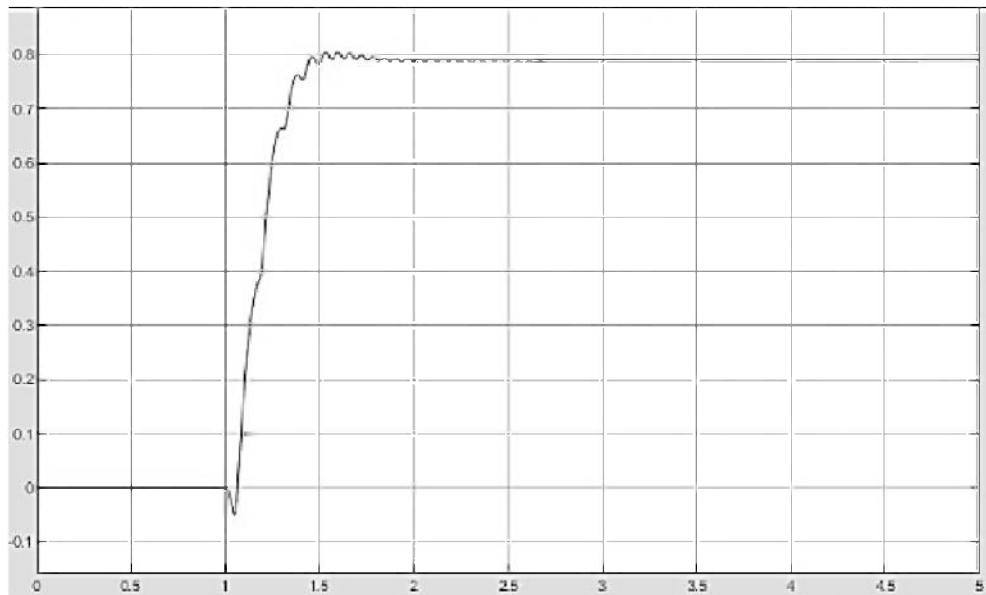


Рисунок 3.9 – Перехідна функція системи керування положенням двомасової ЕМС з ПІ-регулятором

Аналіз виконаних досліджень показав, що застосування стандартного ПІ-регулятора при керуванні положенням двомасової ЕМС призводить до зниження похибок обчислень, що визначається зменшенням перерегулювання процесу та невеликою затримкою процесу керування.

4 ПРОЕКТУВАННЯ ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРА ПОЛОЖЕННЯ ДВОМАСОВОЇ ЕМС

4.1 Перспективи застосування фаззі-регуляторів

Постійне удосконалення технологій виробництва інтегральних напівпровідникових компонентів, які забезпечують можливість створення економічно-обґрунтованих цифрових пристроїв обробки і зберігання інформації, а також поява ефективних засобів програмування здійснюють все більший вплив не тільки на розвиток техніки вимірювання й управління, а й на формування нових підходів до побудови автоматичних систем управління [19].

Аналогове та цифрове керування призначене для виконання незначного числа основних функцій. Застосування цифрових обчислювачів для цілей управління дозволяє істотно розширити коло вирішуваних завдань і проблем, оскільки їх можна програмувати та виконувати складні розрахунки.

Вельми перспективним для керованих електромеханічних систем є застосування фаззі-контролерів (фаззі-регуляторів), які дозволяють здійснювати оптимізацію та підвищувати швидкодію і враховувати динамічні навантаження системи управління ЕМС, особливо якщо вони мають важко описувану математичну структуру [20].

Особливий інтерес представляють ЕМС, які містять у якості основної ланки регульований електропривод змінного струму, складність облаштування якого залежить від рівня досконалості напівпровідникових перетворювачів, використання дискретних пристроїв, які здійснюють регулювання змінних структур, а також мікропроцесорів [20].

У деяких випадках ЕМС має нелінійні, пружні та в'язкі ланки з зосередженими та розподіленими параметрами, а також ланки з запізненням.

Простий, але досить поширений у застосуванні, фаззі-регулятор (ФР) має два входи і один вихід з визначеними правилами. У більш загальному випадку ФР проектується багатоканальним, тобто являє собою систему декількох ФР, конструктивне об'єднання яких утворює керований «пристрій-фаззі-контролер» [20].

Огляд літературних джерел свідчить про те, що незважаючи на те, що нечіткі контролери вже використовуються для вирішення різних завдань управління, остаточно теорія нечіткого управління ще знаходиться на стадії становлення і розвитку [19, 20].

4.2 Функціональна схема нечіткого регулятора (фаззі-регулятор)

Схема складається з пристрою порівняння, нечіткого регулятора (НР), об'єкта управління (ОУ) і ланцюга зворотного зв'язку (рис. 4.1) [21].

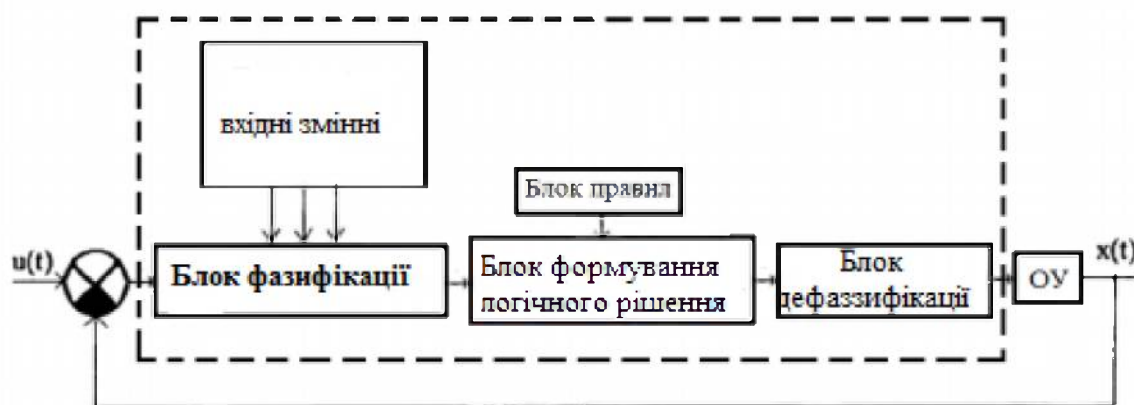


Рисунок 4.1 – Функціональна схема з нечітким регулятором

Блок фазифікації (рис. 4.1) здійснює перетворення вимірних реальних даних (наприклад, швидкості, температури, тиску і т.д.) у зручні для цього значення лінгвістичні змінні і перетворює чіткі значення вхідних змінних у нечіткі. Таке перетворення фактично є свого роду нормуванням,

необхідним для переведення даних вимірювань в суб'єктивні оцінки. Отже, воно може бути визначено як відображення спостережуваних значень вхідних змінних у відповідні нечіткі [21].

База правил (база нечітких правил) містить дослідні дані про процес управління і експертні висновки. Правила нечіткої логіки представляються набором нечітких конструкцій, у яких передумови і висновки мають на увазі використання лінгвістичні змінні. Цей набір керуючих правил нечіткої логіки (або нечітких керуючих тверджень) характеризує причинно-наслідковий зв'язок входу системи з її виходом [21].

Блок формування логічного рішення є ядром системи нечіткої логіки (СНЛ), який моделює процедуру прийняття рішення людиною. Організація виведення заснована на здійсненні міркувань за нечіткими вхідними даними з метою досягнення необхідної стратегії управління або прийняття рішення. Блок виведення являє собою ядро СНЛ, що використовується для моделювання наближених міркувань і процесу прийняття рішень людиною у складних ситуаціях [21].

Нечіткі висновки, нечіткі або наближені міркування – це найбільш важливі моменти при використанні даних нечіткої логіки при управлінні складними об'єктами. Майже всі реально працюючі прикладні системи, що використовують проміжні нечіткі дані, це системи, засновані на нечітких продукційних правилах [21].

Блок дефазифікації застосовується для виробки чіткого рішення або керуючого впливу у відповідь на результати, отримані у блоці виведення. Під дефазифікацією розуміється процедура перетворення нечітких величин, які отримують в результаті нечіткого виводу, у чіткі. Ця процедура є необхідною у тих випадках, де потрібна інтерпретація нечітких висновків конкретними чіткими величинами.

У даний час відсутня систематична процедура вибору стратегії дефазифікації. На практиці часто використовують два найбільш загальних методи: метод центру тяжіння (ЦТ) і метод максимуму (ММ) [22].

4.3 Синтез системи регулювання з нечіткими регулятором положення на основі нечіткої логіки в програмному середовищі Matlab

На початковому етапі роботи необхідно визначитися зі значеннями лінгвістичних змінних системи, а також з їх кількістю. У першому наближенні приймаємо п'ять різних лінгвістичних значень для кожної змінної: негативна велика, негативна мала, нульова, позитивна мала, позитивна велика [23].

Вибір п'яти змінних пояснюється недостатністю трьох з огляду на необхідну адекватність роботи нечіткого регулятора, а сім змінних (і більше) є надмірним з точки зору трудомісткості процесів розрахунку.

У табл. 4.1 наведено відповідності лінгвістичні значення нечітких змінних і їх числові еквіваленти для нечіткого регулятора положення.

Таблиця 4.1 – Лінгвістичні значення і їх чисельні еквіваленти

Лінгвістичне значення першої вхідної змінної	НВ	НМ	Н	ПМ	ПВ
Чисельний еквівалент лінгвістичного значення змінної	-1	-0,5	0	+0,5	+1
Лінгвістичне значення другої вхідної змінної	НВ	НМ	Н	ПМ	ПВ
Чисельний еквівалент лінгвістичного значення змінної	-4	-2	0	+2	+4
Лінгвістичне значення вихідної змінної	НВ	НМ	Н	ПМ	ПВ
Чисельний еквівалент лінгвістичного значення вихідної змінної	-10	-5	0	+5	+10

Використовуючи команду `fuzzy` в командному рядку Matlab, одержуємо доступ до FIS-редактора рис. 4.2.

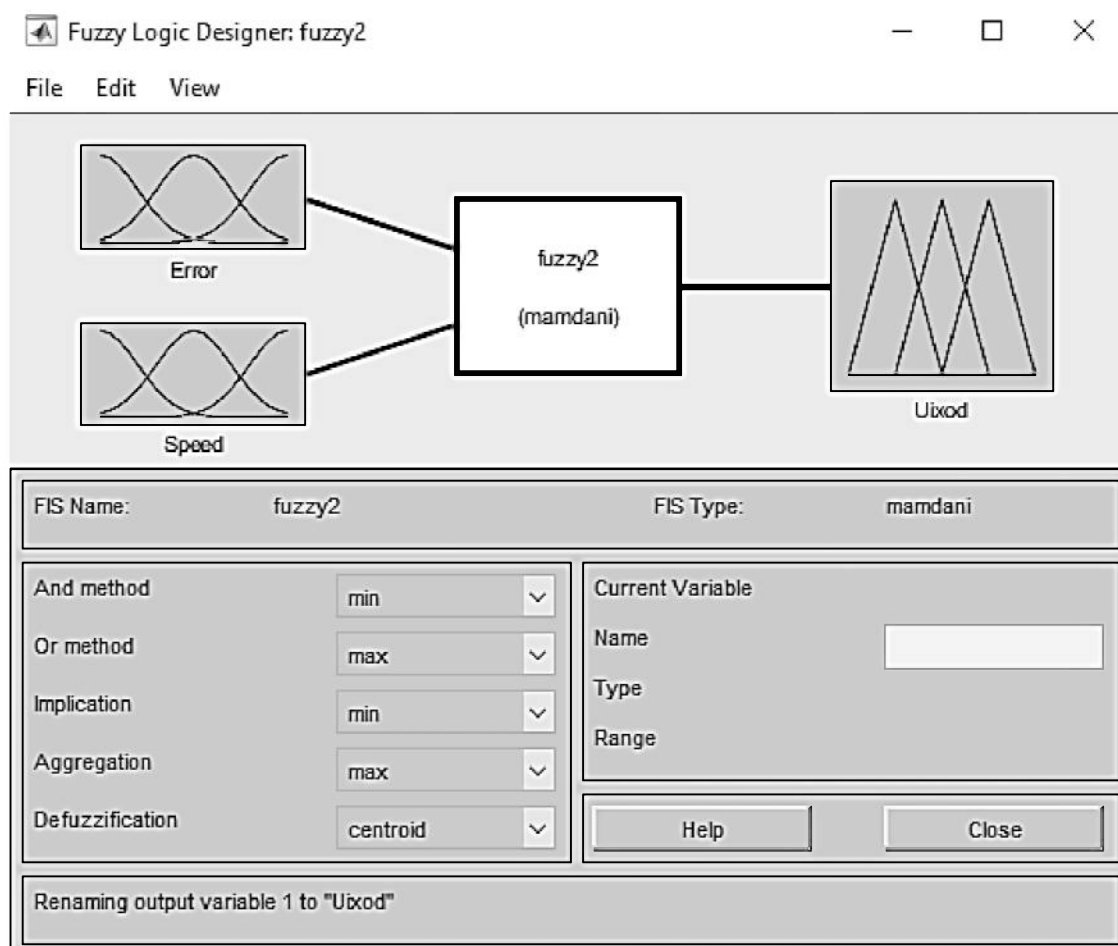


Рисунок 4.2 – Основна частина FIS-редактора

FIS-редактор дозволяє створювати входи, виходи, редагувати функції приналежності, редагувати правила, визначати роботу правил і відображати поверхню відгуку. Спочатку використаємо алгоритм логічного висновку Мамдані, для чого виконаємо налаштування функцій обраного інструменту [23]:

– *Налаштування функцій приналежності входу помилки*

Визначаємо діапазон зміни значень: значення помилки буде від -2 до 2 . Задаємо три функції приналежності трикутного типу із заданими у табл. 4.1 вершинами і 2 типу *zmf* з установкою в одиницю, починаючи з зазначеного в тій же таблиці значення, що відповідає лінгвістичній змінній, за яку дана функція відповідає. Для більш простого орієнтування проставимо назви вершин. Кожна функція приналежності відповідає за одну певну лінгвістичну змінну [24].

Налаштовані функції приналежності для входу помилки показані на рис. 4.3, а параметри їх термів заносимо до табл. 4.2.

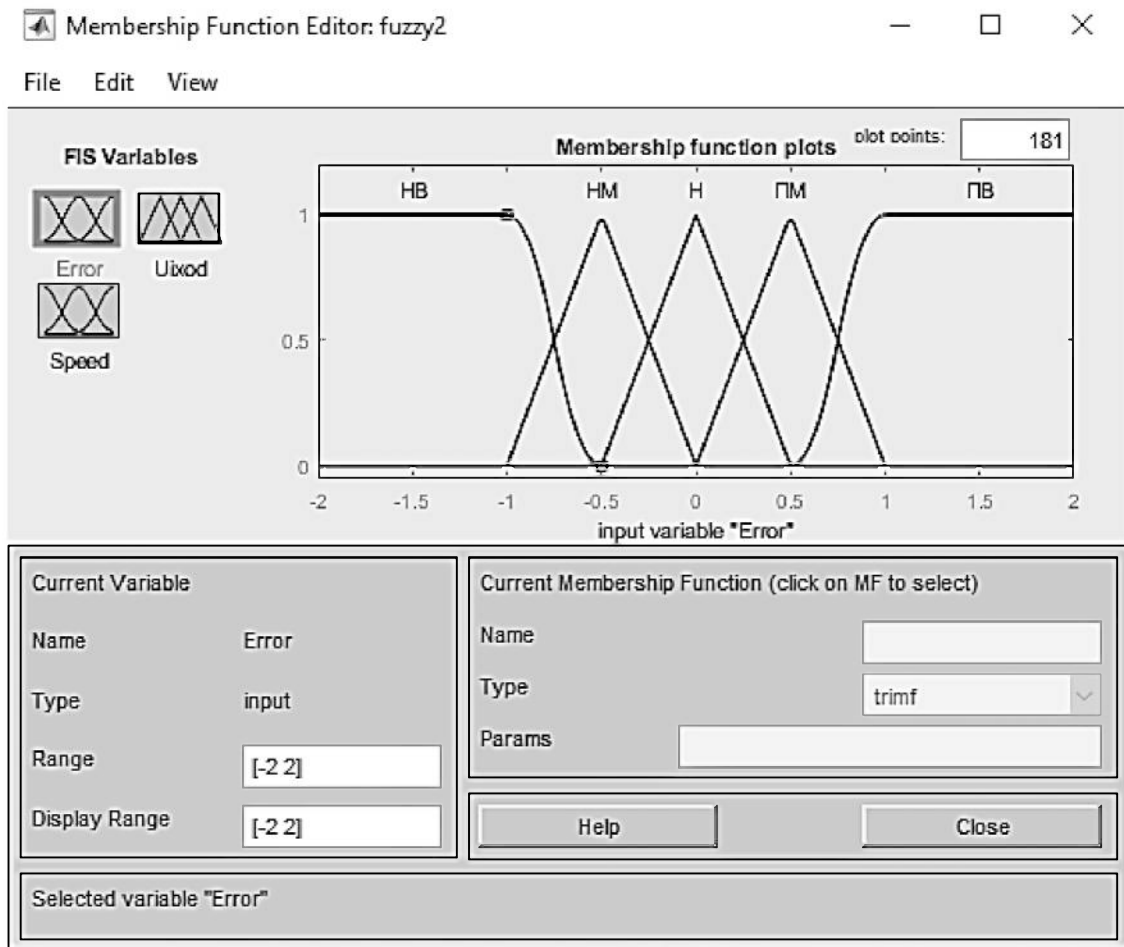


Рисунок 4.3 – Функція приналежності для помилки

Таблиця 4.2 – Параметри функції приналежності вхідної змінної Error

Терм	Форма терму	Характерні точки
HB	zmf	$[-1 \ -0.5]$
HM	trimf	$[-1 \ -0.5 \ 0]$
H	trimf	$[-0.5 \ 0 \ 0.5]$
ПМ	trimf	$[0 \ 0.5 \ 1]$
ПВ	smf	$[0.5 \ 1]$

– Налаштування функцій приналежності входу швидкості

Другою вхідною величиною фаззи-регулятора є перша похідна від помилки регулювання, тобто швидкість зміни помилки регулювання. Як і в разі входження помилки, настроювання функцій приналежності входу швидкості починається з установки діапазону зміни значень. Діапазон регулювання швидкості буде коливатися від -5 до 5 . Як і для попереднього входу, задаємо три функції приналежності трикутного типу з відповідними для своїх лінгвістичних змінних вершинами та аналогічно для 2 типу *zmf*. Для більш простої орієнтації визначимо назви для вершин. Визначені функції приналежності для входу швидкості показані на рис. 4.4, а параметри їх термів – у табл. 4.3.

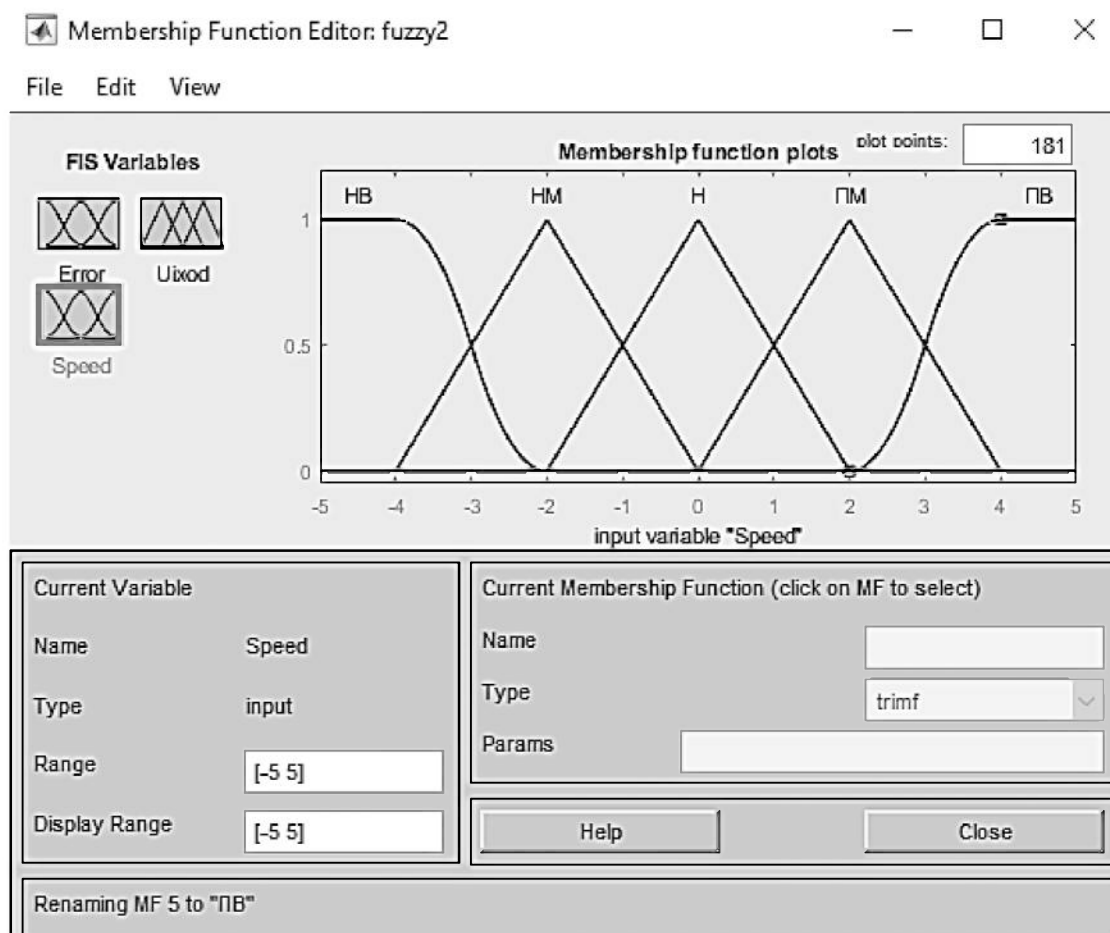


Рисунок 4.4 – Функція приналежності для швидкості

Таблиця 4.3 – Параметри функції приналежності вхідної змінної Speed

Терм	Форма терму	Характерні точки
НВ	zmf	[-4 -2]
НМ	trimf	[-4 -2 0]
Н	trimf	[-2 0 2]
ПМ	trimf	[0 2 4]
ПВ	smf	[2 4]

– Налаштування функцій приналежності виходу регулятора

Встановлення виводів нечіткого регулятора не має суттєвих відмінностей від настройки його входів, тому починаємо з установки діапазону зміни значень – у даному випадку він буде коливатися від -10 до 10. Задаємо три функції приналежності трикутного типу і 2 типу zmf. Для більш простого орієнтування позначимо назви вершин.

Визначені функції приналежності для виходу нечіткого регулятора показано на рис. 4.5, а параметри їх термів – у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Параметри функції приналежності вихідної змінної U_{ixod}

Терм	Форма терму	Характерні точки
НВ	zmf	[-10 -5]
НМ	trimf	[-10 -5 0]
Н	trimf	[-5 0 5]
ПМ	trimf	[0 5 10]
ПВ	smf	[5 10]

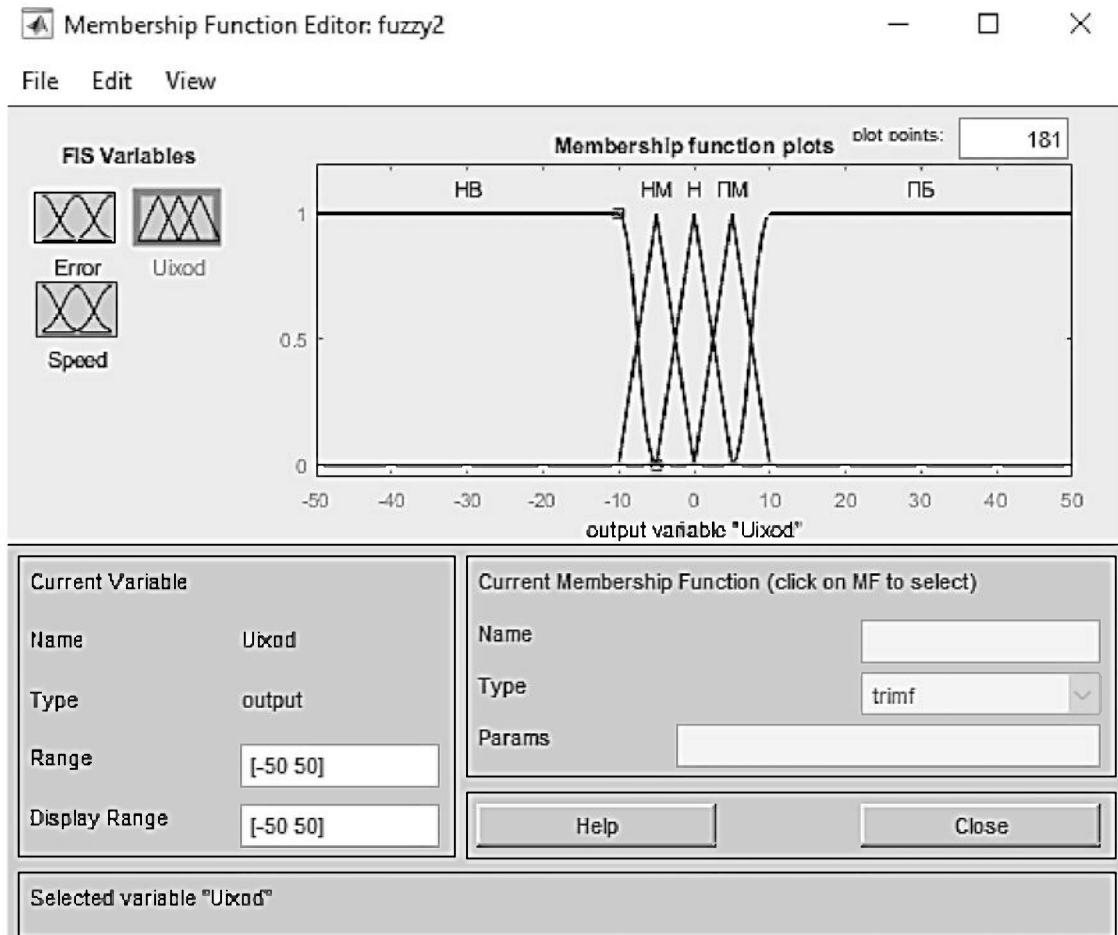


Рисунок 4.5 – Функція приналежності для вихідного сигналу

Зважаючи на те, що були сформовані усі функції приналежності, можна скласти базу правил. База правил систем нечіткого виведення призначена для формального уявлення емпіричних знань експертів в тій чи іншій предметній області у формі нечітких похідних правил.

Таким чином, база нечітких похідних правил системи нечіткого виведення – це система нечітких похідних правил, які відображають знання експертів про методи управління об'єктом у різних ситуаціях і характер його функціонування при різних ситуаціях, тобто містять формалізовані людські знання [25].

Зведені правила для розробленої системи представлені у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Блок правил в лінгвістичних значень

1-змін.	НВ	НМ	Н	ПМ	ПВ
2-змін.	Вихідне значення				
НВ	НМ	ПМ	ПВ	ПВ	ПВ
НМ	НВ	Н	ПМ	ПВ	ПВ
Н	НВ	НМ	Н	ПМ	ПВ
ПМ	НВ	НВ	НМ	Н	ПВ
ПВ	НВ	НВ	НВ	НМ	ПМ

На основі представленого блоку правил регулятора положення складемо таблицю правил, наведених на рис. 4.6. Редактор дозволяє представляти правила у різних форматах відображення – у даному випадку використовувався формат деталізації (verbose).

Після складання таблиці правил здійснимо графічну їх реалізацію, завдяки якій можна визначити – як буде вести себе система при різних вхідних даних.

На рис. 4.7 представлено графічне зображення роботи системи з параметрами швидкості і помилки, що дорівнюють нулю.

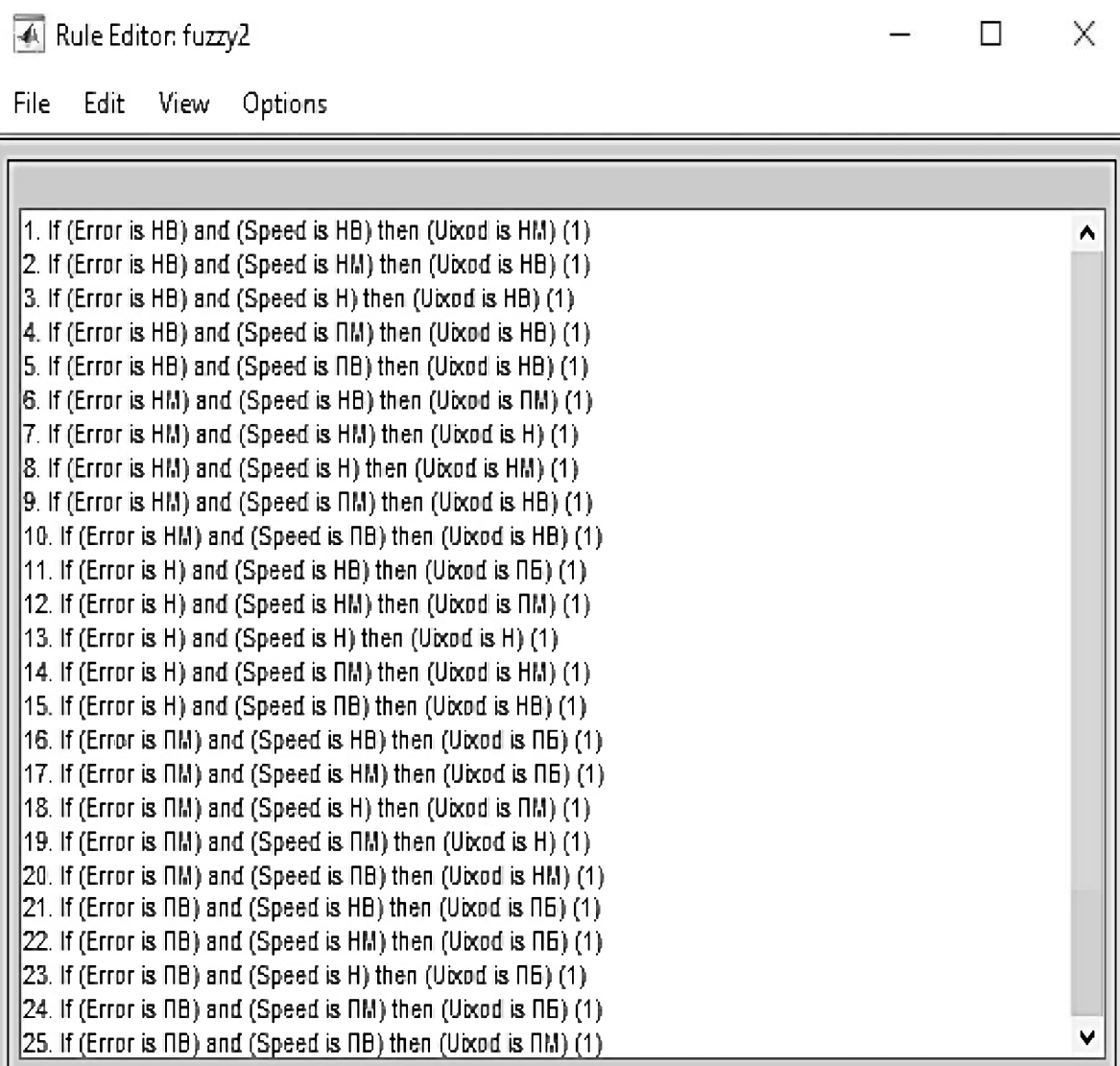


Рисунок 4.6 – Вікно редактора правил

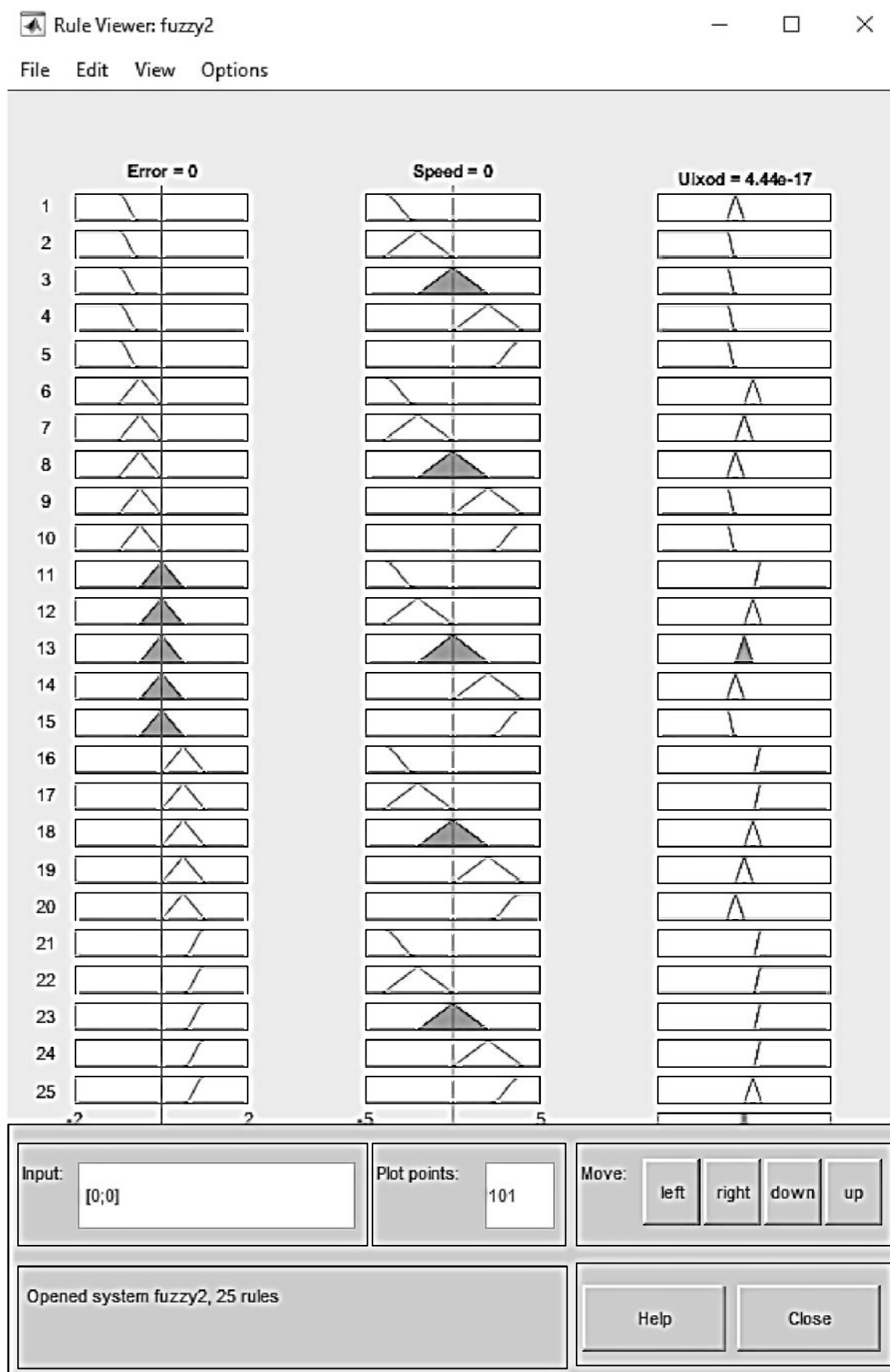


Рисунок 4.7 – Вікно реалізації правил (параметри швидкості і помилки дорівнюють нулю)

Змінюючи значення вхідних і вихідних даних можна отримати поверхню відгуку, тривимірна реалізація якої представлена на рис. 4.8.

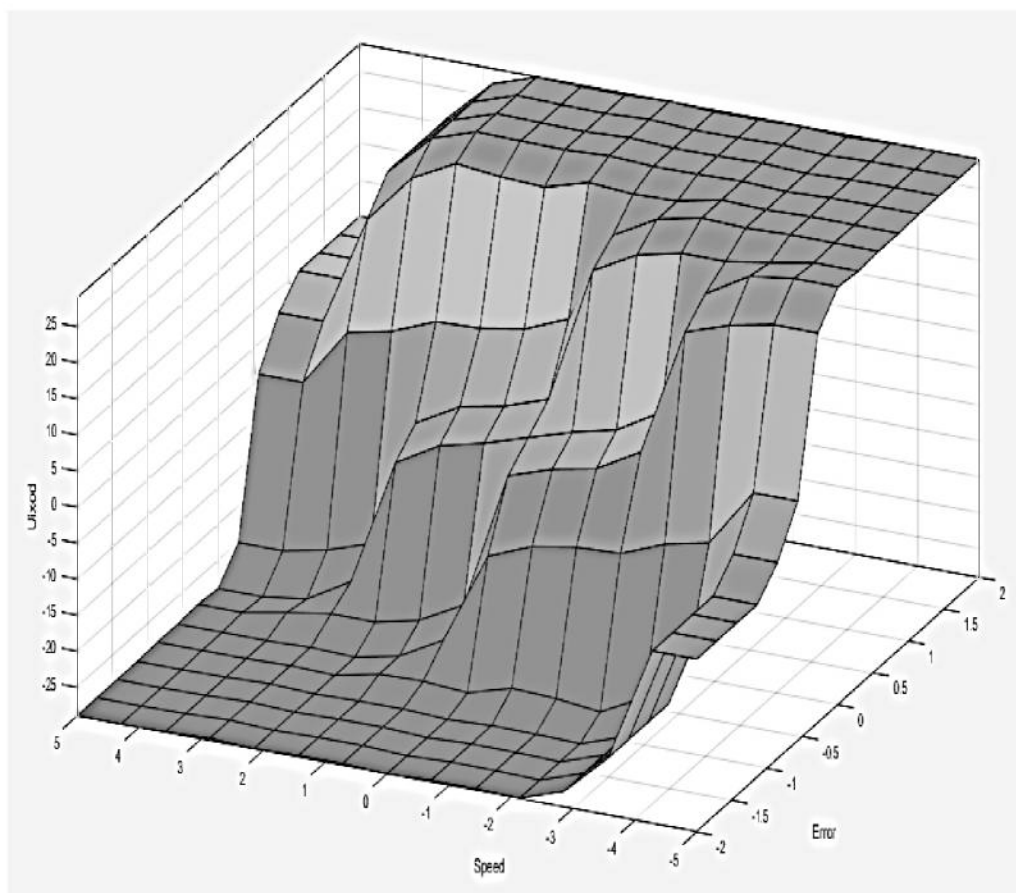


Рисунок 4.8 – Реалізація поверхні відгуку (параметри швидкості і помилки дорівнюють нулю)

4.4 Включення нечіткої логіки в Simulink-модель системи

Для моделювання системи з підключенням фаззі-блоку у якості регулятора положення використовуємо модель готової системи керування положенням двомасової ЕМС і підключимо створений фаззі-блок паралельно до класичного регулятора положення (рис. 4.9) [23].

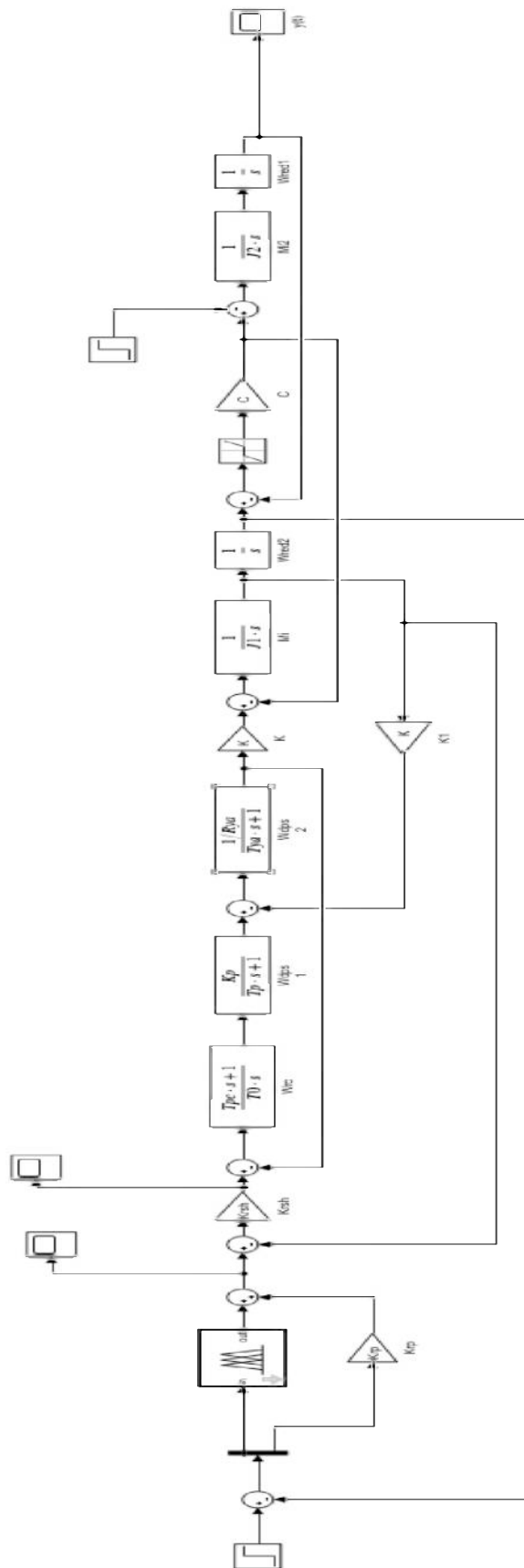


Рисунок 4.9 – Модель системи керування положенням двомасової ЕМС з використанням блоку fuzzy logic

Після налаштування та підключення регулятора на базі нечіткої логіки здійснюємо процес моделювання створеної системи для визначення характеристик перехідного процесу (рис. 4.10).

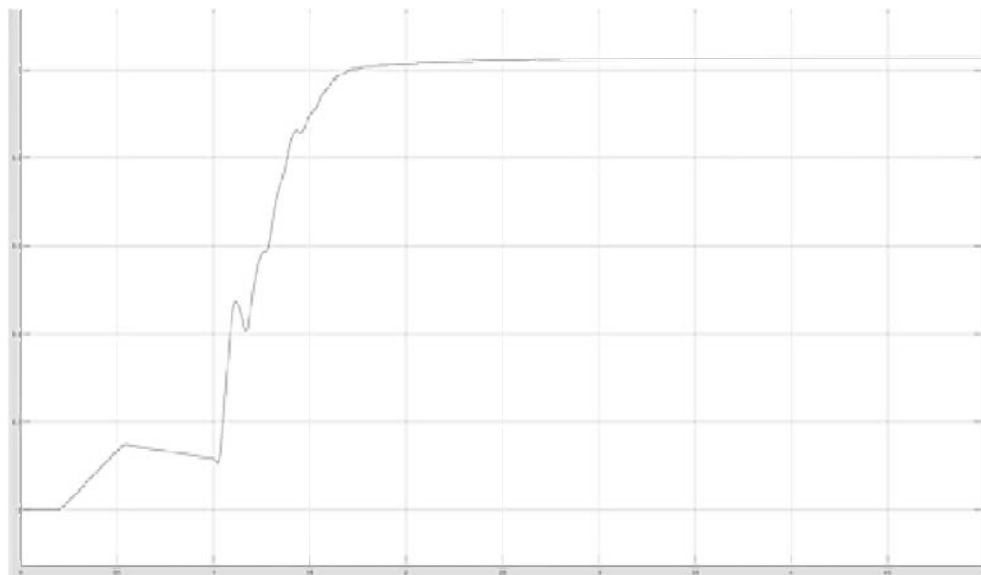


Рисунок 4.10 – Вигляд перехідної функції системи керування з фаззі-регулятором положенням двомасової ЕМС

Результати моделювання говорять про те, що якість перехідного процесу залишилася на досягнутому раніше рівні, окрім часу перехідного процесу, який скоротився у порівнянні з системою із застосуванням класичного регулятора.

Порівняльний аналіз систем підлеглого регулювання з класичним регулятором і з регулятором на базі нечіткої логіки говорить про досягнення «гладкого» перехідний процес без перерегулювання, без наявної статичної помилки, Система з нечітким регулятором сягає сталого значення раніше свого аналога з класичним регулятором, тобто має менший час перехідного процесу, що є безумовним її перевагою перед системою з класичним регулятором. Результати моделювання свідчать, що застосування даного регулятора дозволяє зменшити час регулювання на 7–25 %.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок про можливість зіставлення фізичного, математичного і комп'ютерного моделювання двигуна постійного струму з використанням пакету прикладних програм Matlab, який є універсальним пакетом для здійснення моделювання складних технічних систем.

У роботі була розроблена імітаційна модель, розраховані додаткові параметри двигуна постійного струму, розроблені кілька моделей за допомогою бібліотек блоків Simulink середовища Matlab.

Можна зазначити, що фізичне моделювання є більш складним як при розробці моделі, так і при аналізі результатів моделювання у порівнянні з математичним і комп'ютерним моделюванням, перша дозволяє отримати і проаналізувати набагато більше електричних параметрів для адекватної оцінки роботи електромеханічної системи. Структурна модель у своїй будові є більш простою ніж модель фізична, але вимагає додаткових розрахунків постійних часу і констант двигуна, її переваги полягають у тому, аналіз можливий у будь-якій точці моделі. Математичне моделювання електроприводів з двигунами постійного струму характеризується малими похибками та високою точністю розрахунків.

У розробленій схемі комбінованого ПІД-регулятора з фаззі-регулятором з нечіткою динамічною корекцією була реалізована можливість настроювання його параметрів. Розроблена система має гарні динамічні характеристиками у порівнянні з класичними П-регулятором. Застосована у регуляторі фаззі-складова і нечітка логіка дозволяє зменшити перерегулювання і знизити час встановлення регульованого параметра. Розроблена схема регулятора рекомендується для використання у нелінійних керованих системах.

Нечітке керування може бути використано для регулювання параметрів досліджуваних процесів як самостійно, так і в складі традиційних ПІ і ПІД-регуляторів, що дозволить суттєво поліпшити їхні характеристики. З огляду на це, нечіткі автоматизовані системи керування мають гарні перспективи для впровадження у промисловості для автоматизації електроприводів.

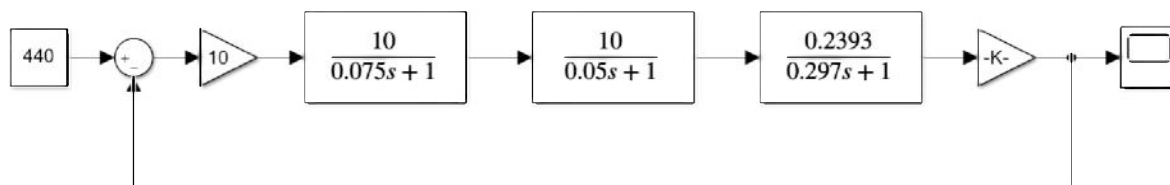
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кочетков, В.П. Основы электропривода: учеб. пособие. / В.П. Кочетков. – 2-е изд., испр. – Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ – Филиал СФУ, 2007. – 272 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
3. Попович М. Т. Теорія електроприводу. Київ, «Вища школа», 1996 – 460 с.
4. Семёнов А.С. Моделирование автоматизированного электропривода. – М.: Издательство «Спутник+», 2012. – 60 с.
5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
6. Величко Т. В. Теория электропривода. Часть 1. Механика и характеристики двигателей в электроприводе : учебное пособие / Т. В. Величко, Д. И. Родькин. – Кременчуг : КГПИ, 1999. – 237 с.
7. Semenov A.S., Khubieva V.M., Kharitonov Y.S. Mathematical modeling of static and dynamic modes DC motors in software package MATLAB // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018.
8. Аносов В.Н., Наумов В.В., Котин Д.А. Теория автоматического управления. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2016. – 68 с.
9. Колб А. А. Теорія електроприводу : навчальний посібник / А. А. Колб, А. А. Колб. – Д. : Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.
10. Bolgov I., Bolgova V. Detailed simulation model of the two-phase brushless DC motor designed for VFD integration // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – 2016. – № 57.

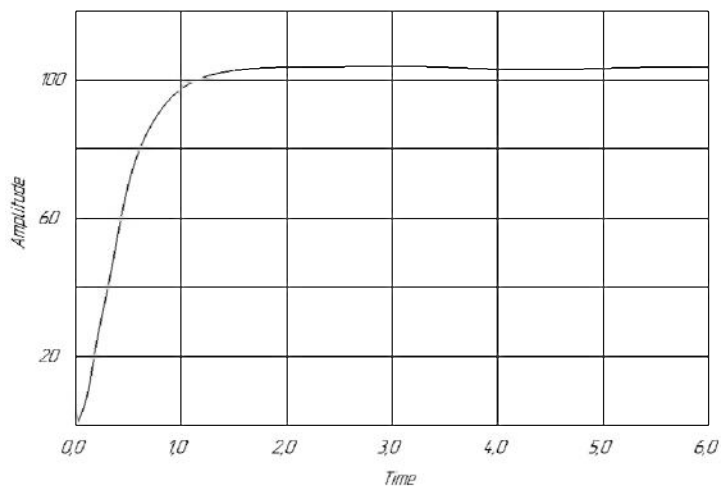
11. Durak U., Öztürk A., Katircioglu M. Simulation Deployment Blockset for MATLAB/Simulink // Symposium on Theory of Modeling and Simulation (TMS-DEVS). – 2016.
12. Коростелёв А.А. Сравнительный анализ функциональных возможностей интеллектуальных нечетких и ПИ-регуляторов: мат-лы конф. «Первый открытый конкурс молодых специалистов ЗАО «СибКОЭС». – Томск: ТПУ, 2008.
13. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.В. Москаленко. – М. : Изд. центр «Академия», 2004. – 368 с.
14. Иванов А.А. Теория автоматического управления и регулирования. – М.: Недра, 1987. – 351 с.
15. Лукас В.А. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. Недра, 1990. – 416 с.
16. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
17. Тютюнник, А. Г. Оптимальні і адаптивні системи автоматичного керування: навчальний посібник / А. Г. Тютюнник. – Житомир: ЖІТІ, 1998. – 512 с.
18. Семёнов А.С. Программа MATLAB. – М.: Издательство «Спутник+», 2012. – 40 с.
19. З.Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
20. Гостев В.И. Фаззи-системы автоматического управления параметрами промышленных объектов: монография. / Гостев В.И. – Нежин: ООО «Видавництво АспектПоліграф», – 2009. – 432 с.
21. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах: учеб. пособие. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.

22. Мирошник, И.В. Теория автоматического управления: Нелинейные и оптимальные системы: учеб. пособие для вузов / И.В. Мирошник. – СПб: ПИТЕР, 2006. – 272 с.
23. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Перербург, 2003. – 736 с.
24. Калашніков В.І. , Паліс Ф. , Колларов О.Ю. “Основи теорії фаззі-логіки та фаззі-регулювання”: учбовий посібник/ Калашніков В.І. , Паліс Ф. , Колларов О.Ю. - Донецьк, Магдебург - 2008 - 69с.
25. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: Бином, 2009. – 800 с.
26. Головки Д.Б., Рого К.Г., Скрипник Ю.О. Автоматика і автоматизація технологічних процесів. К.: Либідь, 1997,-232 с.
27. Справочник по электроустановкам высокого напряжения. /Под ред. Баумштейна И.А. и Хомякова В.М. – М.: Энергия, 1981. – 656 с.
28. Правила безопасной эксплуатации энергоустановок. – Киев, 1998. – 142 с.

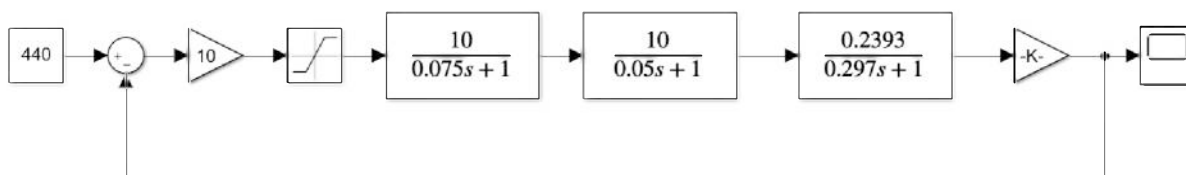
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



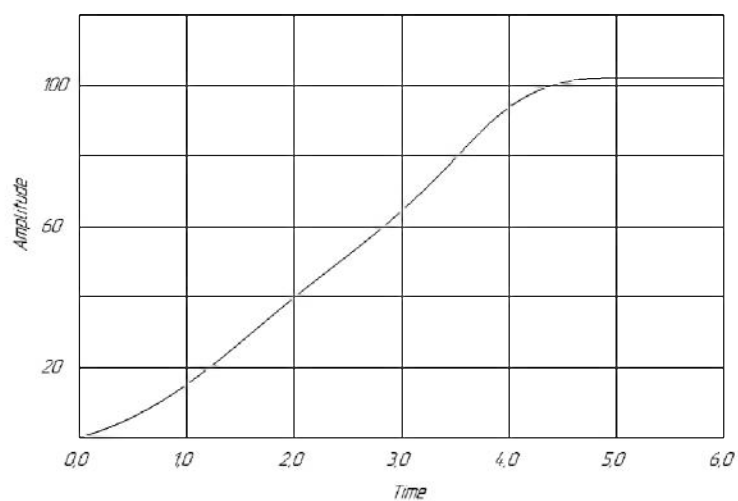
Математична модель системи без врахування наявної нелінійності



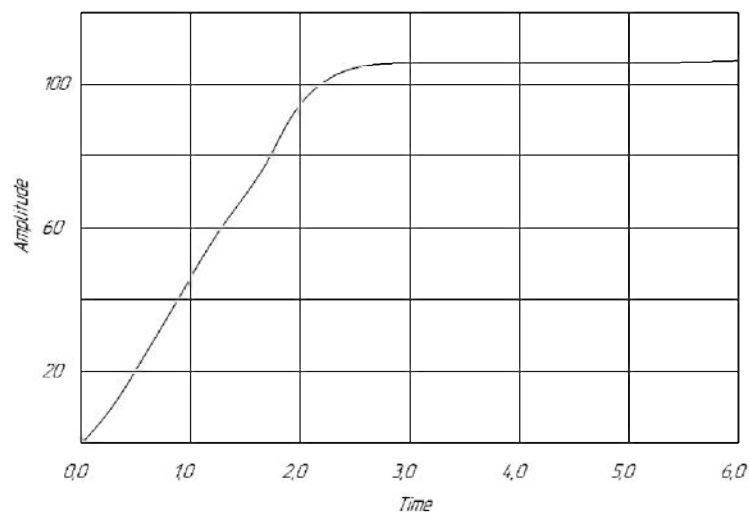
Результати моделювання – графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна



Математична модель з урахуванням наявної нелінійності



Результати моделювання – графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна з урахуванням наявної нелінійності



Результати моделювання – графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна (при збільшенні меж нелінійності)

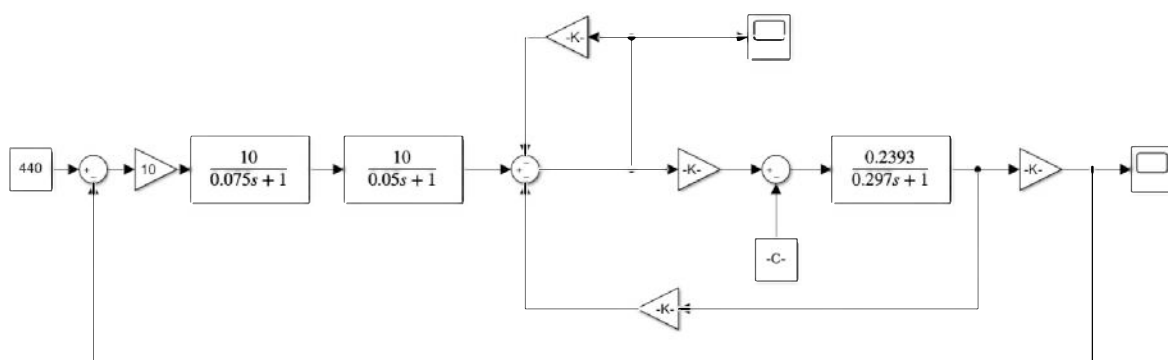
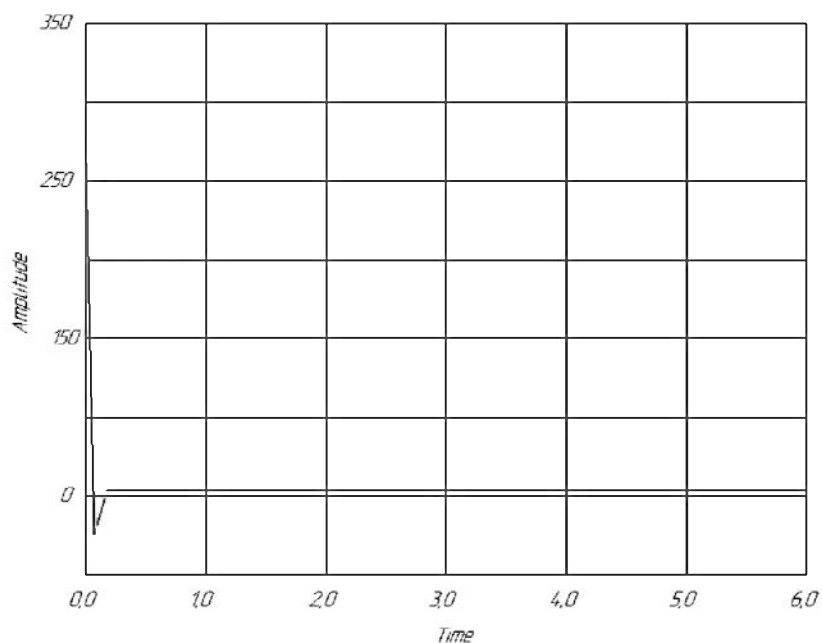
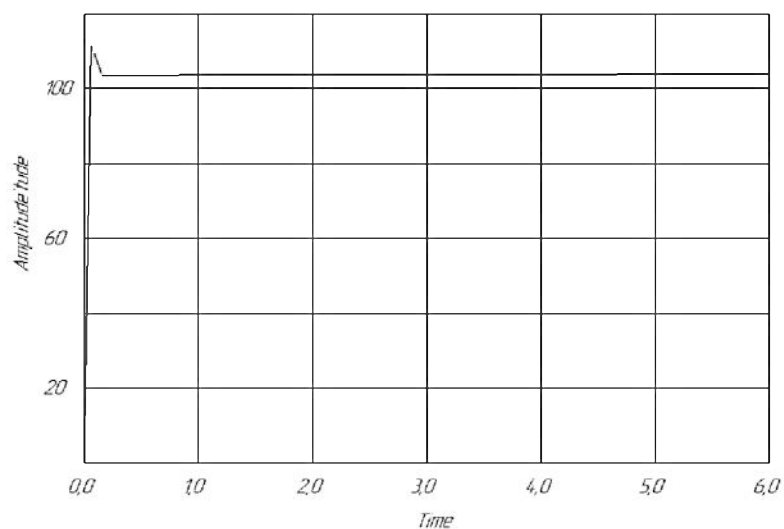


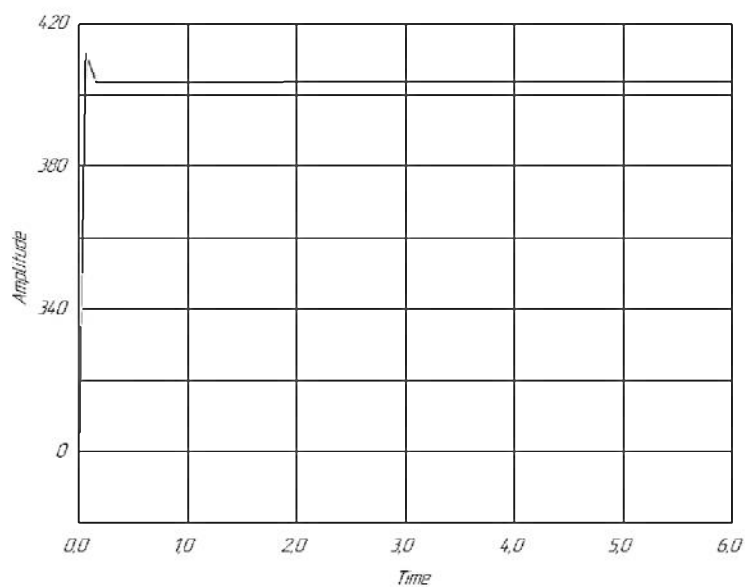
Рисунок 2.7 – Математична модель з ненавантаженим двигуном (без урахування наявної нелінійності)



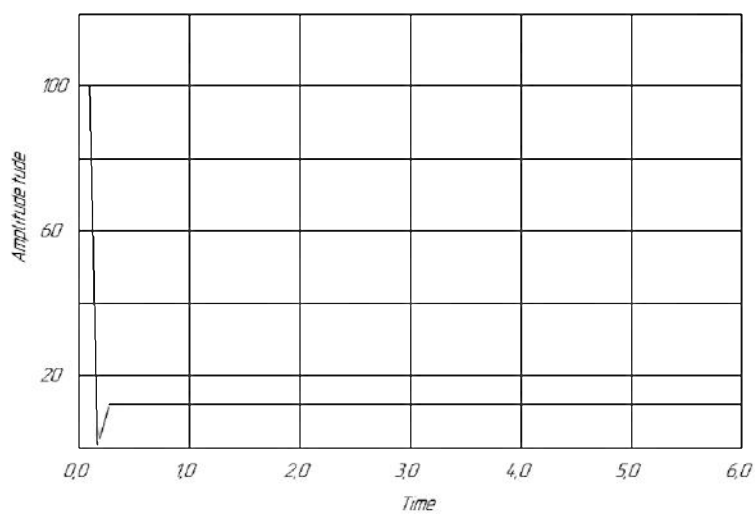
Графік перехідного процесу зміни струму якоря ДПС



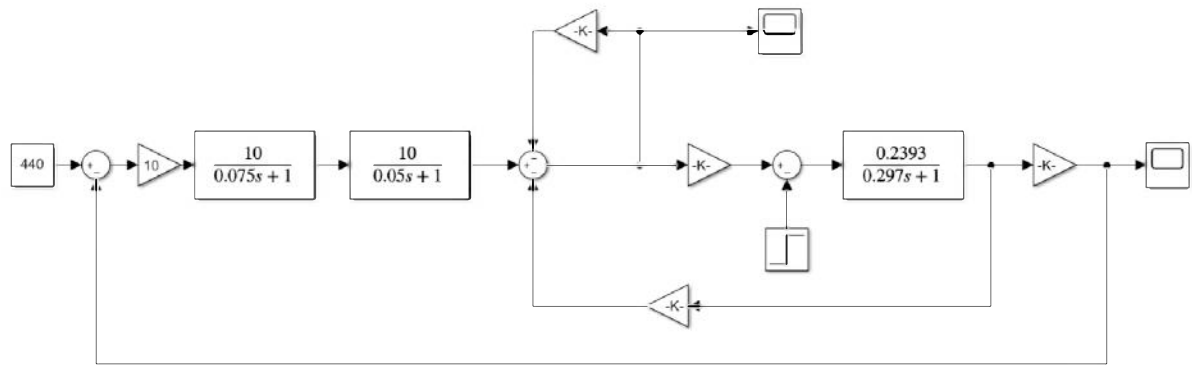
Графік перехідного процесу зміни кутової швидкості обертання валу двигуна під час пуску ДПС



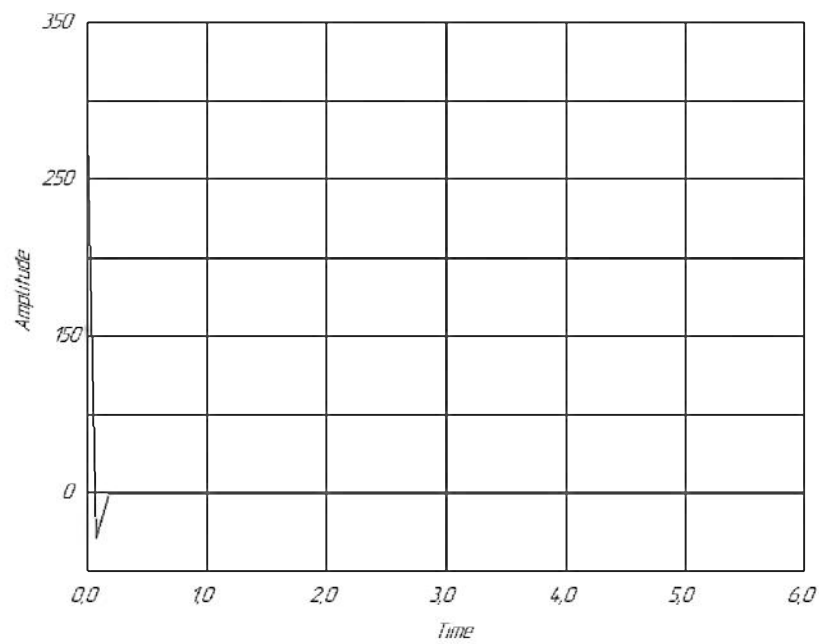
Графік перехідного процесу струму якоря двигуна



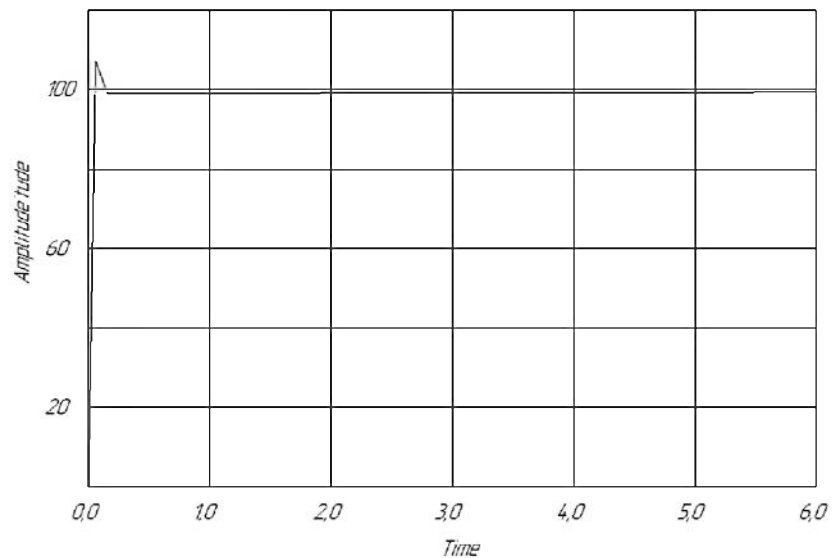
Перехідний процес зміни кутової швидкості обертання валу двигуна



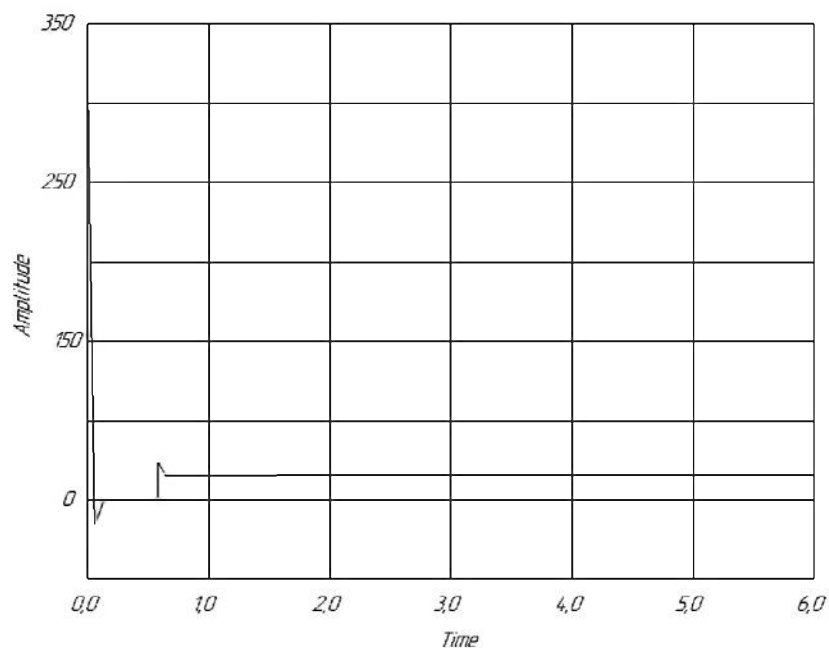
Математична модель з навантаженим двигуном (з урахуванням наявної нелінійності)



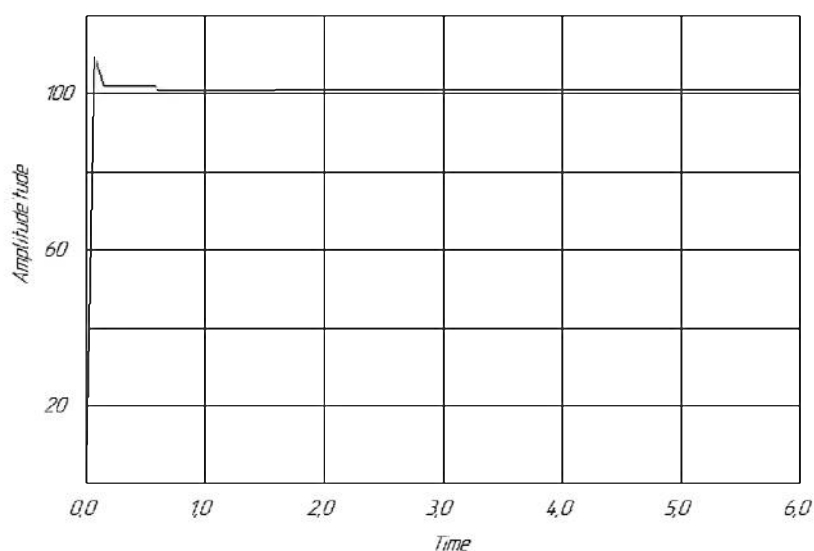
Графік перехідного процесу струму якоря двигуна (з урахуванням наявної нелінійності)



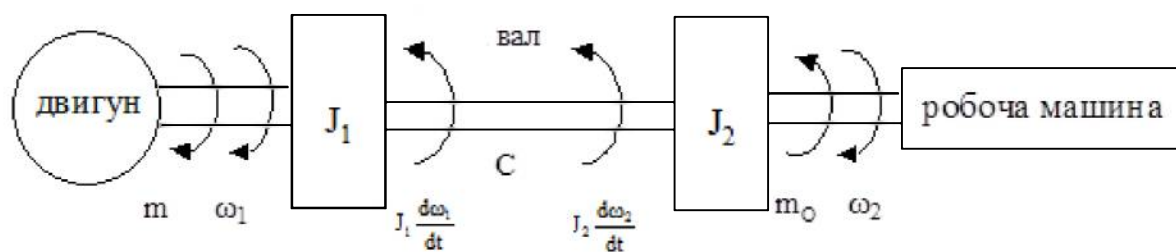
Перехідний процес зміни кутової швидкості обертання валу двигуна (з урахуванням наявної нелінійності)



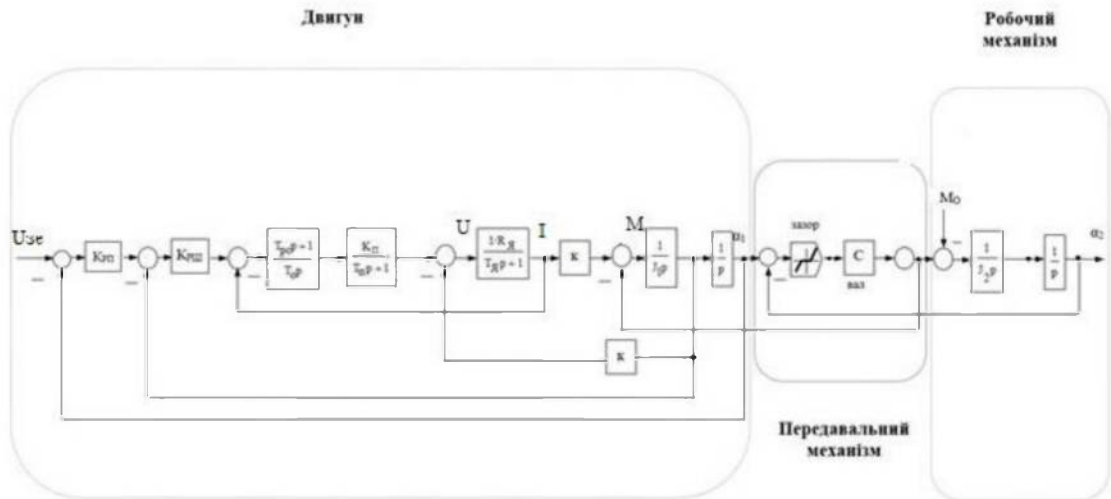
Перехідний процес зміни струму якоря двигуна (з урахуванням наявної нелінійності) при номінальному навантаженні



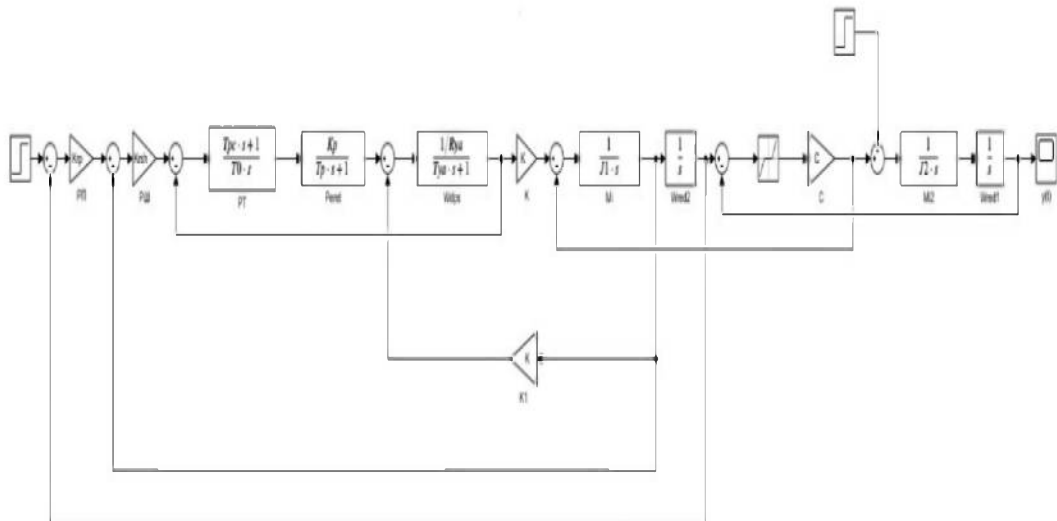
Перехідний процес зміни кутової швидкості обертання валу двигуна (з урахуванням наявної нелінійності) при номінальному навантаженні



Двомасова система електроприводу



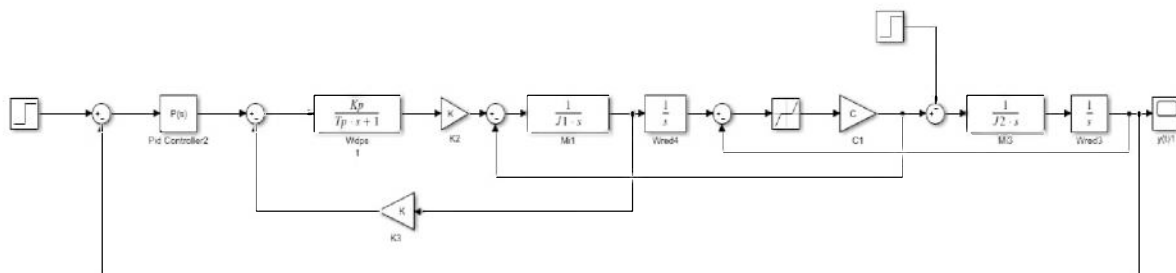
Структурна схема системи електроприводу з двигуном постійного струму



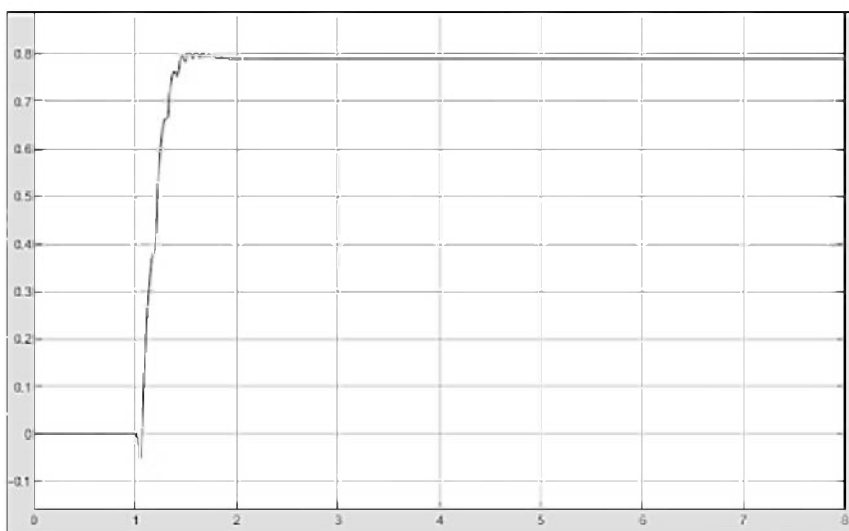
Модель системи керування положенням двомасової ЕМС



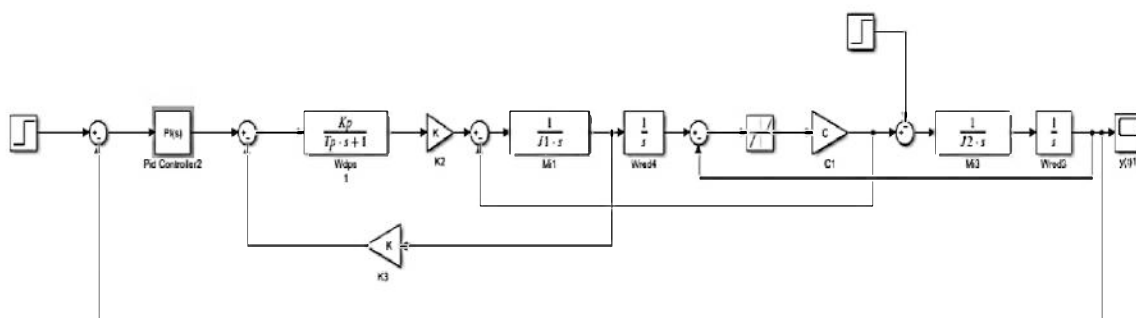
Вигляд перехідної функції системи керування положенням двомасової ЕМС за результатами моделювання



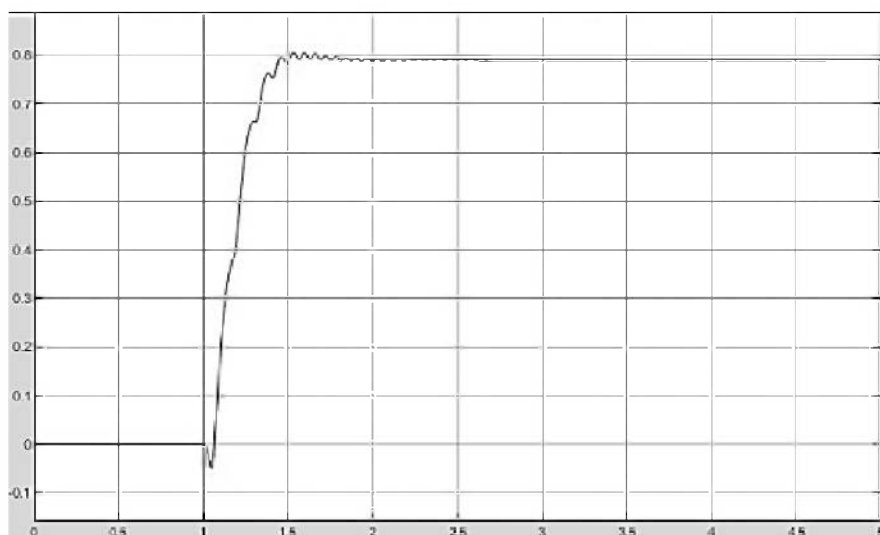
Створена модель системи з П-регулятором



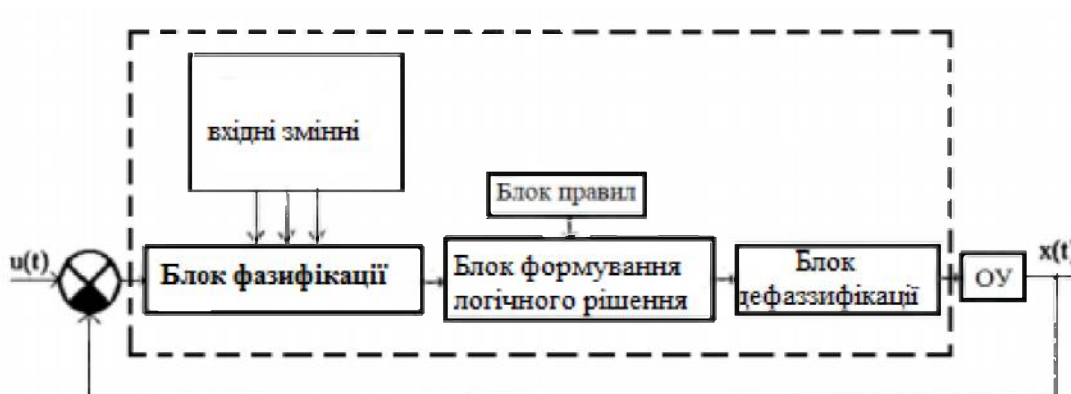
Вигляд перехідної функції системи керування положенням двомасової ЕМС з П-регулятором



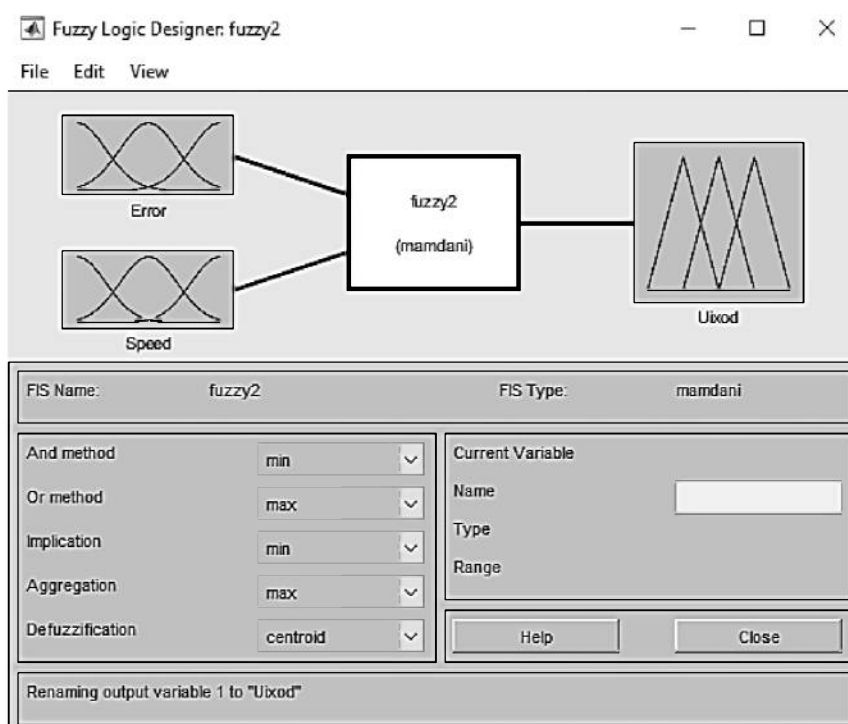
Модель системи з ПІ-регулятором



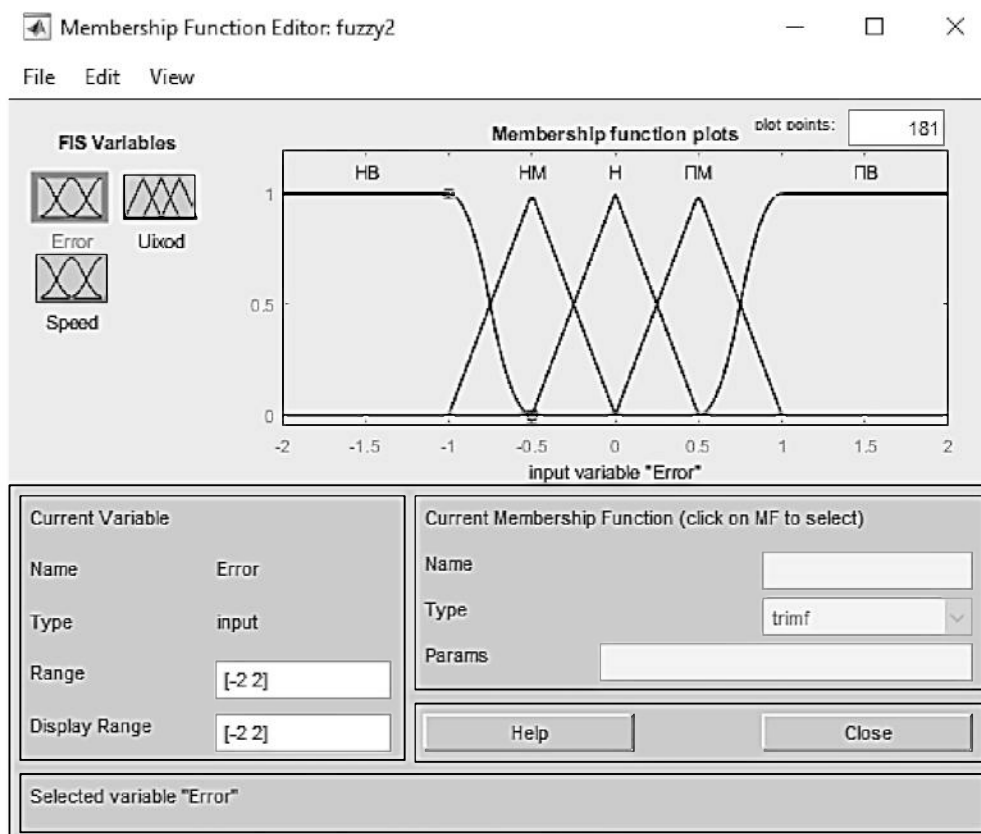
Перехідна функція системи керування положенням двомасової ЕМС з
ПІ-регулятором



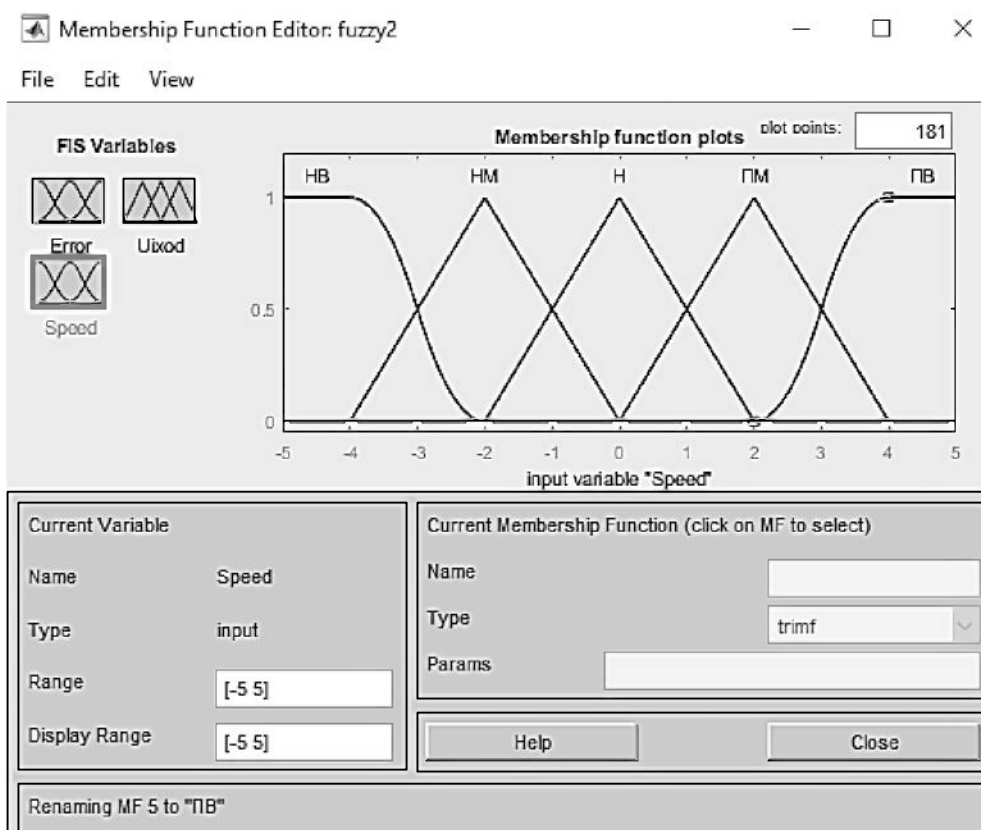
Функціональна схема з нечітким регулятором



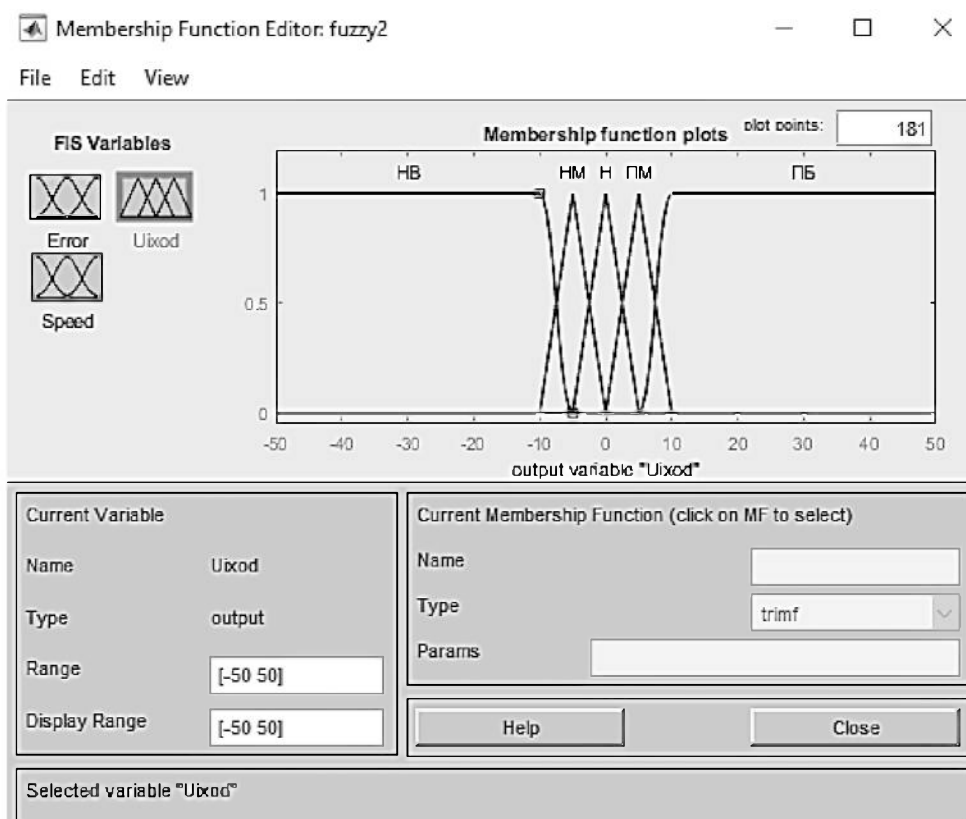
Основна частина FIS-редактора



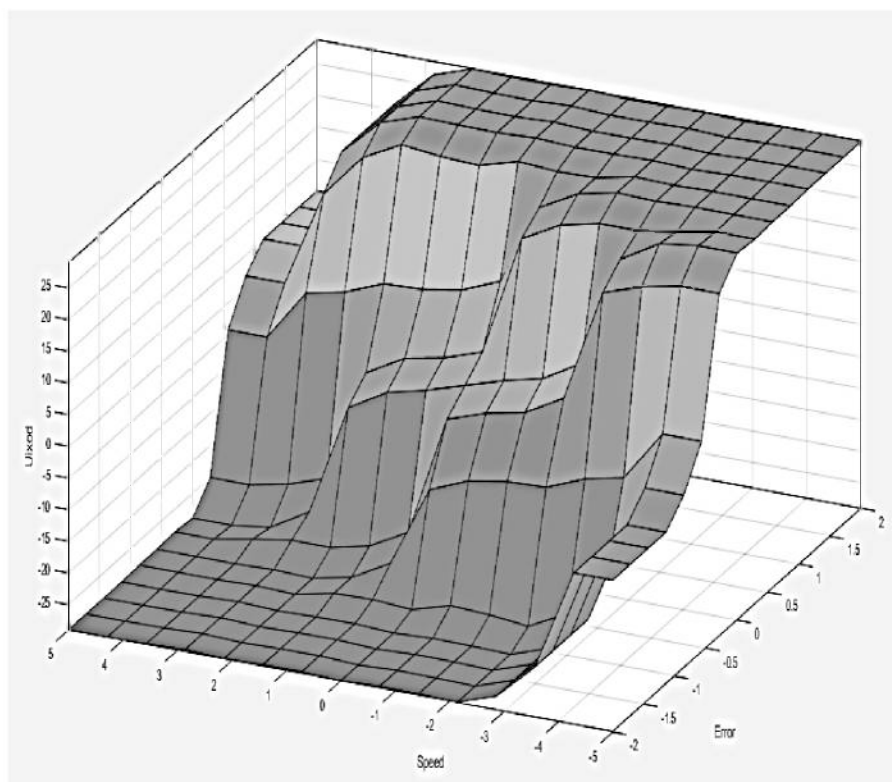
Функція приналежності для помилки



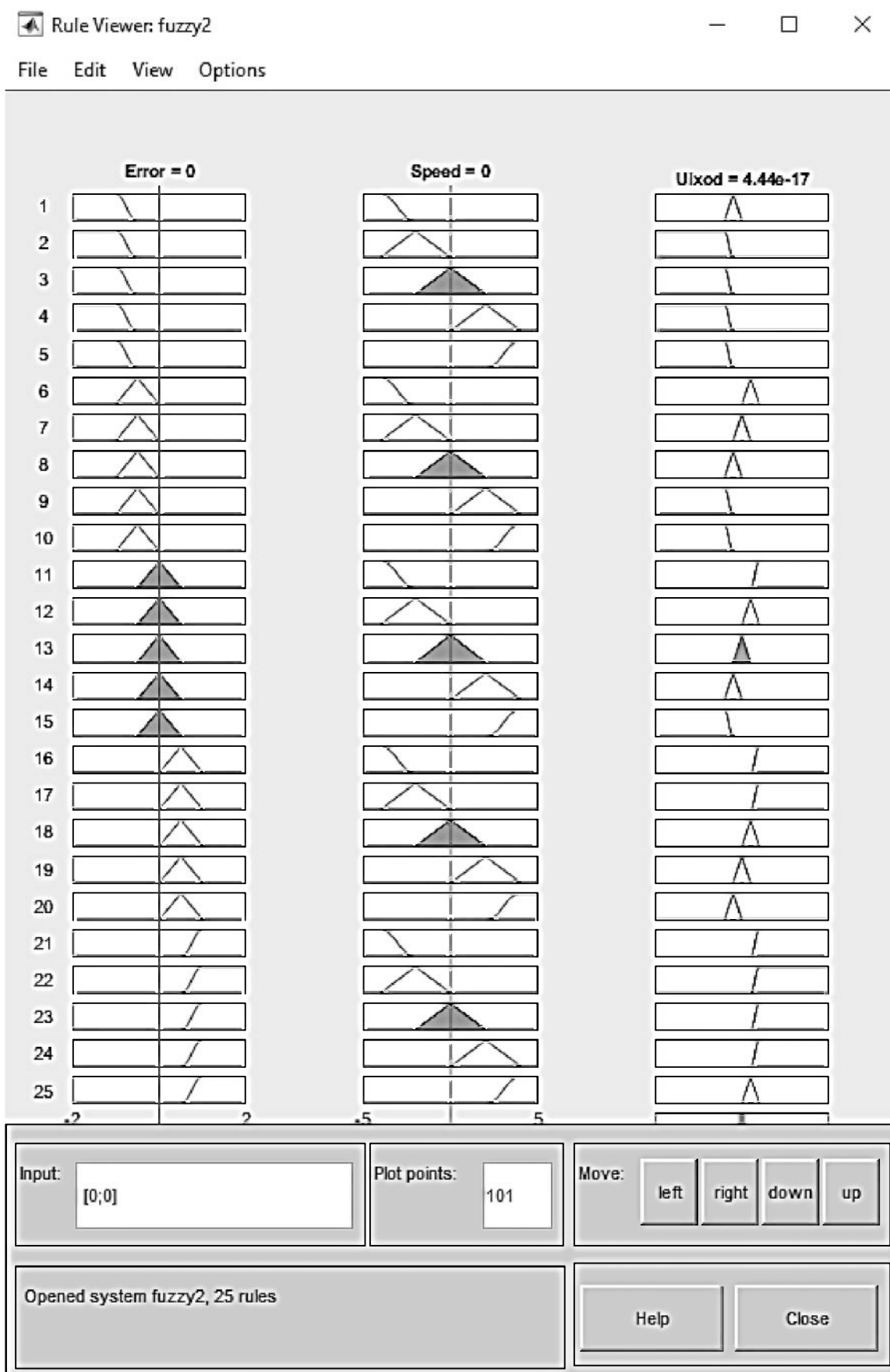
Функція приналежності для швидкості



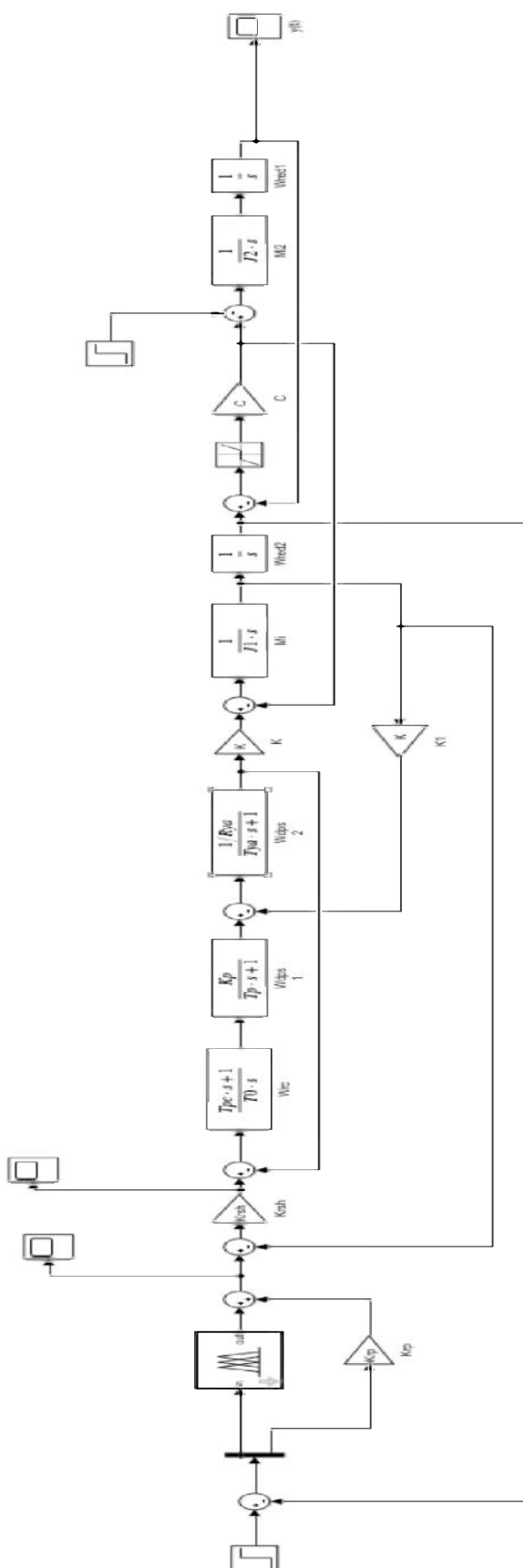
Функція приналежності для вихідного сигналу



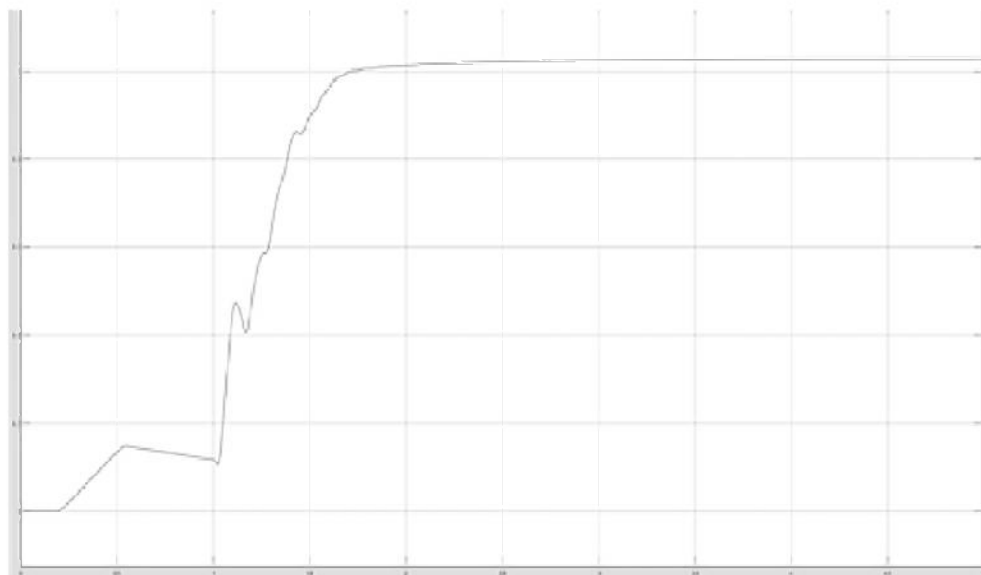
Реалізація поверхні відгуку (параметри швидкості і помилки дорівнюють нулю)



Вікно реалізації правил (параметри швидкості і помилки дорівнюють нулю)



Модель системи керування положенням двомасової ЕМС з використанням блоку fuzzy logic



Вигляд перехідної функції системи керування з фаззі-регулятором положенням двомасової ЕМС

ДОДАТОК Б. ОГЛЯД ПИТАНЬ БЕЗПЕКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ

Безпека праці на виробництві охоплює такі три складники:

- безпеку виробничого обладнання;
- безпеку технологічних процесів;
- безпеку виконання робіт.

Безпеку виробничого обладнання забезпечують такими методами:

- добором принципів дії, джерел енергії та параметрів робочих процесів;
- мінімізацією кількості енергії, що споживається чи накопичується;
- застосуванням вмонтованих у конструкцію засобів захисту та інформації про можливі небезпечні ситуації;
- застосуванням засобів автоматизації, дистанційного керування та контролю;
- дотриманням ергономічних вимог, обмеженням фізичних і нервово-психологічних навантажень на працівників.

Виробниче обладнання під час роботи, самотійно чи у складі технологічних комплексів повинно відповідати вимогам безпеки впродовж усього періоду експлуатації. Матеріали конструкції виробничого обладнання не повинні зумовлювати утворення небезпечних чи шкідливих факторів щодо дії на організм працівників, а навантаження, що виникають під час роботи в окремих елементах обладнання, не повинні сягати небезпечних величин. У разі неможливості реалізації останньої вимоги у конструкції обладнання необхідно передбачити спеціальні засоби захисту (огороження, блокування та ін.).

Допоміжні пристрої (затискачі, вантажозахоплювальні та вантажопідіймальні пристрої) повинні унеможливити виникнення

небезпеки під час раптового вимкнення енергії, а також самовільну зміну стану цих пристроїв після відновлення енергоживлення.

Виробниче обладнання повинно бути пожежовибухобезпечним у передбачених умовах експлуатації та не накопичувати зарядів статичної електрики у небезпечних для працівників кількостях.

Виробниче обладнання, робота якого супроводжується виділенням шкідливих речовин чи організмів або пожежо- та вибухонебезпечних речовин, повинно включати вмонтовані пристрої для локалізації цих виділень. За відсутності таких пристроїв у конструкції обладнання мають бути передбачені місця для підключення автономних пристроїв локалізації виділень.

Якщо виробниче обладнання є джерелом шуму, ультра- та інфразвуку, вібрації, виробничих випромінювань (електромагнітних, лазерних тощо), то його треба виконувати таким чином, щоб параметри перелічених шкідливих виробничих факторів не перевищували меж, встановлених відповідними чинними нормативами.

Виробниче обладнання повинно бути забезпечене місцевим освітленням, виконаним відповідно до вимог чинних нормативів, якщо його відсутність може спричинювати перевантаження органів зору або інші небезпеки, пов'язані з експлуатацією цього обладнання.

Одна із складників безпеки виробничого обладнання – конструкція робочого місця, його розміри, взаємне розміщення органів управління, засобів відображення інформації, допоміжного обладнання тощо. Розробляючи конструкції робочого місця потрібно дотримуватися вимог чинних нормативів. Розміри робочого місця і його елементів мають забезпечувати виконання операцій у зручних робочих позах і не ускладнювати рухи працівників. Перевагу варто віддавати виконанню робочих операцій у сидячому положенні або почерговій зміні положень сидячи і стоячи, якщо виконання робіт не потребує постійного переміщення працівника. Конструкція крісла і підставки для ніг повинна

відповідати ергономічним вимогам.

Система управління виробничим обладнанням має забезпечувати надійне і безпечне його функціонування на всіх режимах роботи, а також у разі зовнішніх впливів. На робочих місцях повинні бути написи, схеми та інші засоби інформації щодо послідовності керуючих дій. Конструкція і розміщення засобів попередження про небезпечні ситуації повинні забезпечувати безпомилкове, достовірне і швидке сприйняття цієї інформації.

Центральний пульт управління технологічним комплексом обладнується сигналізацією, мнемосхемою або іншими засобами відображення інформації про порушення нормального режиму функціонування кожної одиниці виробничого обладнання, засобами аварійної зупинки всього комплексу або окремих його одиниць, якщо це не призведе до подальшого розвитку аварійної ситуації. Пуск виробничого обладнання в роботу, а також повторний пуск після його зупинки, незалежно від причини, має бути можливим тільки через маніпулювання органами управління пуском. Органи аварійної зупинки після спрацювання повинні залишатися у положенні зупинки до їх повернення у вихідне положення обслуговуючими працівниками. Повернення органів аварійної зупинки у вихідне положення не повинно призводити до пуску обладнання.

Засоби захисту, що входять у конструкцію виробничого обладнання, повинні:

- забезпечувати можливість контролю їх функціонування;
виконувати своє призначення безперервно у процесі роботи обладнання;
- діяти до повної нормалізації відповідного небезпечного чи шкідливого фактора, що спричинив спрацювання захисту;
- зберігати функціонування у випадку виходу з ладу інших засобів захисту.

За необхідності включення засобів захисту до початку роботи виробничого обладнання схемою управління повинні передбачатися відповідні блокування.

Виробниче обладнання, під час монтажу, ремонту, транспортування та зберігання якого застосовуються вантажопідіймальні засоби, повинно мати відповідні конструктивні елементи або позначені місця для приєднання вантажозахоплювальних пристроїв із зазначенням маси обладнання. Обладнання, переміщення якого передбачено вручну, повинно мати відповідні елементи або форму для захоплення рукою.

Безпека виробничого процесу визначається передусім урахуванням вимог безпеки до конкретного обладнання на етапі розробки проекту, випуску та випробуваннях випробного зразка та передачі його у серійне виробництво.

Основні вимоги безпеки до технологічних процесів:

- усунення безпосереднього контакту працівників з вихідними матеріалами, заготовками, напівфабрикатами, готовою продукцією та відходами виробництва, що можуть бути вірогідними чинниками небезпек;
- заміна технологічних процесів та операцій, пов'язаних з виникненням небезпечних і шкідливих виробничих факторів, процесами і операціями, за яких ці фактори відсутні або характеризуються меншою інтенсивністю;
- комплексна механізація та автоматизація виробництва, застосування дистанційного керування технологічними процесами та операціями за наявності небезпечних та шкідливих виробничих факторів;
- герметизація обладнання;
- застосування засобів колективного захисту працівників;
- раціональна організація праці та відпочинку задля профілактики монотонності праці, гіподинамії, а також обмеження важкості праці;

- своєчасне отримання інформації про виникнення небезпечних і шкідливих виробничих факторів на окремих технологічних операціях (системи отримання цієї інформації потрібно виконувати за принципом пристроїв автоматичної дії з виведенням на системи попереджувальної сигналізації);
- впровадження систем контролю та керування технологічним процесом, що забезпечують захист працівників та аварійне відключення виробничого обладнання;
- своєчасне видалення і знешкодження відходів виробництва, що є джерелами небезпечних і шкідливих виробничих факторів;
- забезпечення пожежної і вибухової безпеки.

Для визначення необхідних засобів захисту потрібно керуватися вказівками відповідних НПАОП або стандартів ССБТ за видами виробничих процесів і групами виробничого обладнання, що використовуються у цих процесах. Перелік чинних нормативно-правових актів наведено в Реєстрі НПАОП.

Виробничі будівлі та споруди, залежно від вибраного архітектурно-будівельного та об'ємно-планувального вирішення, можуть впливати на формування умов праці: освітлення, шуму, мікроклімату, загазованості та запиленості повітряного середовища виробничих випромінювань. Крім того, неправильне кольорове або архітектурне вирішення інтер'єра призводить до несприятливого психологічного впливу на працівників.

У виробничому приміщенні умови праці залежать від таких факторів, як розташування технологічного обладнання, організація робочого місця, сировина, заготовки та готова продукція. У кожному конкретному випадку вимоги безпеки до виробничих приміщень і площадок формуються, виходячи з вимог чинних будівельних норм і правил.

Рівні небезпечних і шкідливих виробничих факторів на робочих місцях повинні відповідати вимогам нормативних документів безпеки за видами небезпечних і шкідливих факторів. Робочі місця повинні мати рівні

та показники освітленості, встановлені чинними Державними будівельними нормами України ДБН В.2.5-28–2006 «Природне і штучне освітлення».

Розташування виробничого обладнання, вихідних матеріалів, заготовок, напівфабрикатів, готової продукції та відходів виробництва у виробничих приміщеннях і на робочих місцях не повинно становити небезпеку для працівників. Відстані між одиницями обладнання, а також між обладнанням та стінами виробничих приміщень, будівель і споруд мають відповідати вимогам чинних норм технологічного проектування, будівельним нормам і правилам.

Зберігання вихідних матеріалів, заготовок, напівфабрикатів, готової продукції та відходів виробництва потребує системи заходів, що унеможливають виникнення небезпечних і шкідливих виробничих факторів; використання безпечних пристроїв для зберігання; механізації та автоматизації навантажувально-розвантажувальних робіт тощо.

Безпека виконання робіт включає застосування раціональних методів технології та організацію виробництва. Зокрема велику роль відіграє зміст праці, форма побудови трудових процесів, ступінь спеціалізації працівників, вибір режимів праці та відпочинку, дисципліна праці, психологічний клімат у колективі, організація санітарного та побутового забезпечення праці (відповідно до СНиП II-92–76).

У формуванні безпечних умов праці також велике значення має врахування медичних протипоказань до використання працівників в окремих технологічних процесах, а також навчання та інструктажі з безпечних методів проведення робіт.

До осіб, допущених до участі у виробничому процесі, висувають вимоги щодо відповідності їх фізичних, психофізичних і, в окремих випадках, антропометричних даних характеру роботи. Перевірка стану здоров'я працівників має проводитися і перед допуском їх до роботи, і періодично у процесі роботи згідно з чинними нормативами.

Періодичність контролю стану їх здоров'я визначають залежно від небезпечних і шкідливих факторів виробничого процесу у порядку, встановленому Міністерством охорони здоров'я.

Особи, яких допускають до участі у виробничому процесі, повинні мати професійну підготовку (у тому числі і з безпеки праці), що відповідає характеру робіт. Навчання працівників щодо охорони праці проводять на усіх підприємствах і в організаціях незалежно від характеру та ступеня небезпеки виробництва відповідно до Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 26.01.2005 р. № 15 (ДНАОП 0.00-4.12-05 (розділ 1)).

Основними напрямками забезпечення праці має бути комплексна механізація й автоматизація виробництва, що є передумовою докорінного поліпшення умов праці, зростання продуктивності праці та якості продукції, сприяє ліквідації відмінності між розумовою і фізичною працею. Однак за автоматизації необхідно враховувати психічні та фізіологічні чинники, тобто узгоджувати функції автоматичних пристроїв з діяльністю людини-оператора. Зокрема необхідно враховувати антропометричні дані останньої та її можливості до сприйняття інформації.

У автоматизованому виробництві необхідне також суворе виконання вимог безпеки під час ремонту й налагодження автоматичних машин і систем. Один із перспективних напрямів комплексної автоматизації виробничих процесів – використання промислових роботів. У цьому разі між людиною та машиною (технологічним обладнанням) з'являється проміжна ланка – промисловий робот, і система набуває такої структури: людина – промисловий робот – машина. Тобто людину виводять із сфери постійного безпосереднього контакту з виробничим обладнанням.

Характеристика нормативних документів щодо електробезпеки:

Нижче наводяться основні нормативні документи щодо електробезпеки,

чинні в Україні. Перелік цих документів для студентів ІФФ є додатковим. Він може бути використаним при дипломному проектуванні та подальшій роботі випускників.

Правила устройства электроустановок (ПУЭ–86). Дія ПУЭ–86 розповсюджується на ЕУ напругою до 500 кВ, що споруджуються чи реконструюються. ПУЭ–86 встановлюють загальні вимоги до будови ЕУ, каналізації (передачі) електроенергії, захисту і автоматики, розподільних пристроїв і підстанцій, електросилових установок, електричного освітлення та до електрообладнання спеціальних установок.

ДНАОП 0.00-1.32–01. *Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.* Цей документ затверджений Мінпраці України і включає деякі питання електричного освітлення та обладнання спеціальних установок зі змінами і доповненнями відповідно до чинних в Україні і міжнародних нормативних актів.

Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Гл. 1.7. Заземлення і захисні заходи безпеки. (ПУЕ–2006). Глава ПУЕ 1.7, запроваджена з 1 січня 2007 року. Вимоги глави поширюються на ЕУ змінного і постійного струмів, які проектуються, будуються або реконструюються і містять загальні вимоги до їх електробезпеки. Вимоги цієї глави можуть також застосовуватися до діючих ЕУ.

НПАОП 40.1-1.01–97 (ДНАОП 1.1.10-1.01–97). *Правила безпечної експлуатації електроустановок* – галузевий нормативний документ (енергетика). Дія його розповсюджується на ЕУ енергетичної галузі напругою до 500 кВ. Він встановлює вимоги щодо безпечної експлуатації ЕУ.

ДНАОП 0.00-1.21–98. *Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів*

– міжгалузевий нормативний акт, що визначає вимоги з безпечної експлуатації електроустановок споживачів, дія його розповсюджується на електроустановки напругою до 220 кВ.

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів – установлюють основні організаційні і технічні вимоги до експлуатації ЕУ споживачів і поширюються на діючі ЕУ напругою до 150 кВ включно.

ДНАОП 1.1.10-1.07–01. *Правила експлуатації електрозахисних засобів* – нормативний акт, що встановлює вимоги до необхідного переліку електрозахисних засобів залежно від конкретних умов, до зберігання, випробування, перевірки стану та користування електрозахисними засобами.

ДНАОП 0.00-8.19–99. *Порядок проведення опосвідчення електроустановок споживачів.*

ДНАОП 0.00-8.20–99. *Порядок проведення експертизи електроустановок споживачів.*

Розроблені на основі НПАОП (ДНАОП) галузеві нормативні акти щодо електробезпеки для енергетичної галузі та підприємств інших галузей

7.2.1. Міри захисту від прямого дотику в нормальному режимі роботи електроустановок

Безпечна експлуатація ЕУ забезпечується такими трьома методами:

- застосуванням стаціонарних конструктивних і схемних заходів захисту;
- використанням засобів захисту, у тому числі електрозахисних;
- дотриманням захисних заходів під час виконання робіт в ЕУ.

Конструктивні та схемні заходи захисту є невід’ємною частиною ЕУ і убезпечують її експлуатацію увесь час, доки ЕУ знаходиться під напругою. Згідно з ПУЕ–2006 їх поділяють на дві групи:

- заходи захисту від прямого дотику в нормальному режимі роботи ЕУ;
- заходи захисту в разі непрямого дотику у випадку одиничного пошкодження.

Засіб захисту (33) – це засіб, призначений для запобігання або зменшення вливу на працівника небезпечних і/або шкідливих виробничих факторів.

Засіб електрозахисний – це засіб, призначений для забезпечення електробезпеки (це інструменти і пристосування для безпечного виконання робіт в ЕУ: ізолювальні штанги, кліщі, покажчики напруги та ін.), а також діелектричний одяг та взуття (рукавички, ботики, калоші та ін.).

Захисні заходи під час виконання робіт в ЕУ – це комплекс вимог до працівників і до порядку виконання робіт для убезпечення експлуатації ЕУ.

Вимоги до мір захисту від прямого дотику в нормальному режимі роботи електроустановок полягають у наступному:

1. Струмовідні частини ЕУ не повинні бути доступні для випадкового прямого дотику до них, а доступні для дотику відкриті і сторонні провідні частини не повинні перебувати під напругою, що становить небезпеку ураження електричним струмом в нормальному режимі роботи і в разі пошкодження ізоляції.

2. Для запобігання ураженню електричним струмом у нормальному режимі роботи потрібно застосувати окремо або у поєднанні такі заходи захисту від прямого дотику:

- основна ізоляція струмовідних частин;
- огорожі та оболонки в ЕУ;
- бар'єри в ЕУ;
- розміщення струмовідних частин поза зоною досяжності;
- розміщення струмовідних частин на недосяжній висоті чи у недоступному місці;
- блокування безпеки в ЕУ.

3. Захист від прямого дотику не вимагається, якщо номінальна напруга ЕУ не перевищує:

- 25 В змінного або 60 В постійного струму в разі застосування

системи БННН (система безпечної наднизької напруги), якщо електричне обладнання експлуатується у сухих приміщеннях;

- 25 В змінного або 60 В постійного струму в разі застосування системи ЗННН (система захисної наднизької напруги), якщо обладнання перебуває у зоні дії зрівнювання потенціалів і експлуатується тільки у сухих приміщеннях;

- 6 В змінного або 15 В постійного струму в усіх інших випадках.

Електрична ізоляція в електроустановках

Ізоляція – це шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, за допомогою якого струмовідні частини відокремлюються одна від одної чи від інших конструктивних елементів обладнання. ЕУ передусім мають *робочу ізоляцію* – ізоляцію, яка забезпечує протікання струму потрібним шляхом і безпечну експлуатацію обладнання, тобто ізолює струмовідні частини від корпусів.

Щодо захисних заходів передусім враховують *основну ізоляцію*, тобто ізоляцію струмовідних частин в ЕУ напругою до 1 кВ, яка забезпечує захист від прямого дотику.

Вимоги до основної ізоляції:

- має повністю покривати струмовідні частини;
- повинна витримувати механічні, електричні, хімічні, теплові та інші впливи у процесі експлуатації;
- усунення ізоляції повинно бути можливим тільки через її руйнування;
- у разі забезпечення її повітряним проміжком (так звана зовнішня ізоляція) захист від прямого дотику або наближення до струмовідних частин на небезпечну відстань, у тому числі в ЕУ напругою понад 1 кВ, повинен здійснюватися за допомогою інших заходів (оболонки, огорожі, бар'єрів або розміщення поза зоною досяжності).

Захисна дія ізоляції полягає в обмеженні величини струму, що протікає через ізоляцію і, відповідно, через людину, яка доторкується до

ізоляції. Це відбувається через великий електричний опір ізоляції.

Контроль ізоляції підрозділяють на періодичний (виконують у певні проміжки часу); постійний (виконують впродовж усього періоду роботи ЕУ) і передпусковий (виконують перед пуском ЕУ).

Періодичний контроль поділяють на:

- заводський – після виготовлення ЕУ;
- приймально-здавальний – після монтажу, перед введенням в експлуатацію;
- післяремонтні випробування – після капітальних та поточних ремонтів;
- міжремонтні випробування – у терміни, встановлені відповідними правилами.

Постійний контроль ізоляції виконують у мережі з ізольованою нейтраллю напругою до 1 кВ.

Крім основної в ЕУ, застосовують такі види електричної ізоляції:

- *додаткова ізоляція* – це самостійна ізоляція, передбачена як додаткова до основної ізоляції в ЕУ напругою до 1 кВ і призначена для забезпечення захисту від ураження електричним струмом у разі ушкодження основної ізоляції;
- *подвійна ізоляція* – ізоляція в ЕУ напругою до 1кВ, яка складається з основної і додаткової ізоляції;
- *посилена ізоляція* – єдина система ізоляції струмовідних частин в ЕУ напругою до 1 кВ, яка забезпечує такий самий ступінь захисту від ураження електричним струмом, як і подвійна ізоляція.

Огорожі та оболонки в електроустановках

Огорожа – це частина, яка забезпечує захист від прямого дотику з боку можливого доступу.

Оболонка – огорожа внутрішніх частин обладнання, яка запобігає доступу до струмовідних частин з будь-якого напрямку, тобто оболонка повністю огороджує ЕУ.

Вимоги до огорож і оболонок:

- огорожі та оболонки повинні забезпечувати ступінь захисту IP2X згідно ГОСТ 14254 (а саме захист від проникнення у середину пальців чи предметів завдовжки більш як 80 мм або твердих тіл розміром більш як 12 мм);
- якщо для нормальної роботи обладнання необхідно мати збільшені зазори, потрібно вживати інші заходи для запобігання ненавмисному дотику до струмовідних частин;
- вхід за огорожу або розкриття оболонки повинні бути можливими тільки за допомогою спеціального ключа чи інструменту.

Огорожі виконують:

- суцільними (в ЕУ напругою до 1 кВ);
- сітчастими (в ЕУ напругою до і понад 1 кВ).

Огорожі і оболонки розмішують на певних відстанях від струмовідних частин у залежності від напруги (згідно з ПУЕ).

Бар'єри в електроустановках

Бар'єр – це частина, яка запобігає ненавмисному прямому дотику, але не перешкоджає навмисному прямому дотику. Це конструктивна частина, яка перегороджує вільний підхід до ЕУ.

Вимоги до бар'єрів:

- бар'єри повинні захищати від випадкового дотику до струмовідних частин в ЕУ напругою до 1 кВ або наближення на небезпечну відстань в ЕУ напругою понад 1 кВ;
- для зняття бар'єрів не потрібно застосовувати ключ або інструмент, але їх потрібно закріплювати так, щоб неможливо було усунути ненавмисне;
- бар'єри слід виготовляти з ізоляційного матеріалу.

Розміщення струмовідних частин поза зоною досяжності

Розміщення струмовідних частин на недосяжній висоті чи у недоступному місці стосується проводів повітряної лінії (ПЛ) чи шин та

обладнання на підстанціях. Висота розміщення проводів залежить від напруги лінії та місцевості, якою вона проходить. Наприклад, висота розміщення проводів ПЛ напругою до 110 кВ включно у населеній місцевості повинна бути не менш як 7 м над місцевістю (землею).

Розміщення струмовідних частин у недосяжному місці стосується кабельних ліній (КЛ) чи проводів у приміщенні. КЛ прокладають у землі у траншеях чи спорудах на глибині більш як 0,6 м. Проводку у приміщенні прокладають під шаром штукатурки або під підлогою.

Блокування безпеки в електроустановках

Блокування безпеки в ЕУ – це пристрої, які запобігають ураженню людини електричним струмом у разі помилкових дій. За принципом дії їх поділяють на:

Механічні у вигляді заскочок чи стопорів, які фіксують поворотну частину механізму у вимкненому стані; на підстанціях застосовують блок-замки, за допомогою яких блокують рухомі частини вимикача чи роз'єднувача; блок-замки одного приєднання повинні мати один секрет і додається один ключ; наприклад, щоб вимкнути роз'єднувач, треба спочатку вимкнути вимикач, вийняти ключ із замка на вимикачі (вимикач може бути увімкнений, якщо ключ знаходиться у його замку) і лише потім, вставивши ключ у замок роз'єднувача, вимкнути роз'єднувач.

Електромагнітні у вигляді електромагнітних замків – мають котушку з осердям, приводяться в дію після подачі оперативної напруги на відповідну розетку.

Електричні – блокування дверей – застосовують у випробних ЕУ, поєднуються з магнітним пускачем обладнання. ЕУ можна ввімкнути лише тоді, коли двері огорожі ЕУ замкнені. Якщо двері огорожі відкриті, то ввімкнути ЕУ неможливо, бо блокувальний контакт БК розмикає коло живлення котушки КМ магнітного пускача. Якщо ЕУ буде ввімкнена і в цей час відкрити двері огорожі, то ЕУ автоматично відключиться через знеструмлення котушки КМ. У разі повторного закриття дверей ЕУ

автоматично не ввімкнеться. Для запуску ЕУ у цьому разі слід знову натиснути кнопку Пуск.

Не рекомендовано блокувати з дверима силові контакти, тому що у разі відкриття дверей напруга з ЕУ вимкнеться, після випадкового їх закривання знову автоматично з'явиться на ЕУ.

Орієнтація в електроустановках

Методи орієнтації дають змогу працівникам орієнтуватися під час виконання робіт і застерігають їх від неправильних дій.

Методами орієнтації слугують:

- *Маркування частин електрообладнання* – призначено для розпізнавання належності і призначення обладнання. Виконується за допомогою умовних позначок: літеро-змістовних і цифрових (наприклад, вимикач – В і номер). Ці позначення наносять на корпуси ЕУ і вони повинні відповідати позначенням на схемах сполучень. Усі елементи одного приєднання повинні мати одне цифрове позначення, а апарати двох поєднань – подвійний номер.

Відповідне розташування і забарвлення струмовідних частин:

- для змінного струму: фаза L1 – верхня, ліва, найбільш віддалена, забарвлення жовте; фаза L2 – середня, забарвлення зелене; фаза L3 – нижня, права, забарвлення червоне; нейтраль N – ізольована – блакитне; заземлена – поздовжні смуги жовтого і зеленого кольору;

- для постійного струму: позитивний полюс L+, нижній, ближній, правий, забарвлення червоне; негативний полюс L–, середній, забарвлення синє; нейтраль M – верхня, ліва, дальня, блакитне.

- *Світлова сигналізація* – вказує на увімкнений чи вимкнений стан ЕУ за допомогою сигнальних ламп.

Захисне зрівнювання потенціалів – це досягнення рівності потенціалів провідних частин через електричне з'єднання їх між собою (рис. 7.3, а).

У разі виконання робіт із захисним зрівнюванням потенціалів на струмовідних частинах на місці робіт влаштовують ізольовану від землі

підставку. На верхній частині цієї підставки є робочий майданчик з металевими підлогою та огорожею. Працівник піднімається на цю площадку, а потім за допомогою ізолювальної штанги накладає перемичку між металоконструкцією площадки і проводом. Цим «переносить» потенціал проводу на металоконструкцію площадки, тобто виконує «зрівнювання» їх потенціалів. Після цього можна доторкатись рукою чи інструментом до проводу. Струм через людину проходити не буде, оскільки немає різниці потенціалів між проводом під напругою і площадкою.

Захисне вирівнювання потенціалів – це зниження напруги дотику і (або) кроку укладенням у землю чи у підлогу або на їх поверхні провідних частин, приєднаних до заземленого пристрою, або спеціальним покриттям землі чи підлоги.

Захисне (електричне) відділення (електричний поділ кіл) – це розподіл протяжної або розгалуженої електричної мережі з ізолюваною нейтраллю на окремі електрично не пов'язані одна з іншою ділянки за допомогою розділового трансформатора.

Розділовий трансформатор – це трансформатор, вторинні обмотки якого відділені від первинної обмотки за допомогою захисного електричного поділу кіл.

З погляду безпеки електричний поділ кіл «дає змогу» зменшити силу струму, що протікатиме через людину у разі однофазних прямих дотиків і силу струму замикання на землю (тобто «зменшити» напруги непрямого дотику до корпусу і кроку) на ділянці ЕМ поза трансформатором. Відбувається це завдяки тому, що розділові трансформатори здійснюють розділення електричної мережі з ізолюваною нейтраллю ДЖ на окремі ділянки, які мають більші опори витoku r' порівняно з опорами витoku усієї мережі r і менші власні ємності C' порівняно з ємністю усієї мережі.

Реально це схема живлення одного споживача від окремого

розділового трансформатора. У цьому разі нейтраль мережі з первинного боку може бути ізольованою від землі або заземленою, а з вторинного боку – обов’язково ізольованою від землі.

Наднизька (мала) напруга – це напруга між будь-якими провідниками або будь-яким провідником і землею, яка не перевищує 50 В змінного струму і 120 В постійного струму.

Заземлення – це виконання електричного з’єднання між визначеною точкою системи, установки чи обладнання і землею. З’єднання з землею може бути навмисним, ненавмисним і випадковим; а також постійним і тимчасовим.

Заземлення в ЕУ може бути: захисним (ЗЗ) і функціональним (робочим, ФЗ).

Захисне заземлення – це заземлення точки або точок системи, установки або обладнання з метою забезпечення електробезпеки. Найчастіше – це заземлення корпусів ЕУ.

Функціональне (робоче) заземлення – це заземлення точки або точок системи, установки або обладнання з метою, що не обов’язково пов’язана з електробезпекою. Найчастіше – це заземлення нейтральної або середньої точки ДЖ або заземлення з метою забезпечення електромагнітної сумісності.

Конструкція заземлювальних пристроїв.

Заземлювальний пристрій – це сукупність електрично з’єднаних між собою заземлювача і заземлювальних провідників, включаючи елементи їх з’єднання.

Заземлювач – це провідна частина (провідник) або сукупність з’єднаних між собою провідників, які перебувають в електричному контакті із землею безпосередньо або через провідне середовище (наприклад, бетон).

Заземлювачі поділяються на природні і штучні.

Природний заземлювач – це провідна частина, яка крім своїх

безпосередніх функцій одночасно може виконувати функції заземлювача. ПУЕ у першу чергу рекомендують застосовувати природні заземлювачі: металеві і залізобетонні конструкції будівель і споруд; підземні частини металевих і залізобетонних опор ПЛ; свинцеві оболонки кабелів, прокладених у землі; металеві трубопроводи, прокладені у землі; інші провідні частини, прокладені у землі.

Не допускається використовувати, як природні заземлювачі: алюмінієві оболонки кабелів, а також трубопроводи та ємкості горючих або вибухонебезпечних газів і сумішей. Не слід використовувати як природні заземлювачі: труби каналізації, центрального опалення; комунального водопроводу, а також залізобетонні конструкції з попередньо напруженою арматурою.

Штучний заземлювач – це заземлювач, який спеціально виконують з метою заземлення. Штучні заземлювачі можуть бути: з чорної сталі без або з покриттям, з нержавіючої сталі чи мідними. Зазвичай використовують штучні заземлювачі з чорної сталі без покриття.

Найчастіше штучні заземлювачі виконуються з вертикальних електродів, розміщених по периметру або вздовж сторони об'єкта і сполучених горизонтальним електродом. Для вертикальних електродів використовуються сталеві прутки діаметром 16 мм і більше або кутники з розмірами $32 \times 32 \times 4$ мм чи $40 \times 40 \times 5$ мм довжиною 3,5 м і більше. Для горизонтальних електродів застосовуються ті ж прутки діаметром 10 мм або сталева штаба $4 \times 40 \text{ мм}^2$.

Всі сполучення у схемі заземлень мають виконуватись нероз'ємними (за допомогою зварювання). Виняток являє приєднання заземлювальних провідників до корпусів ЕУ, де допускаються болтові з'єднання.

Заземлення виносні і контурні. За взаємним розташуванням заземлювача і заземлювального обладнання заземлення поділяються на виносні і контурні.

Заземлювачі виносних заземлень розміщують на деякій відстані від

заземлювального обладнання часто у зоні нульового потенціалу. Заземлювачі контурних заземлень розміщуються поряд із заземлювальним обладнанням або під територією площадки, на якій розташоване це обладнання.

Виносні заземлення є ефективним заходом захисту для ЕУ з невеликими струмами замикання на землю, і можуть виконуватись для ЕУ напругою до 1 кВ і понад 1 кВ у мережах з ізолюваною чи компенсованою нейтраллю ДЖ.

Поза територією майданчика про напругу дотику не може бути мови, бо там немає ЕУ.

Напруга кроку матиме найбільше значення, якщо людина однією ногою розміщується над електродом заземлення, а другою – у напрямі середини між електродами – точки АА і буде дорівнювати нулю, якщо людина розміщується симетрично відносно електрода заземлення чи середини між електродами – точки ББ і ВВ.

За територією майданчика крива розподілу потенціалів проходить достатньо круто, тому тут будуть великі напруги кроку. Для зменшення $U_{кр}$ на території, що прилягає до майданчика, уперек поздовжньої осі проходів та проїздів на деякій глибині прокладаються горизонтальні штаби, не сполучені між собою і основним заземлювачем. Ці штаби дозволяють "рознести" потенціали на більшу відстань і круту криву розподілу потенціалів "замінити" більш пологою ламаною кривою, у результаті чого напруга кроку зменшується.

ДОДАТОК В.
ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____