

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА АЕРОКОСМІЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри АКСУ

_____ Тачиніна О. М.
«_____» _____ 2021 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ЗДОБУВАЧА ОС «БАКАЛАВР»
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 151 «АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ »

Тема: Цифровий регулятор для системи керування роботом-маніпулятором

Виконавець: _____ Бусленко Максим Олександрович

Керівник: _____ завідувач кафедри АКСУ, д.т.н. с.н.с.,
Тачиніна Олена Миколаївна

Нормоконтролер: _____ Дивнич Микола Полікарпович

Київ 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігацій, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управління

Напрямок 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКСУ

_____ Тачиніна О.М.

« _____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи (проекту)

Бусленко Максима Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема дипломної роботи (проекту)

«Цифровий регулятор для системи керування роботом-маніпулятором» затверджена наказом ректора від «12»квітня 2021 р. №584/ст

2. Термін виконання роботи (проекту): з 17.05.21 по 15.06.2021

3. Вхідні дані до роботи (проекту): Максимальне перерегулювання не більше 10%, тривалість перехідного процесу не більше 5-7с, час наростання не більше 3-5с.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ, Аналіз функціонування та доцільності використання методів синтезу регуляторів, Розробка цифрової системи автоматичного керування, Імітаційне моделювання роботи системи керування, Висновки.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: графіки перехідних процесів

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Визначення теми та початок написання вступу	13.05.2021– 20.05.2021	
2	Розділ 1. Аналіз функціонування та доцільності використання методів синтезу регуляторів	21.05.2021	
3	Розділ 2. Розробка цифрової системи автоматичного керування	23.05.2021	
4	Розділ 3. Імітаційне моделювання роботи системи керування	25.05.2021	
5	Висновки	29.05.2021	
6	Дооформлення та захист дипломної роботи	08.06.2021– 16.06.2021	

7. Дата видачі завдання: “13” травня 2021 р.

Керівник дипломної роботи (проекту) _____ Тачиніна О.М.
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Бусленко М.О.
(підпис випускника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Цифровий регулятор для системи керування роботом-маніпулятором» : сторінок 39, рисунків 13, таблиць 2, використаних джерел 9, додатків 6.

Об'єкт дослідження: процес керування роботом-маніпулятором.

Предмет дослідження: система керування роботом-маніпулятором.

Мета роботи: синтез цифрового регулятора для системи керування роботом-маніпулятором.

Практична частина: синтез регулятора різними методами та імітаційне моделювання роботи системи керування.

ЦИФРОВИЙ РЕГУЛЯТОР, СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, РОБОТ-МАНІПУЛЯТОР, СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА, МЕТОД БАЖАНИХ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ СИНТЕЗУ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ НА ДОСЛІДЖЕННЯ	8
1.1. Практичне застосування робота-маніпулятора в авіаційній галузі.....	8
1.2. Основи роботи та класифікації робототехнічних систем	10
1.3. Методи синтезу регуляторів для системи керування роботом- маніпулятором.....	15
1.4. Формулювання основної задачі проекту.....	22
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ.....	23
2.1. Метод побудови бажаних передавальних функцій.....	23
2.2. Приклад синтезу цифрового регулятора завдяки методу бажаних передавальних функцій із використанням функцій системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink.....	27
РОЗДІЛ 3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ.....	33
3.1. Приклади різних методів регулювання та їх порівняння	33
ВИСНОВКИ.....	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	39

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РМ – Робот-маніпулятор;

ПІД – Пропорційно-інтегрально-диференційний;

ЛАЧХ – Логарифмічно-амплітудно-частотна характеристика;

ЦСАК – Цифрова система автоматичного керування;

ОК – Об'єкт керування;

ДОК – Дискретний об'єкт керування;

ЦОМ – Цифрова обчислювальна машина;

ПФ – Передавальна функція;

ДПС – Двигун постійного струму;

ЦР – Цифровий регулятор;

ВСТУП

Прогрес сучасного світу на даний момент ставить дуже великі вимоги до виробництва та промисловості. Людина вже не придатна до виконання об'єму роботи та цілей сучасного характеру. Тому виникає потреба у автоматизації все більшої кількості етапів виробництва. Для цього необхідні систему керування які є основою при автоматизації будь якого технологічного процесу. Тому їх вдосконалення та розвиток є актуальною задачею.

Система керування – це систематизований набір певних засобів впливу на підконтрольний об'єкт для досягнення цим об'єктом певної мети.

В основі цієї системи лежить регулятор - прилад, основним завданням якого є спостереження за станом керуемого об'єкта та відтворення для нього керуючих сигналів. Регулятор дає можливість збільшити швидкодію та точність, але лише при правильному налаштуванні. Через це, постає необхідність у вирішенні задачі налаштування параметрів регулятора.

На даний момент відома велика кількість метод синтезу регулятора, але всі вони мають свої недоліки. Одні є занадто важкі та довгі, інші не надають бажаної точності.

Велика кількість методів ставить задачу пошуку найкращого з них. У дипломному проекті проведено практичний порівняльний аналіз найбільш розповсюджених методів та запропонований метод побудови бажаних передавальних функцій, завдяки якому можна звести до нуля помилку регулювання при дії зовнішніх та внутрішніх збурень, мінімізувати перерегулювання та коливальність перехідного процесу.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ СИНТЕЗУ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ НА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Практичне застосування робота-маніпулятора в авіаційній галузі

На даний момент, роботи-маніпулятори(РМ) вже набули великого значення та великої кількості областей застосування в авіаційній галузі. Вони використовуються як на виробництві літальних суден, так і грають велику роль як функціональна частина дослідницьких апаратів.

Приклади використання на виробництві:

- Пайка і зварювання
- Обробка матеріалів
- Збір та розбирання
- Фрезерування і шліфування

Приклади використання у дослідницьких апаратах:

- Система ERA - РМ призначений для складальних робіт, підтримки космонавтів під час позакорабельної діяльності та обслуговування орбітального комплексу.
- Dextre (Canadarm2) - слугує для розвантаження вантажних апаратів які стикаються з космічною станцією.

Можна на прикладах прослідкувати актуальність даної технології у сучасному світі.

Розглянемо більш детально робота, основною сферою застосування якого є авіаційна освіта. А саме універсальний авіатренажер. Це нова технологія в основу якої лягло поєднання тренажеру літака DA-42, який був створений фахівцями Німецького аерокосмічного центру DLR та промислового РМ KUKA, німецької компанії KUKA Roboter.

					НАУ 21 10 58 000 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розроб.</i>		Бусленко М.О.			АНАЛІЗ МЕТОДІВ СИНТЕЗУ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ- МАНІПУЛЯТОРОМ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ НА ДОСЛІДЖЕННЯ	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Гачиніна О.М.					8	39
<i>Реценз.</i>						ФАЕТ- 401 гр. 8		
<i>Н. Контр.</i>		Дивнич М.П.						
<i>Затверд.</i>		Гачиніна О.М.						

Переваги цієї конструкції полягають у тому, що вона дозволяє перевершити класичні пілотажні стенди за діапазоном лінійних та кутових переміщень (3,2-4,2 м проти 0,8-1,3 м і $\pm 180^\circ$ проти $\pm 25^\circ$) і в кінцевому підсумку достовірніше імітувати перевантаження, що діють на льотчика під час польоту. Вона відрізняється багатофункціональністю – за кілька годин вона здатна повністю переключити режим з кабіни магістрального літака в кабінку винищувача або вертольота. А також тим, що надає можливість більш реалістично моделювати складні ситуації: дозаправка в повітрі, посадка на палубу авіаносного корабля, груповий пілотаж, режими складного просторового положення літака транспортної категорії, а також висіння і кранові операції вертольота.

Основний принцип побудови даної конструкції полягає у встановленні на рухому частину робота, яка зазвичай переміщує невеликі об'єкти, універсальної кабіни пілота, яка забезпечена системою візуалізації, імітаторами кабінного обладнання і змінними (літак / вертоліт) важелями управління.

Найбільша проблема сучасних авіотренажерів полягає у тому, що вони обмежені по геометрії системи рухомості. Даний прорив наближує науку до вирішення цієї проблеми.

З наведених прикладів можна зрозуміти важливість не тільки самої технології РМ, а в цілому важливість сфер у якому він застосовується для всього людства. РМ виконує велику кількість серйозних завдань від яких часто залежить людське життя. Тому точність і правильність виконання поставлених перед ним задач, стоїть на першому місці. Це у наступну чергу говорить про те, що задача знаходження найкращого методу по синтезу регулятора є першочерговою, так як вона й відповідає за ці важливі якості.

1.2. Основи роботи та класифікації робототехнічних систем

Робототехніка – це наука яка вивчає способи розробки та використання у житті людини автоматизованих технологічних систем.

Загалом це обрання якоїсь певної людської дії, доведення її до ідеалу, шляхом створення пристрою який має кращі характеристики ніж людське тіло й доведення цієї дії до автоматизму. Це дає змогу виконувати складні, а частіше навіть неможливі завдання. Що робить цю сферу необхідною та актуальною. Основний принцип цієї науки полягає у тому щоб побудувати зв'язок між програмною та механічною складовою прилада.

Першочергова класифікація роботів полягає у поділу їх за основним принципом дії, таким як рух робота у просторі(мобільний робот) та статичне виконання конкретного виду роботи(маніпуляційний робот).

Маніпуляційний робот – автоматична машина, яка складається з маніпулятора та пристрою програмного управління завдяки якому відбувається контроль й керування самого маніпулятора. Цих роботів поділяють за функціональним оснащенням маніпулятора яке відповідає сфері використання цього робота (гірна справа, металургія, ядерна техніка тощо)

Мобільний робот – автоматична машина, яка складається з рухомого шасі та автоматично керованими приладами. Основна задача цих роботів пересування, за способами якого їх й розрізняють. Цей параметр на пряму залежить від середовища, тому є робототехнічні системи плаваючі, літаючі та наземні (повзучі, крокуючі, колісні тощо).

Сучасний світ вимагає від робототехнічних систем поєднання у собі можливостей обох класів. Тому краще проводити класифікацію за класом та специфікою виконуваних задач. Звідки впливає поділ роботів на виробничі та дослідницькі.

Виробничі роботи – необхідні для виконання важкої або навіть неможливої роботи людини. Завдяки ним можна повністю автоматизувати майже будь-який

виробничий процес. Вони здатні на виконання майже будь-яких дій, таких як : контактне зварювання, фарбування, пакування, завантажувально-навантажувальних робіт, транспортування виробів тощо.

Дослідницькі роботи – роботи основним завданням яких є збір інформації про об'єкт дослідження. Мають велику актуальність у світі, так як дають змогу вивчати ті середовища у яких людина просто не може існувати.

Ми будемо розглядати саме промислових роботів так як їх необхідність можна прослідкувати майже у будь-якій сфері діяльності людини.

Промисловий робот – це робототехнічна система яку використовують для здійснення функцій управління, переміщення і руху в різних виробничих процесах.

Їх переваги та необхідність полягають у тому, що вони можуть працювати цілодобово без будь-якої участі людини, так як їм необхідна лише завчасно створена програма з уже прописаним переліком дій. Вони можуть повністю замінити повний цикл виробництва, та забезпечує продуктивність і точність на рівні вищому від людського. Також практично повністю виключаються помилки в виробництві, які так властиві людям.

Є декілька основних видів промислових роботів.

1) Програмні: найпростіший різновид роботів, які мають автоматичне керування. Доволі розповсюджені у наслідок невеликої вартості. Не мають сенсорів так як всі дії проводяться за циклічною програмою, яка заздалегідь закладається в блок пам'яті.

2) Адаптивні: Такі роботи мають сенсори та ряд супутніх програм. Здатні аналізувати навколишнє середовище та у результаті отриманих даних приймати рішення, як йому діяти далі.

3) Здатні до навчання: Вчаться на власних помилках та виконують дії відповідно до попереднього навчання.

4) Інтелектуальні: Наділені початковою стадією штучного інтелекту. Поєднують у собі якості адаптації та навчання. Вони створюють

віртуальний простір, в якому можуть орієнтуватися і приймати рішення про подальші дії.

5) Командні: Це РМ, які дистанційно керуються оператором. Вони лише частково роботи так як людина подає кожну команду яку повинен виконати маніпулятор.

6) Копіюючі: Копіюють дії оператора(людини) у конкретний момент часу .

7) Напівавтоматичні: Частково підконтрольна людині. Оператор задає лише напрямок дії, а система вже сама генерує спосіб її реалізації.

8) Автоматизовані: Роботи у яких чергуються режими автоматичного процесу з біотехнічним.

9) Супервизорні: Ці роботи, виконують роботу автоматично за заданим циклом, але переміщення від одного етапу до наступного здійснюється через команди оператора.

10) Діалогові: Роботи різної дії, які можуть взаємодіяти з оператором, застосовуючи мову певного рівня. Наприклад, за допомогою команд голосом.

Пристрої які використовує РМ у своїй роботі є велика кількість різновидів. Вони у першу чергу залежать від завдань які стоять перед роботом. Ми розглянемо найбільш розповсюджений на даний момент вид, роботизований маніпулятор.

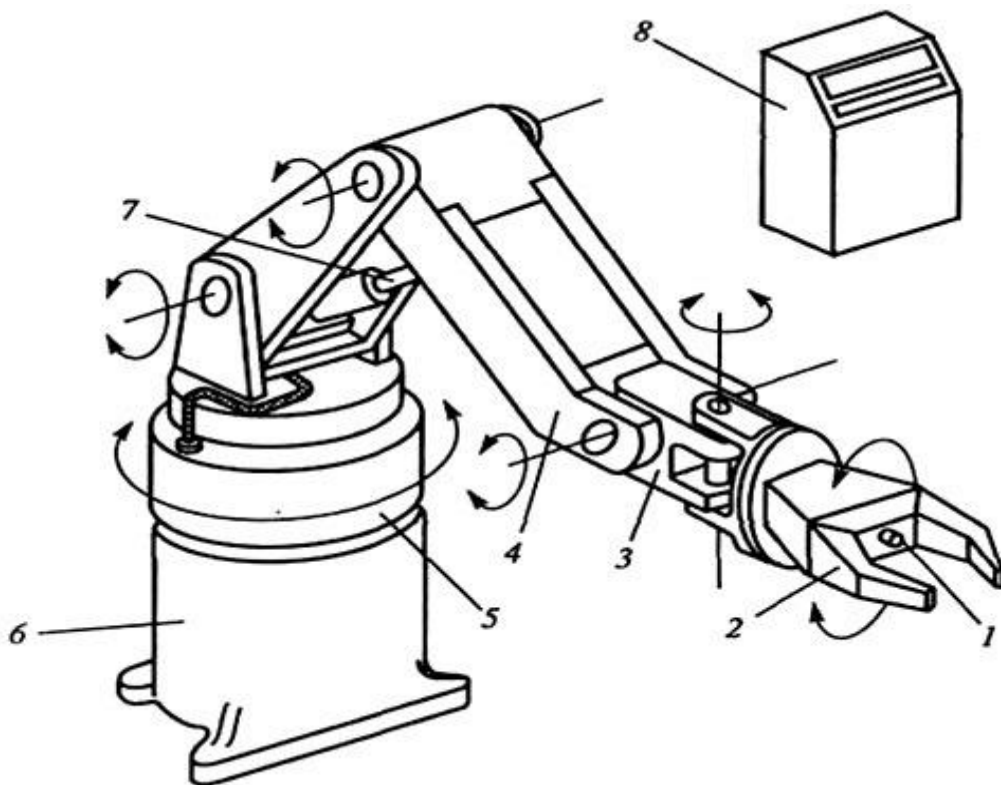


Рис 1.1. Роботизований маніпулятор

- 1-Датчик зворотного зв'язку; 2-Захватний пристрій; 3-Кисть маніпулятора; 4-Рука маніпулятора; 5-Колонна; 6-Несуча конструкція; 7-Привід руки маніпулятора; 8-Блок керування з пультом;

Маніпулятор стандартного вигляду виконаний з семи сегментів, які з'єднані за допомогою шести суглобів. Сегмент виконаний з металевого корпусу і проводів. У кожному сегменті присутні крокові двигуни, які змушують суглоби рухатися.

По такому самому принципу як й людська рука, маніпулятор також переміщує кінцевий ефектор з одного місця на інше. Також маніпулятори мають вбудовані датчики тиску, що дозволяє їм контролювати силу й не ламати крихкі предмети.

Інша частина РМ ,це система керування.

Система керування – це сукупність засобів по збору інформації про об'єкт керування(ОК) та впливів на його дії задля отримання бажаних результатів.

Є три основних режими керування:

1. Режим ручного управління
2. Режим управління в заданій системі координат
3. Режим формування і подальшого автоматичного відтворення траєкторії руху маніпулятора

Отже, промисловий робот складається з виконавчого пристрою(маніпулятор) й програмного керування.

Конструкція маніпулятора:

1. Несуча конструкція - служать для розміщення всіх пристроїв і агрегатів робота, а також для забезпечення необхідної міцності і жорсткості маніпулятора. Можуть бути у вигляді підстав, корпусів, стійок, рам, візків, порталів.

2. Виконавчий механізм - це сукупність рухливо з'єднаних ланок маніпулятора, призначених для впливу на об'єкт маніпулювання.

3. Робочий орган - складова частина виконавчого механізму маніпулятора для виконання технологічних операцій. Приклад: складальний інструмент, захватний пристрій.

4. Захватний пристрій - кінцевий вузол маніпулятора, що відповідає за захват та утримання ОК.

5. Привід - призначений для перетворення енергії, що надходить, у механічний рух ланок виконавчого механізму, відповідно до сигналів, які поступають з пристрою управління.

6. Пристрій пересування - слугує для переміщення маніпулятора або промислового робота в цілому, в потрібне місце робочого простору.

У маніпулятора є дві основні характеристики за якими визначається їх функціональність та кількість можливостей:

- Кількість осей
- Кількість ступенів свободи

Пристрій керування РМ – складається з системи управління, інформаційно-виміральної системи і системи зв'язку. Зазвичай включає: пристрій,

обчислювальний пристрій, блоки управління приводами маніпулятора, пульт управління.

Склад пристрою керування:

1. Система управління - призначена для формування та видачі керуючих сигналів виконавчому пристрою відповідно до програми.
2. Інформаційно - вимірювальна система - призначена для збору і первинної обробки інформації про стан його елементів і механізмів, а також зовнішнього середовища.
3. Система зв'язку - забезпечує обмін інформацією між РМ, оператором і технологічним обладнанням з метою формулювання завдань, контролю над функціонуванням систем РМ, діагностики тощо.

Цифровий регулятор(ЦР) є найрозповсюдженим пристроєм керування яке стежить за роботою ОК і виробляє для нього керуючі сигнали.

Він є важливою складовою системи керування (структурна схема цифрової системи автоматичного керування(ЦСАК) приведена в додатку А), робота з регулятором є важливою, так як вона визначає якість та точність виконання завдань.

1.3. Методи синтезу регуляторів для системи керування роботом

В системах керування одним із основних елементів є ЦР. Регулятор - це пристрій, основною роботою якого є слідкування за роботою ОК і створення для нього керуючих сигналів, за для регулювання процесу його функціонування. Регулятор може бути представлений як окремий пристрій або у вигляді прикладного пакета в основній програмі керуючого пристрою.

Розрізняють види регулятора:

- **P** (П) - «пропорційний»
- **I** (І) – «інтегральний»
- **D** (Д) – «дифференціюючий»

- **PI** (PI) – «пропорційно інтегральний»
- **PD** (PD) – «пропорційно дифференціюючий»
- **PID**(PID) – «пропорційно інтегрально дифференціюючий»

P (P) регулятор. Регулятор виробляє керуючий вплив на ОК пропорційно величині помилки. Його переваги це швидкодія та висока стійкість процесу регулювання. Недоліки у низькій якості регулювання.

I (I) регулятор. Керуючий вплив пропорційний інтегралу від помилки. Перевага у відсутності статичної помилки, а недолік у поганій стійкості та високому часі регулювання.

D (D) регулятор. Створює керуючий вплив тільки при зміні регульованої величини. Має високу швидкодію, але не стабільний у роботі.

PI (PI) регулятор. Комбінація P і I регуляторів. Має переваги обох. Від P - хороша стійкість, від I - відсутність статичної помилки.

PD (PD) регулятор. Комбінація P і D регуляторів. Має переваги обох. Від P – хороша стійкість, від D - підвищену швидкодію, але зберігається статична помилка, як у P регулятора.

Одним із самих використовуваних є PID регулятор. PID (від англ. P-proportional, I-integral, D-derivative) регулятором називається - пристрій, який має своє застосування в контурах управління з ланкою зворотного зв'язку. Регулятори даного типу використовують для формування сигналу управління в ЦСАК, де необхідно досягти високої якості і точності перехідних процесів.

Сигнал PID-регулятора виходить в результаті додавання трьох складових: перша – пропорційна величині сигналу неузгодженості, друга – інтегралу сигналу неузгодженості, третя - похідної сигналу неузгодженості. Якщо якийсь із компонентів не включений, то регулятор буде вже не PID, а просто пропорційним, пропорційно-дифференціюючим або пропорційно-інтегруючим.

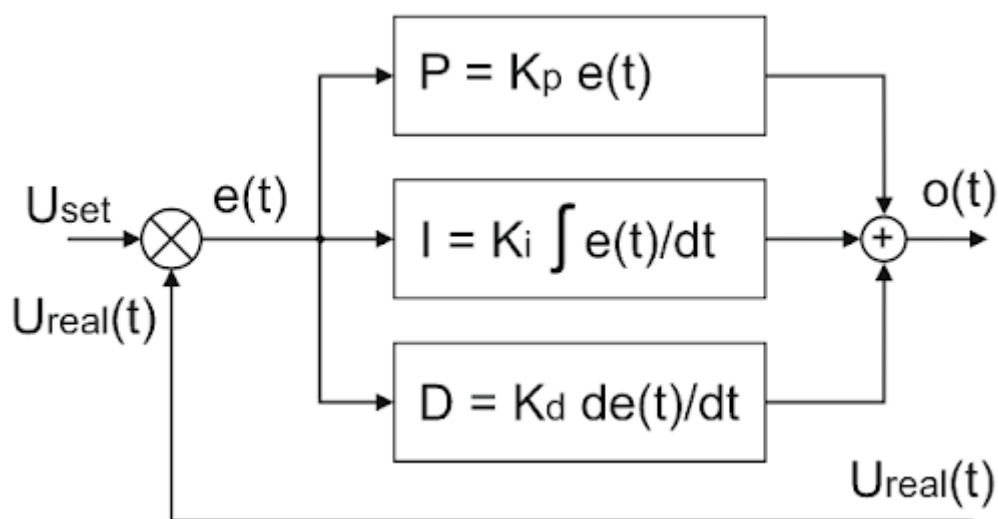


Рис. 1.2. Структурна схема ПІД-регулятора

Перший компонент – пропорційний ($P(t) = K_p * e(t)$)

Пропорційна складова надає вихідний сигнал. Сигнал цей необхідний за для протидії поточному відхиленню вхідної величини від встановленого значення. Чим більше відхилення - тим більше і сигнал. Якщо залишити тільки пропорційну складову, то значення величини ніколи не стабілізується на правильному значенні. Існує статична помилка, яка дорівнює такому значенню відхилення регульованої величини, що вихідний сигнал стабілізується на цьому значенні.

Другий компонент – інтегруючий ($I(t) = K_i \int e(t) dt$)

Основна функція інтегруючого компоненту як раз виключення статичної помилки, завдяки тому, що регулятор згодом враховує статичну похибка. За відсутності збурень, величина буде стабілізована на необхідному значенні, коли пропорційна складова дорівнюватиме нулю, та точність виходу буде забезпечена інтегруючою складовою. Але дана складова теж може породити осциляції поруч з точкою позиціонування, якщо не правильно підібраний коефіцієнт.

Третій компонент – диференціюючий ($D(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$)

Він необхідний для протидії відхиленням (викликаним зовнішніми впливами або затримками) від правильного положення, прогнозованого в майбутньому.

Теорія функціонування ПІД-регулятора

ПІД-регулятори необхідні для підтримки заданого значення x_0 - однієї величини, через зміну значення u - іншої величини. Є задане значення x_0 , і є різниця чи неузгодженість $e = x_0 - x$. Якщо система лінійна і стаціонарна, то для завдання u справедлива наступна формула:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}$$

На практиці в ПІД-регуляторах використовують іншу формулу, де коефіцієнт посилення застосований відразу до всіх компонентів:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + K_{ip} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_{dp} \frac{de}{dt} \right)$$

Тобто основна задача полягає в усуненні різниці ($e = x_0 - x$) шляхом знаходження підсилюючих коефіцієнтів K_p , K_i , K_d та зведення значення $e(t)$ до нуля.

Існує два основних підходи до налаштування регулятора.

Перший - синтез регулятора, тобто обчислення параметрів регулятора на підставі моделі системи. Другий - ручний підбір коефіцієнтів, тобто метод проб і помилок. Розглянемо основні методи.

Метод Зіглера-Нікольса

Даний метод заснований на використанні запасів стійкості. Процедура настройки починається з експериментального дослідження системи, яка складається з П-регулятора і заданого об'єкта регулювання. Коефіцієнт передачі П-регулятора збільшується до тих пір, поки на виході системи не з'являться коливання з постійною амплітудою коливань, тобто система не виявиться на

межі стійкості. Фіксується і позначається як k_p значення коефіцієнта передачі регулятора, при котрому система знаходиться на грані стійкості. Вимірюється період T - сталих в системі коливань. Значення параметрів регулятора обраного типу розраховуються за формулами, наведеними в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри типових регуляторів

	k_p	k_i	k_d
П-регулятор	$0.50 * k_p$		
ПІ-регулятор	$0.45 * k_p$	$0.54 * (k_p / T)$	
ПІД-регулятор	$0.60 * k_p$	$1.2 * (k_p / T)$	$0.075 * k_p * T$

Переваги:

- Легкість налаштування регулятора
- Швидкість налаштування
- Відсутність витрат

Недоліки:

- Необхідність виводити систему на межу стійкості
- Не універсальний

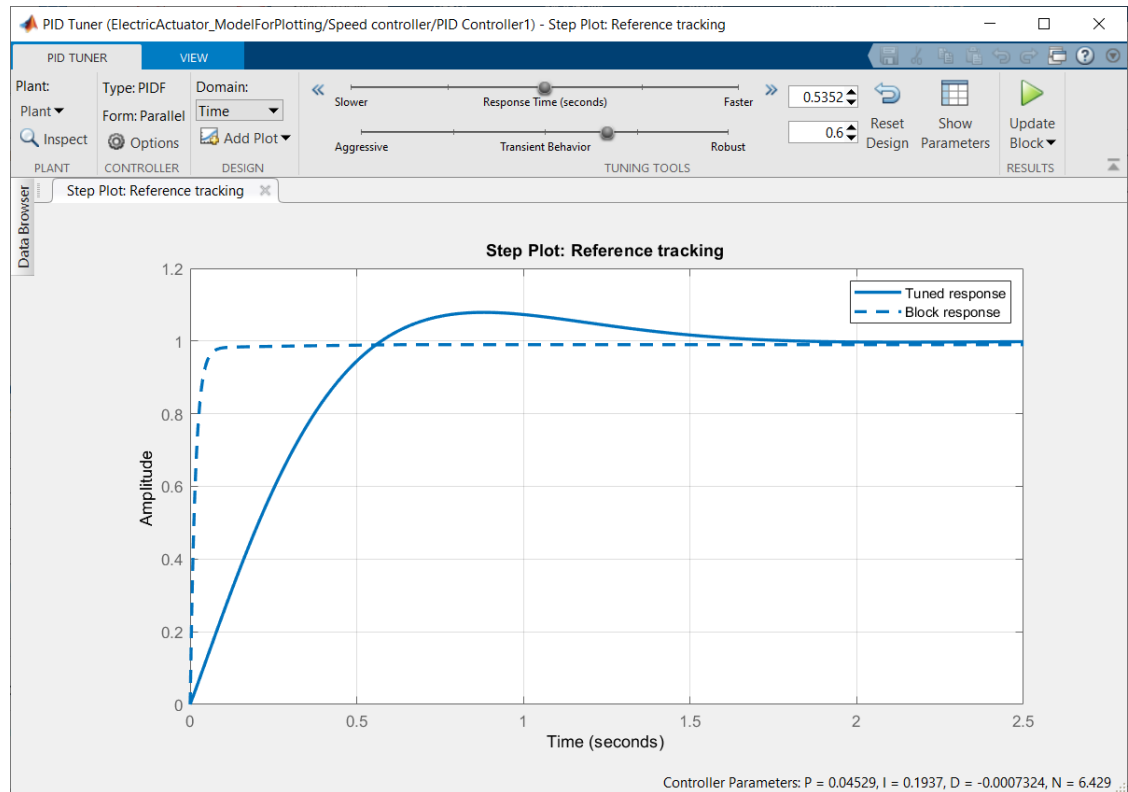
Метод Pid Tuner

Налаштувати параметри регулятора можна також у програмі MATLAB за допомогою інструменту PID Tuner

1. Даний додаток запускається натисканням на кнопку Tune, на панелі Automated tuning.
2. Слід задати допустимий діапазон напруги, оскільки однією з вимог є обмеження його вихідних координат.
3. Робота блоку регулятора передбачає використання методів, спрямованих на боротьбу з інтегральним насиченням. Для цього реалізовані два методу: back-calculation і clamping. Записуємо значення

в поля Upper limit і Lower limit, а також вписуємо метод у anti-windup Method.

4. Прийнявши всі зміни натисненням кнопки Apply, повертаємося у вкладку Main та через кнопку Tune, відкриваємо нове вікно додатка PIDTuner.



- 5.

Рис. 1.3. Графічне вікно налаштувань Pid Tuner.

6. Можемо побачити відображення двох перехідних процесів: при поточних параметрах регулятора, і при значеннях, підібраних автоматично. Натиснувши на кнопку Show Parameters, можна подивитися нові значення параметрів. При натисканні на кнопку з'являться дві таблиці: підібрані параметри регулятора (Controller Parameters) і вироблені оцінки характеристик перехідного процесу при підібраних параметрах (Performance and Robustness).
7. Налаштування завершується натисканням на кнопку із зеленим трикутником, розташованої праворуч від кнопки Show Parameters, після

чого нові значення параметрів автоматично зміняться в відповідних полях у вікні налаштування параметрів блоку PID Controller.

Переваги:

- Простота налаштування.
- Висока точність налаштування.

Недоліки:

- Необхідна висока потужність ЕОМ
- Наявність програми MATLAB

Метод Чіна – Хронеса – Ресквіка

Наступний метод є більш просунутою версією метода Зіглера-Нікольса. Він дозволяє отримати більший запас стійкості, скоротити час налаштування, але у такому випадку зменшується коефіцієнт передачі. Налаштування вимагають будівництва диференціальної складової.

Метод полягає у використанні критеріїв максимальної швидкості наростання при відсутності перерегулювання або при наявності не більше ніж 20 процентного перерегулювання. Коефіцієнти знаходяться за наступними формулами. Де τ - час запізнення, T_0 – постійний час об'єкту, $K_0 = \frac{\Delta x}{\Delta y}$ - коефіцієнт передачі об'єкта.

Таблиця 2

Формули для знаходження коефіцієнтів регулятора методом

Коефіцієнт	Без перерегулювання	20% перерегулювання
K_p	$0,95 \cdot \frac{T_0}{\tau \cdot K_0}$	$1,2 \cdot \frac{T_0}{\tau \cdot K_0}$
K_i	$2,4 \cdot \tau$	$2 \cdot \tau$
K_d	$0,42 \cdot \tau$	$0,42 \cdot \tau$

Переваги:

- Просте визначення налаштувань
- Короткий час налаштування

Недоліки:

- Неповна інформація про запас стійкості, за рахунок чого погіршується надійність роботи регулятора
- Наближене налаштування

1.4. Формулювання основної задачі проекту

На даний момент вміння працювати з регулятором та його налаштовувати є актуальною задачею, так як від цього залежить точність роботи системи керування РМ, та здатність швидко реагувати на відхилення у роботі сигналу.

Кожен з існуючих методів має свої недоліки та переваги. Деякі мають велику швидкодію, але жертвують за це високим перерегулюванням. Наступні, повна їм протилежність, перерегулювання відсутнє, але їм необхідної швидкодії вони не мають.

Тому знаходження найбільш універсального методу, який буде включати у собі найбільшу кількість переваг інших методів є актуальною задачею. У даній роботі буде розглянутий метод бажаних передавальних функцій як доступний та достатньо точний варіант.

Цей метод дозволяє звести до нуля помилку регулювання під час дії зовнішніх та внутрішніх збурень, а також мінімізувати перерегулювання та коливальність перехідного процесу

Задля кращого розбору цієї задачі у даній роботі буде проведено розробку ЦСАК роботом, а саме розробку ЦР методом бажаних передавальних функцій.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ

2.1. Метод побудови бажаних передавальних функцій

Метод бажаних передавальних функцій(ПФ) має три основні етапи своєї реалізації:

1. Побудова дискретної передавальної функції ЦР та поліноміального рівняння її синтезу у загальній формі.
2. Відповідність умовам фізичної реалізуємості передавальної функції ЦР.
3. Побудова дискретної передавальної функції ЦР та поліноміального рівняння її синтезу у формі, що забезпечують фізичну реалізуємість цифрового алгоритму та задану якість процесу керування.

ЕТАП 1

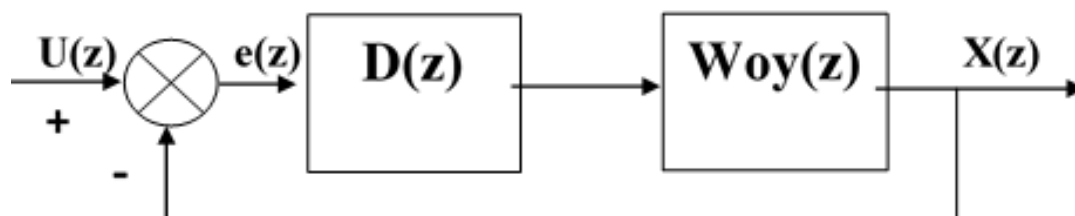


Рис. 2.1. Узагальнена структура внутрішнього контуру ЦСАК.

$D(z)$ – це дискретна ПФ регулятора.

$Wou(z)$ – ПФ дискретного об'єкту управління.

					НАУ 21 10 58 000 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розроб.</i>		Бусленко М.О.			Розробка цифрової системи автоматичного керування роботом-маніпулятором	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Гачиніна О.М.					23	39
<i>Реценз.</i>						ФАЕТ- 401 гр. ²³		
<i>Н. Контр.</i>		Дивнич М.П.						
<i>Затверд.</i>		Гачиніна О.М.						

Синтез за допомогою бажаних ПФ базується на знаходженні структури і параметрів корегуючого пристрою. Ця задача вирішується через знаходження різниці вихідної і бажаної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ). Якість системи буде залежити від низькочастотної області її ЛАЧХ. При синтезі методом бажаних ПФ вважатимемо, що її незмінна частина обрана.

$$H_x(z) = \frac{D(z) \cdot W(z)}{1 + D(z) \cdot W(z)}$$

$D(z)$, $W_{00}(z)$ – дискретні передавальні функції регулятора та ОК

Припустимо що:

-Дискретна ПФ обрана та дорівнює бажаній $H_x(z) = H_B(z)$

-Передавальна функція ОК відома з точністю до номінальних значень

$$W = W_{n_0}(z) = \frac{P_0(z)}{Q_0(z)} z^{-s_n}$$

1) Враховуючи дані вирази обчислимо ПФ регулятора

$$D(z) = \frac{1}{W_{n_0}(z)} \cdot \frac{H_B(z)}{1 - H_B(z)} = \frac{Q_0(z)}{P_0(z)} \cdot z^{s_n} \cdot \frac{H_B(z)}{1 - H_B(z)}$$

2) Виконаємо факторизацію поліномів $Q_0(z)$ і $P_0(z)$

$$D(z) = \frac{1}{W_{n_0}(z)} \cdot \frac{H_B(z)}{1 - H_B(z)} = \frac{Q_0(z)}{P_0(z)} \cdot z^{s_{0y}} \cdot \frac{H_B(z)}{1 - H_B(z)} = \frac{Q_{0+}(z)}{P_{0+}(z)} \cdot \frac{Q_{0-}(z)}{P_{0-}(z)} \cdot z^{s_{0y}} \cdot \frac{H_B(z)}{1 - H_B(z)}$$

Де $P_0(z) = P_{0+}(z) \cdot P_{0-}(z)$, $Q_0(z) = Q_{0+}(z) \cdot Q_{0-}(z)$, де $P_{0\pm}(z)$, $Q_{0\pm}(z)$ –

поліноми у яких корені розташовані у середині (+) та поза (-) кола одиничного радіуса

3) Представимо $H_B(z)$ та $1 - H_B(z)$ у вигляді поліномів

$$H_B(z) = A(z) \cdot \frac{M(z)}{G(z)} e^{-s_b}$$

$$1 - H_B(z) = B(z) \cdot \frac{N(z)}{G(z)}$$

4) Підставимо вираз для $H_B(z)$ у вираз для обчислення $1 - H_B(z)$ й отримаємо поліноміальне рівняння синтезу дискретної ПФ регулятора у загальній формі.

$$G(z) \cdot z^{s_b} = A(z) \cdot M(z) + B(z) \cdot N(z) \cdot z^{s_b}$$

ЕТАП 2

1) Якщо брати до уваги фізичний зміст запізнення, яке може існувати у ОК, то бажане запізнення не може бути меншим за реальне (номінальне) запізнення:

$$s_{\text{б}} \geq s_{\text{п}}$$

2) Через умову фізичної реалізуємості алгоритму роботи регулятора, який задається її ПФ $D(z)$, порядок бажаної ПФ $H_{\text{б}}(z)$, який позначимо $n_{\text{б}}$, повинен бути не меншим ніж порядок ПФ $W_{\text{оу}}(z)$, який будемо позначати $n_{\text{оу}}$, тобто:

$$n_{\text{б}} \geq n_{\text{п}}$$

ЕТАП 3

Необхідні умови для забезпечення бажаної якості керування

Умова 1. Не чуттєвість ЦСАК до відхилення параметрів ОК від розрахункових значень. Таку умову називають «умовою грубості ЦСАК». ЦСАК називають грубою («робастною»), коли при малих параметричних збуреннях виникають малі зміни величин, які й характеризують якість процесу керування.

Припустимо, що $A(z) = P_{\text{о-}}(z)$; $B(z) = Q_{\text{о-}}(z)$. Це означає, що в математичній моделі ОК із істинними значеннями параметрів, а не номінальними, залишаються нулі і полюс які не скомпенсовані й знаходяться на та поза колом одиничного радіусу. Це необхідно за для уникання нестійкості системи через недокомпенсацію нулів та полюсів розташованих на та поза колом одиничного радіусу.

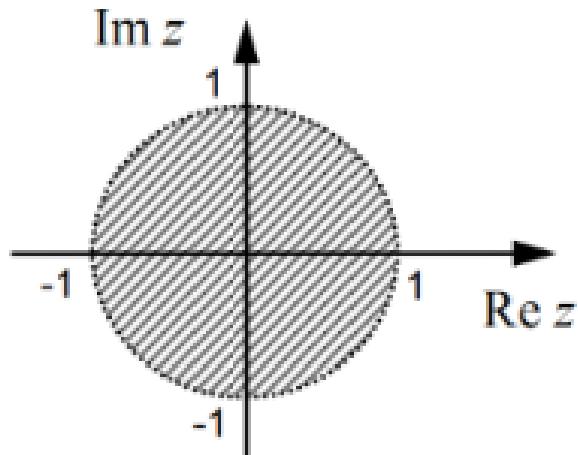


Рис. 2.2. Область стійкості на площині Z

Лінійна дискретна система, асимптотично стійка - коли всі корені її характеристичного полінома розташовані всередині одиничного кола на комплексній площині Z.

Дискретна передавальна функція цифрової обчислюваної машини(ЦОМ) та перше поліноміальне рівняння її синтезу мають вигляд:

$$D(z) = \frac{Q_{0+}(z) \cdot M(z)}{P_{0+}(z) \cdot N(z)} \cdot e^{-(s_k - s_n)}$$

$$G(z) \cdot z^{s_k} = P_{0-}(z) \cdot M(z) + Q_{0-}(z) \cdot N(z) \cdot z^{s_k}$$

Умова 2. Не чуттєвість ЦСАК до варіації параметрів ОК та виключення додаткових перехідних процесів в управляючому сигналі на виході регулятора.

Дискретна ПФ регулятора та друге поліноміальне рівняння її синтезу набувають вигляду:

$$D(z) = \frac{Q_{0+}(z) \cdot M(z)}{N(z)} \cdot e^{-(s_k - s_n)}$$

$$G(z) \cdot z^{s_k} = P_0(z) \cdot M(z) + Q_{0-}(z) \cdot N(z) \cdot z^{s_k}$$

2.2. Приклад синтезу цифрового регулятора завдяки методу бажаних передавальних функцій із використанням функцій системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink.

Побудуємо одно каналну ЦСАК у боковому каналі керування мінідроном із математичною моделлю приведенного неперервного ОК, яка буде представлена у вигляді даної неперервної ПФ:

$$W_{ок} = \frac{7}{0,7 \cdot s^2 + s}$$

Даний процес розбивається на такий алгоритм дій:

- Побудова математичної моделі дискретного об'єкту керування(ДОК).
- Застосування другого поліноміального рівняння для синтезу алгоритму цифрового автоматичного керування.
- Імітаційне моделювання.

Етапи виконання методики

Етап 1

1.1. Побудова ПФ узагальненого неперервного об'єкту керування:

$$WH=tf([7],[0.7 1 0])$$

Transfer function:

7

$$0.7 s^2 + s$$

1.2. Побудова ПФ для замкненого контуру:

$$H= WH/(1+ WH)$$

Transfer function:

$$4.9 s^2 + 7 s$$

$$0.49 s^4 + 1.4 s^3 + 5.9 s^2 + 7 s$$

1.3. Побудова діаграми **bode(H)**

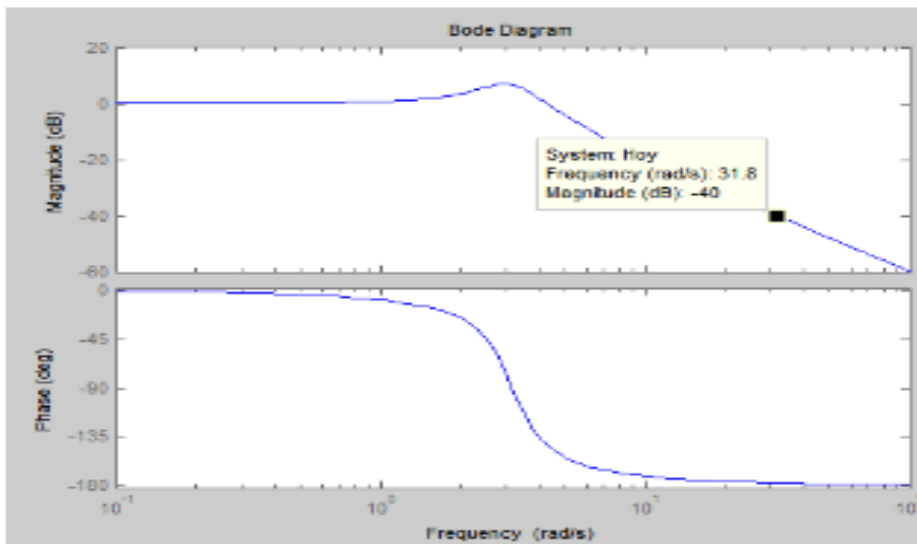


Рис.2.3. Діаграма **bode**, необхідна для обчислення верхньої граничної частоти корисного сигналу

1.4. Визначаємо верхню граничну частоту корисного сигналу на вході.

Бачимо, що в даному випадку $\omega_v = 31.8$ рад/с

1.5. За теоремою Котельникова обчислюємо T_0 :

$$T_0 = \pi / 31.8$$

$$T_0 = 0.0991$$

1.6. Побудова ПФ приведенного ДОК:

$$W_{pd} = c2d(WH, T_0)$$

Transfer function:

$$0.04687z + 0.04471$$

$$z^2 - 1.868z + 0.868$$

Sampling time (seconds): 0.099104

Етап 2

2.1 Виконаємо факторизацію поліномів чисельника та знаменника ПФ.

Знайдемо полюси ПФ:

$$p = \text{pole}(Wpd)$$

$$p =$$

$$1.0000$$

$$0.8680$$

$$Q_0(z) = Q_{0+}(z) \cdot Q_{0-}(z),$$

$$Q_0(z) = (z - 0.868) \cdot (z - 1).$$

Нулі ПФ приведенного дискретного ОК:

$$z = \text{zero}(Wpd)$$

$$z = -0.9539$$

$$P_0(z) = P_{0+}(z) \cdot P_{0-}(z),$$

$$P_0(z) = 0.04687 \cdot (z - (-0.9539)) \cdot 1 = 0.04687 \cdot z + 0.04471.$$

2.2. Побудуємо друге поліноміальне рівняння синтезу.

Знайдемо $G(z) = (z - 0.5)^2$, $M(z) = m_0$, $N(z) = n_1 \cdot z + n_0$;

m_0 , n_0 , n_1 – невідомі коефіцієнти поліномів.

2.3. Пошук невідомих коефіцієнтів із використанням системи символічних обчислень СКМ MATLAB.

% Права частина другого поліноміального рівняння синтезу

```
>> G=sym('(0.04687*z+0.04471)*mo+(z-1)*(n1*z+no)');
>> Gz=collect(G,'z')
Gz = n1*z^2+(.4687e-1*mo-1.*n1+no)*z+.4471e-1*mo-1.*no
>> pretty(Gz)
2
n1 z + (.04687 mo - 1. n1 + no) z + .04471 mo - 1. No
```

%Права частина другого поліноміального рівняння синтезу цифрового регулятора мінус його ліва частина виду $G(z)=(z-0.5)^2$

```
>> Gz1=Gz-sym('(z-0.5)^2')
Gz1 = n1*z^2+(.4687e-1*mo-1.*n1+no)*z+.4471e-1*mo-1.*no-(z-.5)^2
```

```
>> Gz1=collect(Gz1,'z');
>> pretty(Gz1)
2
(n1 - 1.) z + (.04687 mo - 1. n1 + no + 1.0) z - .25 + .04471 mo - 1. No
```

% Пошук невідомих коефіцієнтів поліноміального рівняння синтезу цифрового регулятора

```
>> syms no mo n1
>> f1=sym('n1 - 1');
>> f2=sym('0.04687*mo - 1*n1 + no + 1.0');
>> f3=sym('- 0.25 + 0.04471*mo - 1*no');
>> s=solve(f1,f2,f3,no,mo,n1)
s =
mo: [1x1 sym]
n1: [1x1 sym]
no: [1x1 sym]
>>s.n1
```

```
ans =
```

```
1.0
```

```
>>s.no
```

```
ans =
```

```
-0.12794824197423018126228434155929
```

```
>>s.mo
```

```
ans =
```

```
2.7298536798427604280410569993448
```

```
ПФ цифрового регулятора  $D(z)=2.7298*(z-0.8680)/(z-0.1279)$ 
```

%Права частина другого поліноміального рівняння синтезу цифрового регулятора мінус його ліва частина виду $G(z)=z^2$

```
>>Gz2=Gz-sym('z^2');
```

```
>>pretty(Gz2)
```

```
2 2
```

```
n1 z + (.04687 mo - 1. n1 + no) z + .04471 mo - 1. no - z
```

```
>>Gz2=collect(Gz2,'z')
```

```
>>Gz2 = (n1-1.)*z^2+(.4687e-1*mo-1.*n1+no)*z+.4471e-1*mo-1.*no
```

% Пошук невідомих коефіцієнтів поліноміального рівняння синтезу цифрового регулятора

```
>>f1=sym('n1-1');
```

```
>>f2=sym('0.04687*mo - 1*n1 + no');
```

```
>>f3=sym('0.04471*mo - 1*no');
```

```
>>s=solve(f1,f2,f3,no,mo,n1)
```

```
s =
```

```
mo: [1x1 sym]
```

```
n1: [1x1 sym]
```

```
no: [1x1 sym]
```

```
>>s.n1
```

```
ans =
```

```
1.0
```

```
>>s.no
```

```
ans =
```

```
0.48820703210307927495086263376283
```

```
>>s.mo
```

```
ans =
```

```
10.919414719371041712164227997379
```

```
% ПФ цифрового регулятора  $D(z)=10.9194*(z-0.8680)/(z+0.4882)$ 
```


РОЗДІЛ 3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ

3.1. Приклади різних методів регулювання та їх порівняння

Для того щоб об'єктивно провести аналіз та порівняти показники якості отримані під час налаштування ЦР, доцільно використати лише один ОК. У даній роботі буде використаний динамічний об'єкт – двигун постійного струму(ДПС), ПФ якого приведена до дискретного виду, описаний за швидкістю обертів валу відносно величини струму.

Передавальна функція ОК:

$$W_{ок} = \frac{0.04687 \cdot z + 0.04471}{z^2 - 1.868 \cdot z + 0.868}$$

Два основних показники за якими буде проводитись оцінка методів:

1. Час регулювання – це час по закінченню якого відхилення регульованої величини $y(t)$ від зазначеної величини не буде перевищувати задане значення Δ .

$$|y(t) - y_{уст}| \leq \Delta$$

2. Перерегулювання σ – це максимальне відхилення регульованої величини від встановленого значення.

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100 \%$$

Щоб провести аналіз вибрані декілька найпопулярніших методів:

Метод Зіглера-Нікольса та метод PID-Tuner через те, що дані методи різняться між собою по принципу своєї роботи, метод Зіглера-Нікольса – аналітичний метод, а метод PID-Tuner – програмний метод.

					НАУ 21 10 58 000 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розроб.</i>		Бусленко М.О			ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ- МАНІПУЛЯТОРОМ	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Тачиніна О.М.					33	39
<i>Реценз.</i>						ФАЕТ- 401 гр. ³³		
<i>Н. Контр.</i>		Дивнич М.П.						
<i>Затверд.</i>		Тачиніна О.М.						

Метод Зіглера-Нікольса

Структурна схема представлена на рисунку 1. (додаток Б)

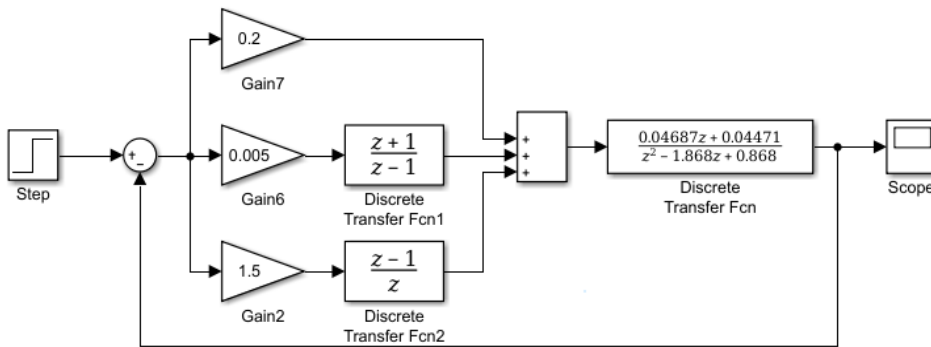


Рис.3.1. Структурна схема ЦСАК ДПС налаштування якої проведено відповідно до методу Зіглера-Нікольса

Після налаштування описаного у розділі 1 отримали такі коефіцієнти ПД-регулятора: $K_p = 0.2$; $K_i = 0.005$; $K_d = 1.5$.

Результат налаштування можна спостерігати на отриманому перехідному процесі:

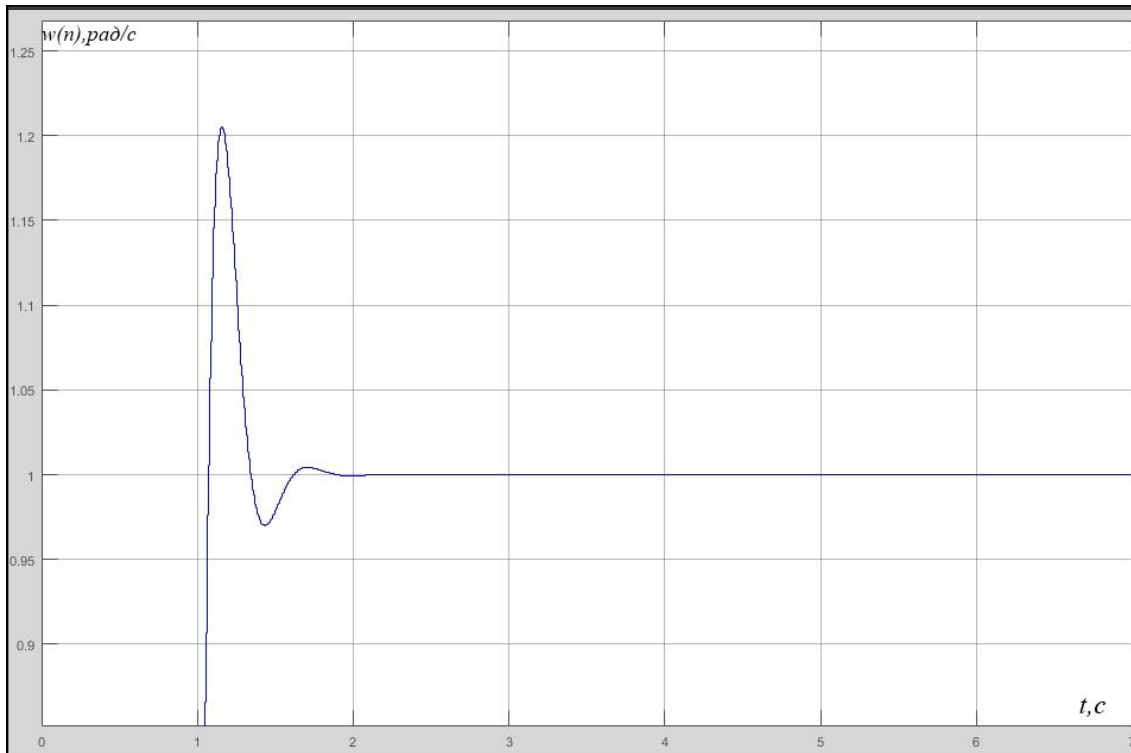


Рис.3.2. Перехідний процес при налаштуванні методом Зіглера-Нікольс
Показники якості перехідного процесу

$$t_p = 1.44 (c), \quad \sigma = 20\% .$$

Метод PID-Tuner

Структурна схема представлена на рисунку 3.(додаток В)



Рис.3.3. Структурна схема ЦСАК ДПС налаштована через метод PID-Tuner

Налаштування у блоці PID Controller (рис.3.4.)

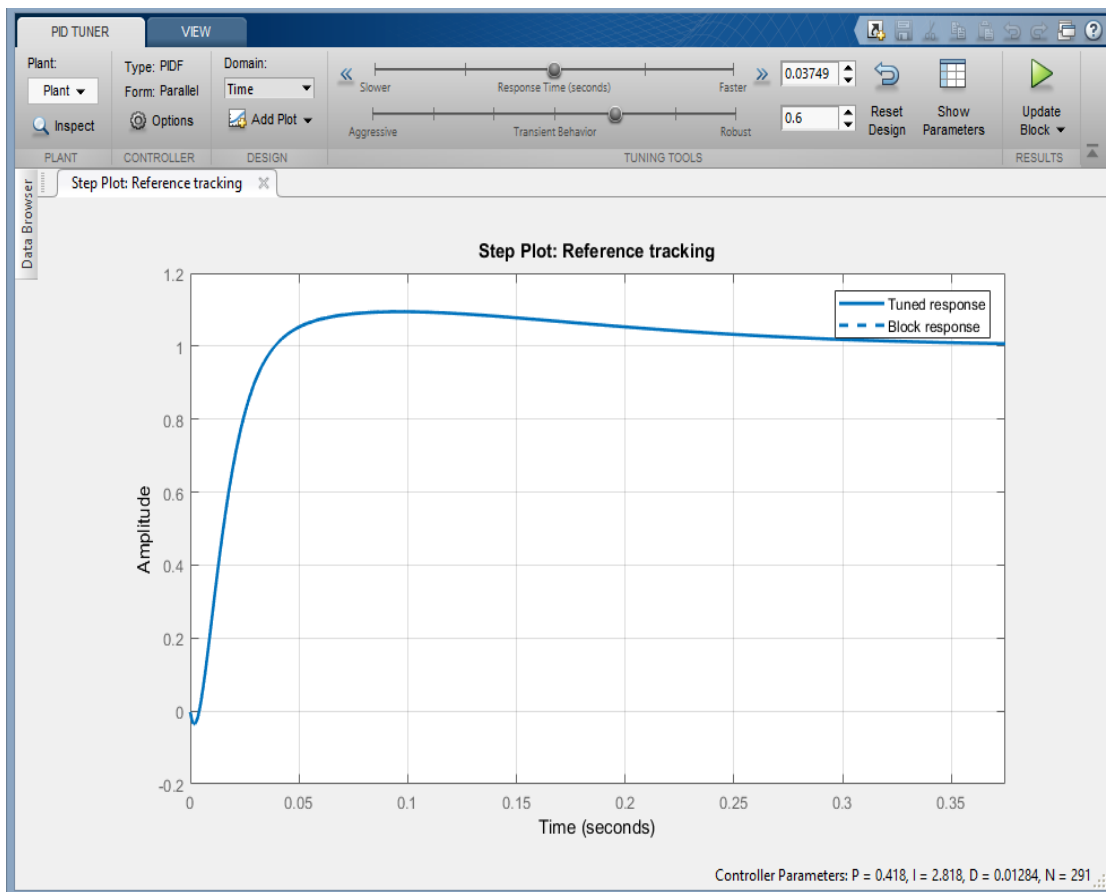


Рис.3.4. Налаштування параметрів у блоці PID-Controller

Після проведеного налаштування, описаного у розділі 1, отримали наступні коефіцієнти ПІД-регулятора: $K_p = 0.418$; $K_i = 2,818$; $K_d = 0,01284$.

Результат налаштування відображається на отриманому перехідному процесі (рис.3.5.):

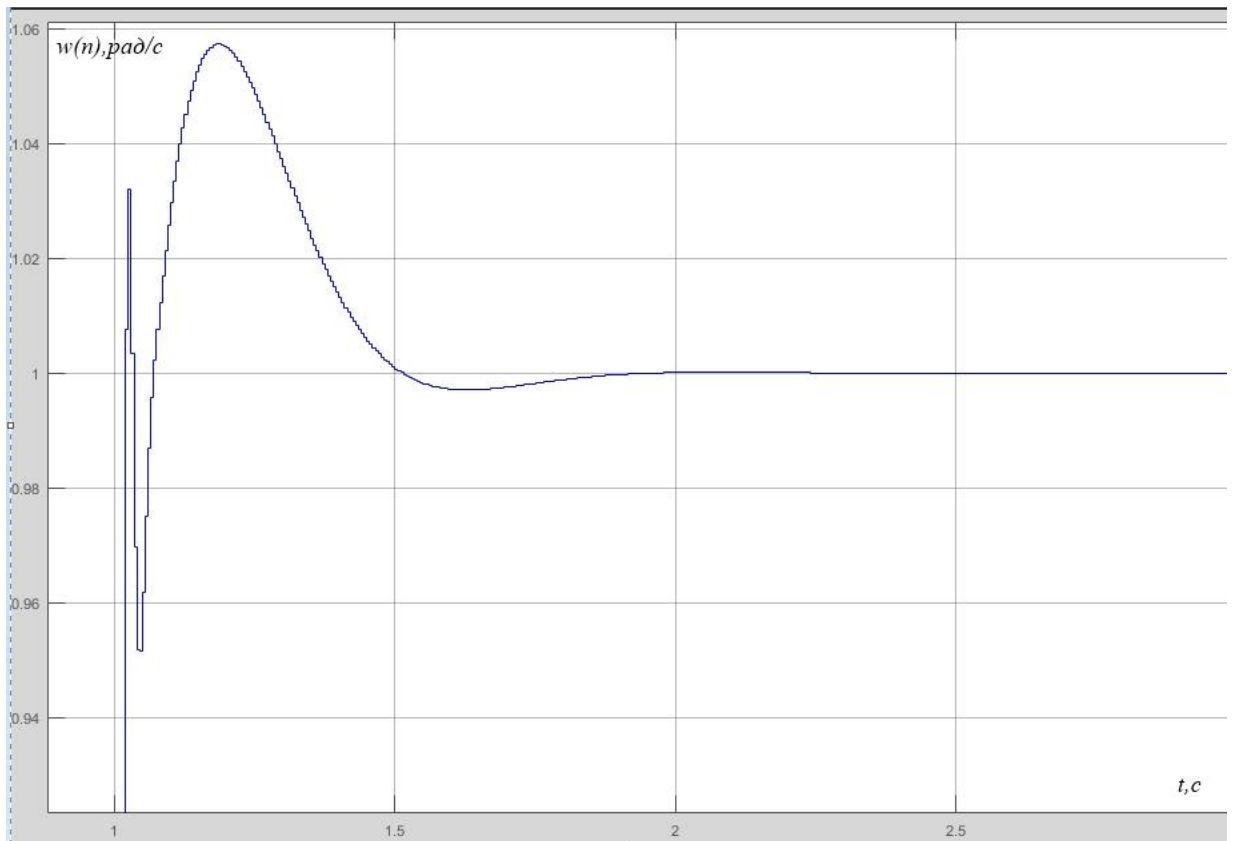


Рис.3.5. Перехідний процес отриманий налаштуванням через метод PID-Tuner

Показники якості перехідного процесу

$$t_p = 1.63 (c) , \sigma = 3.3\% .$$

Метод бажаних передавальних функцій

Структурна схема представлена на рисунку 6. (додаток Г)

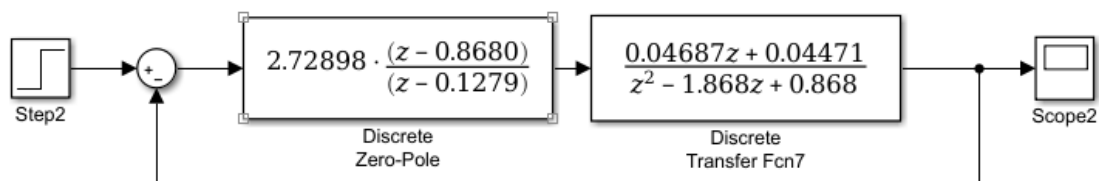


Рис.3.6. Структурна схема ЦСАК ДПС налаштована методом бажаних передавальних функцій

Після обрахування передаточної функції данного цифрового ОК, отримані результати у вигляді перехідного процесу зображені на рисунку 3.7:

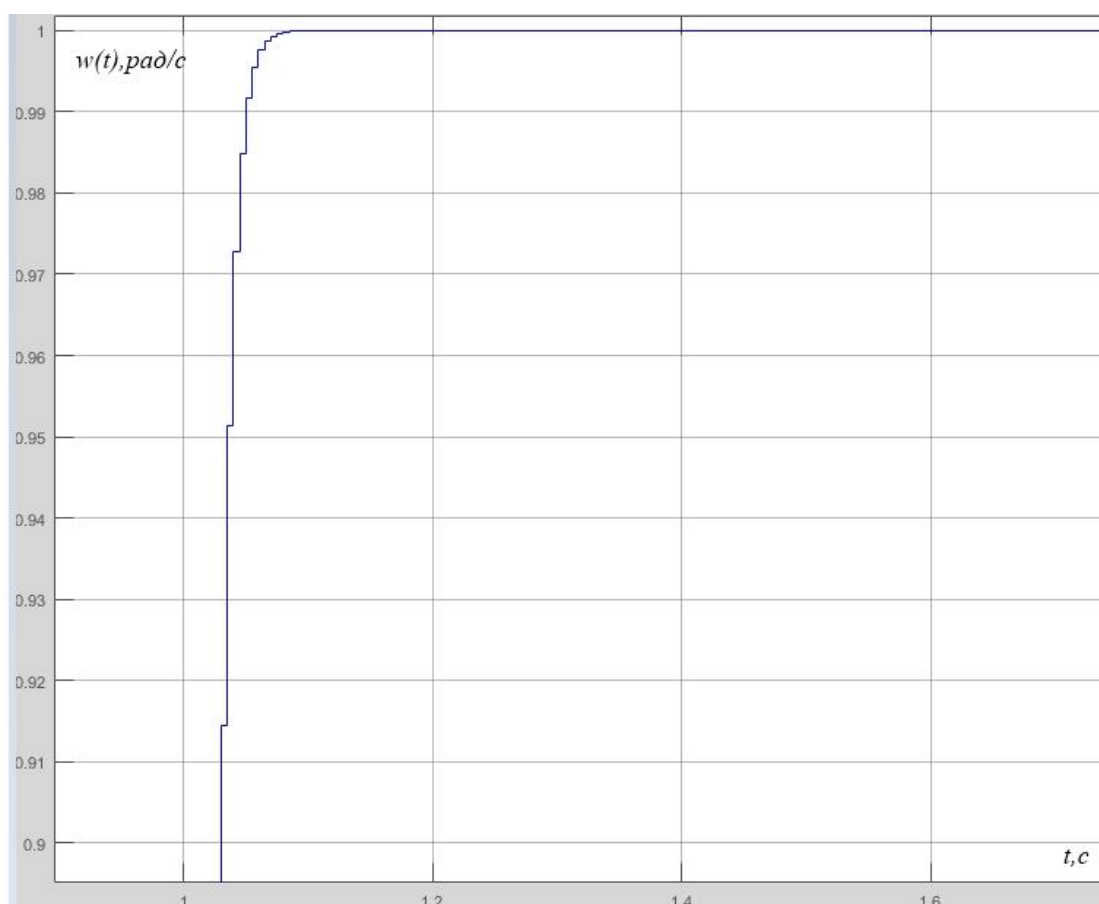


Рис. 3.7. Перехідний процес при налаштуванні методом бажаних передавальних функцій

Показники якості перехідного процесу

$$t_p = 1.02 (c), \sigma = 0\% .$$

ВИСНОВКИ

У даній дипломній роботі було поставлено за мету проведення порівняння та аналізу методів синтезу регуляторів для системи автоматичного керування роботом-маніпулятором.

Розроблено структурну схему системи автоматичного керування роботом-маніпулятором з цифровим ПД-регулятором.

Методом бажаних передавальних функцій було проведено синтез цифрового регулятора для системи автоматичного керування роботом-маніпулятором.

Розраховані коефіцієнти регулятора окремо для кожного методу.

За для проведення якісного аналізу, порівняння методів проведено базуючись на наступних якісних характеристиках: час регулювання та перерегулювання.

Проведено імітаційне моделювання системи автоматичного керування промисловим роботом з регуляторами, синтез яких був проведений з використанням різних методів. Перехідні процеси проілюстровані у додатку Д.

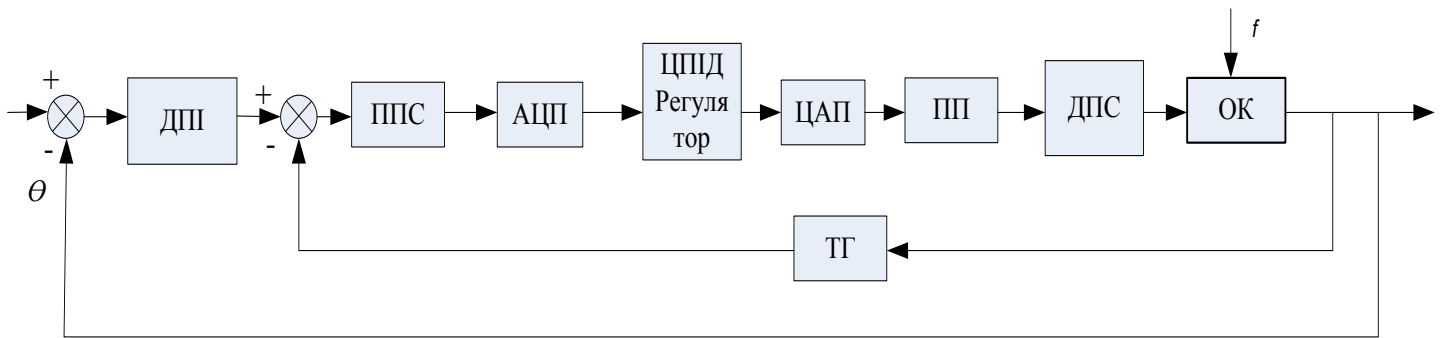
Регулятор який був синтезований з використанням методу бажаних передавальних функцій, дав кращі якісні характеристики перехідного процесу на відміну від інших розглянутих методів налаштування та дав можливість налаштування без обов'язкової наявності програмного або апаратного забезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ж. Аш. Датчики: Устройство и применение. - М.: Мир, 1992. – 480 с.
2. Деменков Н.П. и другие, Системы автоматического управления на основе программируемых логических контроллеров. Техническая коллекция Schneider Electric. выпуск 16, 2006
3. <https://indicator.ru/label/robototehnika>
4. Елизаров И.А., с соавторами. Мартемьянов Ю.Ф. и другие, Технические средства автоматизации. Программно - технические комплексы и контроллеры. – М.: Машиностроение. – 2004. – 410 с.
5. <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/promyshlenny-e-roboty/>
6. <https://nplus1.ru/news/2019/07/31/kuka>
7. http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine/132_.html
8. https://studme.org/125173/tehnika/ustroystvo_promyshlennyh_robotov
9. <http://robotrends.ru/robopedia/bortovye-roboty-kosmicheskikh-apparatov>

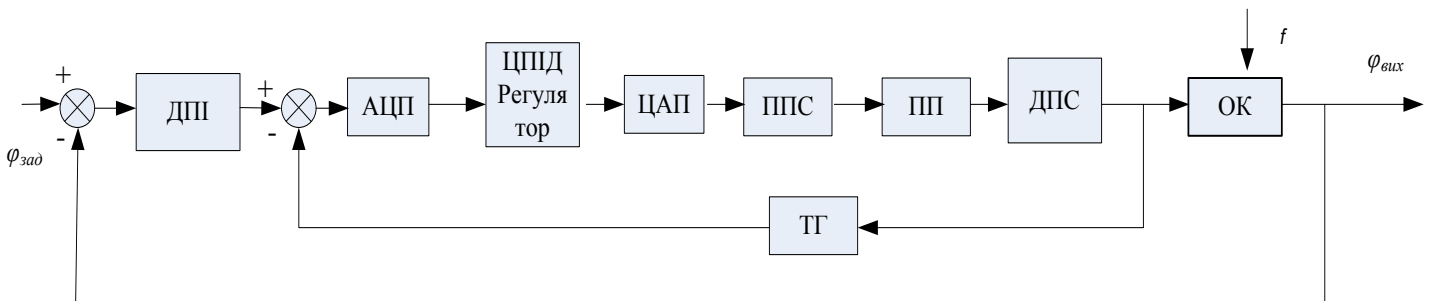
ДОДАТОК А

Структурна схема системи автоматичного керування з ЦПД-регулятором, ЦАП, АЦП



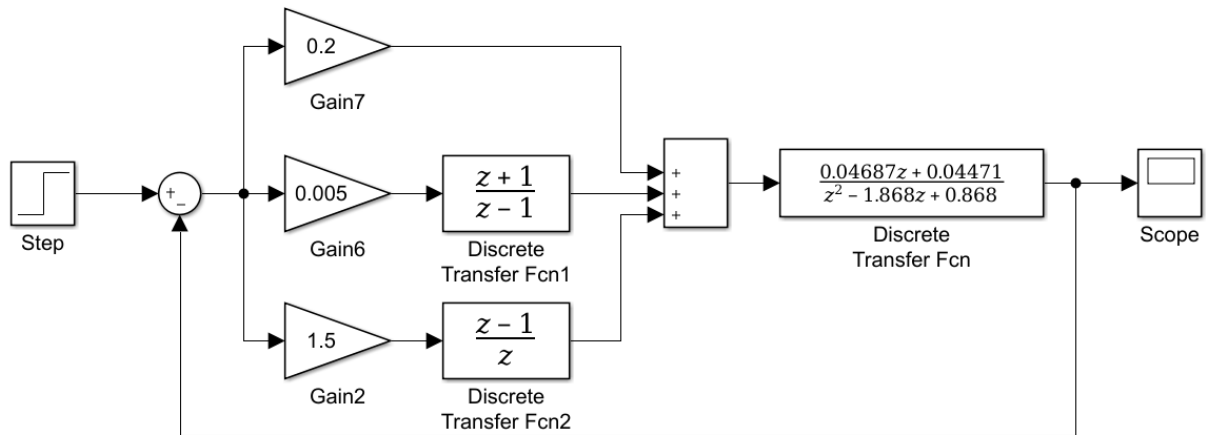
ДОДАТОК А1

Структурна схема системи автоматичного керування з ЦПД-регулятором



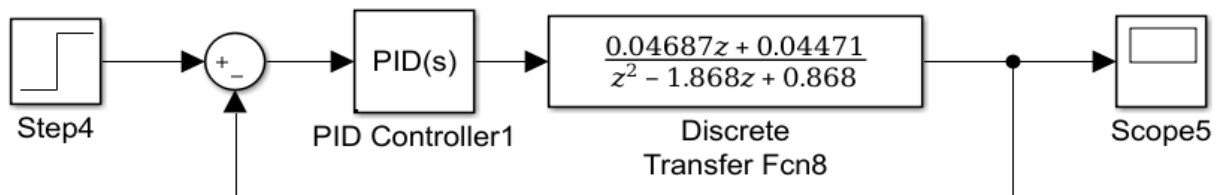
ДОДАТОК Б

Структурна схема цифрової системи автоматичного керування двигуном постійного струму налаштована методом Зіглера-Нікольса



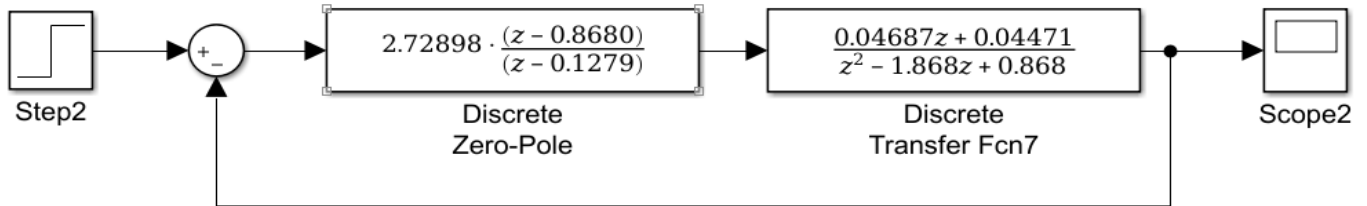
ДОДАТОК В

Структурна схема цифрової системи автоматичного керування двигуном постійного струму налаштована методом Pid Tuner



ДОДАТОК Г

Структурна схема цифрової системи автоматичного керування
двигуном постійного струму налаштована методом бажаних
передавальних функцій



ДОДАТОК Д

Перехідні процеси отримані при налаштуванні досліджуваними
методами

