

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

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри АКСУ

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

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «БАКАЛАВР»

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

Тема: «Система автоматичного керування приводом робота-маніпулятора»

Виконавець: Степанчук Микола Ігорович

Керівник: Тачиніна Олена Миколаївна

Нормоконтролер: _____

(підпис)

Дивнич М.П.

(П.І.Б.)

Київ 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий інститут аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управління

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКСУ

_____ О.М.Тачиніна

«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи (проекту)

_____ Степанчук Микола Ігорович _____

(П.І.Б. випускника)

1. Тема дипломної роботи (проекту)

«Система автоматичного керування приводом робота-маніпулятора» затверджена наказом ректора від «12»квітня 2021 р. №584/ст

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

3. Вихідні дані до роботи (проекту): початкові параметри коригуючих пристроїв та підсилювача: $k_p=1$, $k_d=0.3$, $k_i=0.5$, $T_d=0.9$; максимальний час перерегулювання не більше 3 %, час наростання не більше 2-3 с., тривалість перехідного процесу не більше 3-5 с. коригувальний пристрій 1- це пропорційна ланка; коригувальний пристрій 2- це аперіодична ланка.

4. . Зміст пояснювальної записки:аналіз існуючих систем керування роботами в авіації; розробка системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора; розробка цифрової системи автоматичного керування приводом робота- маніпулятора.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу:

Структурна схема системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора; імітаційна модель системи автоматичного керування приводом робота- маніпулятора; імітаційна модель цифрової системи автоматичного

керування приводом робота- маніпулятора; графіки перехідних процесів скорегованої та не скорегованої систем.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Визначення теми та початок написання вступу	25.03.2021 – 03.04.2021	
2	Розділ 1. Аналіз існуючих систем керування роботами в авіації	03.04.2021- 15.04.2021	
3	Розділ 2. Розробка цифрової системи автоматичного керування	30.04.2021- 18.05.2021	
4	Розділ 3. Розробка цифрової системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора	18.05.2021- 29.05.2021	
5	Висновки	29.05.2021- 08.06.21	
6	Дооформлення та захист дипломної роботи	08.06.2021 – 16.06.2021	

7. Дата видачі завдання: “25” березня 2021 р.

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

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

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

NCD – nonlinear control design;

АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика;

ВП – виконуючий пристрій;

ВС – вхідний сигнал;

ДПС – двигун постійного струму;

ДПС НЗ – двигун постійного струму незалежного збудження;

КП – коригуючий пристрій;

П – перетворювач;

ПК – пристрій керування;

ПФ – передавальна функція;

Р – регулятор;

САК – система автоматичного керування;

СК – система керування;

ТАК – теорія автоматичного керування;

ТП – тиристорний перетворювач;

ЦСК – цифрова система керування

Ф – фільтр

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту «Система автоматичного керування приводом робота-маніпулятора»: 42 с., 19 рис., 19 використаних джерел.

РОБОТ-МАНІПУЛЯТОР, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, ПРИВІД, КОРИГУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, ЦИФРОВА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.

Об'єкт дослідження: процес керування приводом робота-маніпулятора.

Предмет дослідження: система автоматичного керування приводом робота-маніпулятор.

Мета дослідження: синтезувати коригуючі пристрої та підсилювач в системі автоматичного керування приводом робота-маніпулятора для одержання бажаних характеристик перехідного процесу.

Методи дослідження: метод аналізу та синтезу, метод імітаційного моделювання, метод параметричного синтезу.

Матеріали дипломної роботи можуть бути використані для проведення імітаційного моделювання в аналоговій та цифровій системі автоматичного керування.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОБОТАМИ В АВІАЦІЇ.....	10
1.1 Застосування роботів в авіаційній сфері	10
1.2 Аналіз існуючих систем автоматичного керування приводом.....	14
1.3 Постановка задачі на дослідження.....	18
2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА.....	20
2.1 Побудова структурної схеми САК приводом робота маніпулятора.....	20
2.2 Оптимізація параметрів системи керування	23
3. РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА.....	29
3.1 Побудова дискретної лінійної стаціонарної математичної моделі системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора.....	29
3.2 Дослідження системи на стійкість.....	36
ВИСНОВКИ.....	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	42

ВСТУП

В наш час значно розширюються сфери застосування автоматичної та робототехніки. Оскільки з розвитком і створенням автоматичних систем керування, інформаційних технологій та штучного інтелекту з'явилась можливість вирішення нових технічних задач, ці технології застосовуються задля вирішення задач, що пов'язані зі звільненням людини від робіт, що створюють загрозу для життя та здоров'я, а також задач, що пов'язані з перенесенням вантажів та монотонними діями.

Автоматика – галузь науки і техніки, що поєднує у собі теорію і принципи побудови систем керування, що діють без безпосередньої участі людини. Якщо розглядати у вузькому сенсі – це сукупність методів і технічних засобів, що виключають участь людини при виконанні операцій конкретного процесу.

Вирішення багатьох задач задля полегшення роботи людини та досягнення більш високих показників якості і точності виробництва досягається шляхом застосування роботів-маніпуляторів. Одними з найбільш вживаних роботів-маніпуляторів є роботи, що здатні виконувати дії подібні руці людини. До таких дій відносяться такі, як: фасування продукції на конвеєрних стрічках та складських приміщеннях, заміна заготовок на верстатах, зміна положення деталей та їх витяг з печей жару чи розчинів, різання та шліфування деталей, їх фарбування та інші.

Роботи застосовуються в промисловості як для виконання основних, так і для допоміжних робіт. В якості допоміжних операцій, застосування роботів дає можливість звільнити працівників від завантажувальних робіт, обслуговування верстатів та інших подібних дій. Якщо розглядати роботів в якості основного

Кафедра СУЛА				НАУ 21 14 87 000 ПЗ			
Виконав	Степанчук М.І.			Вступ	Літера	Аркуш	Аркушів
Керівник	Тачиніна О.М.					7	43
Консульт.	Тачиніна О.М.				ФАЕТ-401 гр.		
Н-контр.	Дивнич М.П.						
Зав. каф.	Тачиніна О.М.						

технологічного обладнання, то вони можуть вирішувати задачі стосовно проведення точкового і шовного зварювання, лазерного і плазмового різання, процесу шліфування, складання і сортування деталей.

Роботи можуть мати різні розміри та відноситись до різних типів. Отже, немає обмежень по їх використанню. Існують як стаціонарні, так і мобільні роботи. Різняться вони за типом конструкції та принципом роботи. Можливо віддалене керування оператором або за заданою заздалегідь програмою. Для цього оператору необхідно попередньо провести програмування роботи, щоб в подальшому він працював самостійно, без участі оператора.

У дипломному проекті представлена система автоматичного керування робота-маніпулятора. Також, було розраховано параметри коригуючих пристроїв та підсилювача так, щоб одержаний вихідний сигнал відповідав показникам якості, що були задані. Також було досліджено стійкість системи.

Мета дослідження: синтезувати коригуючі пристрої та підсилювач в системі автоматичного керування приводом робота-маніпулятора для забезпечення бажаних характеристик перехідного процесу.

Об'єкт дослідження: процес керування приводом робота-маніпулятора.

Предмет дослідження: система автоматичного керування приводом робота-маніпулятора.

Методи дослідження: метод аналізу та синтезу, метод імітаційного моделювання, метод параметричного синтезу.

Завдання дослідження:

1) проаналізувати та дослідити системи автоматичного керування приводом робота, що вже існують;

2) розробити структурну схему САК приводом робота-маніпулятора;

3) розробити неперервну схему САК приводом робота-маніпулятора;

4) розробити цифрову схему САК приводом робота-маніпулятора;

5) змоделювати неперервну та цифрову системи автоматичного керування

приводом робота- маніпулятора в середовищі Matlab;

б) дослідити систему на стійкість.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОБОТАМИ В АВІАЦІЇ

1.1. Застосування роботів в авіаційній сфері.

Робот-автоматичний пристрій, що призначений для виконання роботи по заданій програмі, що виконує роль людини при виконанні монотонної, чи небезпечної для життя роботи.

Виділяють шість загальних завдань робототехніки:

Переміщення – пересування в будь – якому середовищі

Орієнтація – визначення свого положення в просторі

Маніпуляція – переміщення оточуючих предметів

Взаємодія – контактування з іншими роботами

Комунікація – можливість сприймати команди людини, та надавати інформацію, що може бути сприйнята людиною.

Штучний інтелект – робот повинен самостійно інтерпритувати команди людини та виконувати її.

В авіаційній промисловості роботи зокрема використовуються при побудові авіаційної техніки на літакобудівних підприємствах. Використання роботів – маніпуляторів дозволяє зменшити необхідну кількість працівників, а отже зменшити вплив людського фактору на якість роботи, яка є особливо важливою при зборці літака. Роботи забезпечують постійний рівень якості та зменшують кількість необхідних переробок.

На даний момент застосування робототехніки в авіаційній промисловості є обмеженим

Кафедра СУЛА				НАУ 21 14 87 000 ПЗ			
Виконав	Степанчук М.І.			Аналіз існуючих систем автоматичного керування роботами в авіації	Літера	Аркуш	Аркушів
Керівник	Тачиніна О.М.					10	43
Консульт.	Тачиніна О.М.				ФАЕТ-401 гр.		
Н-контр.	Дивнич М.П.						
Зав. каф.	Тачиніна О.М.						

Можна виділити кілька основних напрямків:

Зварювання – виготовлення трубопроводів, зварювання з використанням лазера, зварювання тертям з перемішуванням.

Збірка – клепаання, свердління і розміщення деталей.

Контроль якості – перевірка деталей на цілісність за допомогою лазерних, ультразвукових та інших технологій.

Виробництво з застосуванням полімерних та композитних матеріалів .

Роботи здатні здійснювати контроль якості заготовки, наприклад шороховатості, інфузії, затвердіння, здійснювати контроль наявності порожнин за допомогою ультразвукового сканування.

Зварні з'єднання широко використовуються в конструкції літака. Зварювання - високопродуктивний процес, добре піддається механізації і автоматизації. У конструкції сучасних важких літаків кількість зварних точок досягає 200000, довжина роликів швів - понад 400 м, а довжина швів, виконаних різними видами зварювання плавленням, перевищує 1500 м. Сварка широко застосовується при виготовленні надзвукових літаків, що зазнають великий аеродинамічний нагрів і виготовляються з сталей і титанових сплавів. За способом з'єднання деталей розрізняють зварювання плавленням і зварювання пластичним деформуванням.

Також зварювання використовується для ремонту тріщин на елементах авіаційної техніки. Літак протягом одного польоту піддається впливу вібрації, перепаду атмосферного тиску, перепаду температур, знакозмінних механічних навантажень. Тому, поява тріщин, як на силових, так і несилових елементах конструкції літака неминуче. І якщо заміна всього пошкодженого агрегату економічно недоцільна, то для усунення тріщин використовується зварювання.

При зварюванні використовують електричну, хімічну і механічну енергію.

Робот є високоточним і технологічним обладнанням, отже, і заготовки, що надходять на лінію виробництва, повинні відповідати вимогам високої точності і якості. Тому для виконання даних вимог використовують сучасні верстати з ЧПУ. Ці верстати сприяють відмінному розкрию листів металу так, що навіть не знадобиться обробка кромки під зварювання. Також, обов'язковою умовою

чіткого керування роботом, є калібрування вузлів самого робота, яка, в свою чергу, ділиться на три етапи - це калібрування координат приладу, калібрування осей і оточення.

Розрізняють такі види зварювання:

- зварювання плавленням(до зварювання плавленням відносять електродугове, електрошлакове, газове, плазмове, електрично-променеве, лазерне)

Електродугове зварювання є найбільш поширеною з існуючих способів. При такому зварюванні для місцевого розплавлення зварювальних деталей використовують тепловий ефект електричної дуги.

- зварювання під шаром флюсу

Цей метод застосовується для зварювання деталей з сталей або жароміцних сплавів в тих випадках, коли автоматичне зварювання використовувати неможливо або недоцільно.

- при атомно-водневому зварюванні дуга збуджується між двома вольфрамовими електродами. Через дугу пропускають молекулярний водень H_2 , що подається з балона. Водень при високій температурі дуги розпадається на атоми H , поглинаючи при цьому велику кількість теплоти. Атомарний водень, досягаючи поверхні деталей і охолоджуючись, знову переходить в молекулярний стан, виділяючи тепло, яке розплавляє метал.

- киснево-ацетиленове(водневе зварювання) проводиться за допомогою зварювального пальника, до якої підводяться кисень і ацетилен. Присадний метал вводять з боку в формі прутка. Температура полум'я сягає $\sim 3000^\circ C$.

У літакобудуванні киснево-ацетиленові зварювання застосовують для з'єднання деталей з маловуглецевих, низьколегованих і легваних сталей і сплавів, а також з мідних і легких сплавів.

- ультразвукове зварювання

Джерелом енергії при цьому методі зварювання є пружні коливання високих і надвисоких частот (понад 20 000 Гц), які руйнують окисні плівки в зоні контакту деталей, що з'єднуються і нагрівають їх до високої температури (рис. 65, б).

- контактне зварювання

У сучасному виробництві літаків широко поширена контактна електричне зварювання. Пояснюється це тим, що в конструкції літальних апаратів багато деталей з листового матеріалу і профілів різних перетинів, добре з'єднуються за допомогою контактної зварювання. Контактне зварювання є продуктивнішим та більш економічним, ніж клепка. Найбільше застосування в літакобудуванні отримали точкове (ТЕС) (рис. 66, в) і роликіве (РЕМ) (рис. 66, б), або шовне електрозварювання.

Зварювання ведуть на спеціальних точкових і роликівих машинах, оснащених підтримують пристроями, на яких встановлюють збирається вузол в необхідному положенні.

Технологічний процес зварювання конструкцій з легких сплавів включає в себе наступні операції: попереднє складання вузла в пристосуванні, розбирання вузла, підготовку поверхонь під зварювання (знежирення, промивання у холодній воді, травлення, промивання і сушіння) і остаточну збірку (зварювання і контроль якості зварювання) .

Контроль якості зварювальних робіт включає в себе:

1. Попередній контроль, в процесі якого здійснюють перевірку основного металу, електродів, зварювального дроту, флюсу, а також стан зварювальної апаратури.
2. Поточний контроль, що полягає в перевірці зовнішнього вигляду шва, його геометричних розмірів, справності зварювальної апаратури, дотримання технологічного процесу.
3. Перевірку якості зварювання готового вузла, агрегату, виробу. Для цієї мети шви оглядають, випробовують на щільність, просвічують рентгенівськими і гамма-променями, застосовують ультразвукові, магнітні та люмінесцентні методи контролю, металографічні дослідження, механічні випробування.
4. Вид контролю якості швів зварних з'єднань вибирають в залежності від призначення виробу і вимог, що пред'являються до нього технічними умовами.

Поліпшення робототехнічних систем зводиться до підвищення універсальності, комплексності рішень, тобто створення змінних насадок маніпуляторів, для переходу на новий технологічний процес в разі необхідності, і продовження виробництва без труднощів.

В майбутньому роботи можуть взяти на себе операції допільного контролю, наприклад наземного тестування систем управління в кабінах літаків, зовнішній структурний огляд. Це скоротить час допільної підготовки, а також дозволить позбутися значної частини впливу людського фактору.

Отже, сучасну авіацію важко уявити без застосування робототехніки. Роботи беруть активну участь в більшості областей авіації: від виробництва літального апарату до управління ним. Без впровадження роботів в промисловість виробництво, наприклад з використанням композитних матеріалів, було б неможливим або надзвичайно повільним, забезпечити безпеку сучасних рейсів без автопілота було б значно складніше.

1.2. Аналіз існуючих систем автоматичного керування приводом

За видом руху інформації в керуючому пристрої системи автоматичного керуванні поділяються на замкнені та розімкнені.

Розімкнені САК мають жорстко задану програму керування, контроль результату дії керуючих впливів не здійснюється.

У замкнених САК керуючий вплив формується залежно від керованої величини, відповідно наявний зворотній зв'язок між входом системи та його виходом.

Отже, система керування приводом повинна бути замкненою.

За метою керування системи поділяються на:

- адаптивні системи автоматичного керування(забезпечують бажаних параметрів процесу при значному діапазоні збурень і зміни характеристик об'єкта керування)
- системи екстремального керування за часом (призначенні для підтримання екстремального(мінімального, або максимального) значення параметра)

- системи автоматичного регулювання, які в свою чергу поділяються на:

- 1) Системи автоматичної стабілізації – підтримують задане значення на постійному рівні.
- 2) Слідкуючі системи керування – системи, вихідний вплив яких невідомий наперед і визначається в процесі функціонування системи.
- 3) Системи програмного керування – значення змінюються за заданим законом, в таких системах також наявні похибки, пов'язані з інерційністю регулятора.

Програмне керування поділяють на три підвиди:

1. Керування за переміщенням – сигнал подається програмним пристроєм, вихідне значення якого залежить від положення рухомих елементів системи.
2. Послідовне керування – дії виконуються покроково відповідно до стану керованої системи.
3. Керування за часом – задані величини надходять від програмного пристрою, що оснащений генератором часу.

Отже, система керування приводом повинна бути системою автоматичного програмного регулювання з керуванням за переміщенням.

Об'єктом керування є сам процес керування приводом робота-маніпулятора. До системи керування робота-маніпулятора входять виконавчі пристрої, і пристрої керування, що забезпечують обробку вхідної інформації та видачу завдань на відповідні силові агрегати, які призводять маніпулятора в рух. Тобто, в систему керування входить об'єкт, регулятор, привід і датчики та канали зв'язку, що є теж дуже важливою складовою, бо через них йде обмін інформацією між елементами. Для передачі інформації можуть використовуватися електричний струм, пневматичні, гідравлічні системи або комп'ютерні мережі.

Мета керування тим чи іншим чином пов'язується зі зміною в часі величини, що регулюється – вихідної величини керованого об'єкта. Тому для здійснення регулювання цієї величини керованого об'єкта важливим показником є керуючий вплив. Він призначений для компенсації ефекту зовнішніх впливів, що викликають збурення, які, в свою чергу, порушують

необхідну поведінку регульованої величини. Керуючий вплив виробляється пристроєм керування (ПК). Сукупність керуючого пристрою і керованого об'єкта, що взаємодіють між собою утворюють систему автоматичного керування (САК).

Узагальнена структурна схема системи керування роботом-маніпулятором має такий вигляд

(рис. 1.1):

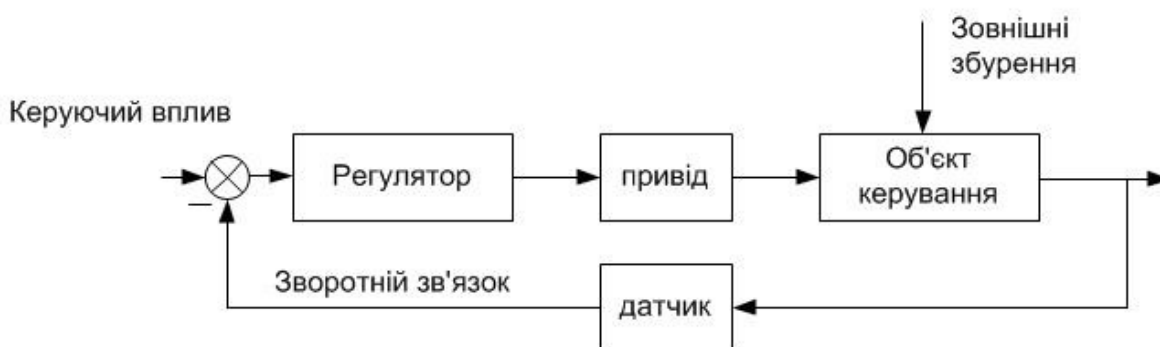


Рис. 1.1. Узагальнена структурна схема системи керування

Порівняння різних систем керування може проводитись за такими параметрами:

- тип траєкторії руху робота;
- цикл керуванням;
- джерела інформації для синтезу закону керування;
- алгоритм керування;
- спосіб програмування системи керування.

Система керування робота, яка реалізує всі запрограмовані рухи, має інформаційну та командну зв'язку з іншим обладнанням для синхронізації роботи даної технологічної лінії.

Для керування важливим питанням є те, чи змінюються характеристики об'єкта з часом.

Системи, в яких всі параметри залишаються постійними, називаються стаціонарними, що означає «які не змінюються в часі». Динаміка таких систем описується диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами.

Системи, в яких параметри об'єкта або регулятора змінюються з часом, називаються нестационарними. Такі системи на практиці зустрічаються найчастіше. При дослідженні цих систем необхідно враховувати не лише величину збурення, а й момент його прикладання.

За характером зміни керуючого впливу розрізняють системи автоматичної стабілізації, програмного регулювання та слідкуючі системи.

Системи автоматичної стабілізації характеризуються тим, що в процесі роботи системи керуючий вплив залишається постійним. Основне завдання цієї системи – підтримка на постійному рівні з допустимою помилкою регульованої величини незалежно від діючих збурень.

Особливість системи програмного регулювання це те, що керуючий вплив змінюється за заздалегідь встановленим законом у функції часу або координат системи.

Залежно від кількості входів і виходів системи автоматичного керування підрозділяються на одномірні і багатовимірні системи.

Одномірні системи мають один вхід і один вихід, такі системи розглядаються в класичній теорії управління.

Багатовимірні системи мають два, чи більше входів або виходів. Такі системи є предметом вивчення сучасної теорії управління.

Залежно від того, як проводиться налаштування системи – людиною або автоматично системою, САК діляться на не адаптивні та адаптивні системи.

Не адаптивні системи – це системи, в яких непередбачене автоматичне налаштування системи, при зміні характеристик зовнішніх впливів або параметрів самої системи, з метою забезпечення оптимального процесу керування. Налаштування такої системи зазвичай виконує людина.

Адаптивні системи – це системи, які автоматично пристосовуються до зміни зовнішніх умов і властивостей об'єкта керування, забезпечуючи при цьому необхідну якість управління шляхом зміни структури та параметрів керуючого пристрою.

У свою чергу адаптивні САК діляться на:

- оптимальні, що призначені для досягнення найкращих результатів

роботи за певний проміжок певного часу у відповідності з критерієм керування в конкретних умовах з урахуванням існуючих ресурсів та обмежень;

- самоналагоджувальні, параметри об'єкта керування у яких не залишаються незмінними, а перетворюються при зміні зовнішніх умов;
- самоорганізуючі, у яких алгоритм роботи вдосконалюється при зміні параметрів об'єкта керування і зовнішніх умов;
- самонавчальні, що аналізують накопичений досвід керування об'єктом і на підставі цього автоматично вдосконалюють свою структуру і спосіб керування.

В даному розділі розглянуто системи автоматичного керування, що вже існують. В даному дипломному досліджено замкнуту, неперервну, стаціонарну, одномірну, адаптивну систему автоматичного керування приводом робота-маніпулятора.

1.3. Постановка задачі на дослідження

Необхідно змоделювати систему керування роботом-маніпулятором з метою створення ефективної, адекватної моделі системи. Також необхідно виконати підбір параметрів коригувальних пристроїв і підсилюючого елемента.

При розгляді системи варто враховувати наступне:

- на вхід системи надходить кут повороту, який створюється механічним зусиллям;
- цей сигнал з урахуванням помилки перетворюється в електричну напругу;
- сигнал посилюється, коригується і направляється на двигун;
- вихідний сигнал двигуна надходить на об'єкт – робот-маніпулятор.

Як засіб моделювання будемо використовувати середовище *Matlab*.

Для дослідження поставлені наступні завдання:

1. проаналізувати та дослідити системи автоматичного керування, що вже існують;
2. розробити структурну схему САК приводом робота-маніпулятора;
3. розробити неперервну схему САК приводом робота-маніпулятора;

4. розробити цифрову схему САК приводом робота-маніпулятора;
5. змодельовати неперервну та цифрову САК приводом робота-маніпулятора в середовищі Matlab;
6. дослідити систему на стійкість

Висновки до розділу 1

Для виконання поставленого завдання необхідно розробити структурну схему системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора, провести імітаційне моделювання цифрової та неперервної САК приводом робота-маніпулятора в середовищі Matlab та дослідити систему на стійкість.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

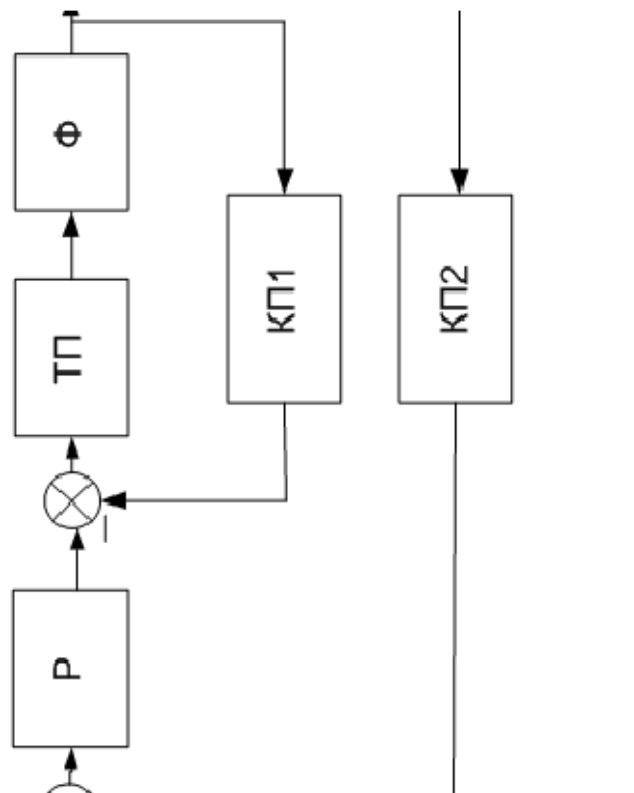
2.1. Побудова структурної схеми САК приводом робота-маніпулятора.

Застосовують двигуни постійного та змінного струму, в залежності від того, яку роботу потрібно виконати. У робототехніці найбільш широко застосовуються двигуни змінного струму з незалежним збудженням (ДПС НЗ). Для керування такими двигунами застосовуються багатоконтурні регулятори, які підбираються в залежності від властивостей ДПС і необхідних характеристик САК.

На рис. 2.1. зображення структурна схема розглянутої в дипломному проєкті системи керування електроприводом робота-маніпулятора. Аперіодична ланка $W(5)$ першого порядку в цій системі представляє собою електричний привід постійного струму. Керування електричним приводом постійного руху здійснюється силовим регулятором, а саме нереверсивний широтно-імпульсним перетворювачем, роль якого виконує тиристорним перетворювач, який представлений аперіодичною ланкою $W(3)$. Регулятор з'єднаний з фільтром $W(4)$ послідовно, завдяки чому обмежується швидкість зміни керуючого сигналу. Також це дозволяє уникнути розмикання контуру регулювання.

Регулятор, виражений передавальною функцією $W(2)$ здійснює керування тиристорним перетворювачем. На вхід цього регулятора подається різниця сигналу керування від перетворювача $W(1)$, і зворотного зв'язку по швидкості.

Кафедра СУЛА				НАУ 21 14 87 000 ПЗ			
Виконав	Степанчук М.І.			Розробка системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора	Літера	Аркуш	Аркушів
Керівник	Тачиніна О.М.					20	43
Консульт.	Тачиніна О.М.				ФАЕТ-401 гр.		
Н-контр.	Дивнич М.П.						
Зав. каф.	Тачиніна О.М.						



Умовні скорочення, використані в схемі:

ВС – вхідний сигнал, а саме - кут повороту , що надходить на вхід системи від механічних зусиль оператора або в якості вихідного сигналу запрограмованої системи керування;

ДПС – двигун постійного струму;

ВП – виконуючий пристрій;

КП – коригуючий пристрій.

П – перетворювач;

Р – регулятор;

ТП – тиристорний перетворювач;

Ф – фільтр;

Структурна схема містить механічну частину, електродвигун та систему керування.

Механічна частина привода робота-маніпулятора передає механічну енергію від електричної машини до виконуючого пристрою змінюючи вид руху.

Електричний двигун постійного струму незалежного збудження перетворює електричну енергію в механічну.

Рис. 2.1. Структурна схема АКСприводом

Система керування складається з фільтру, регулятора, перетворювача, тиристорного перетворювача, та коригуючих пристроїв. Перетворювач здійснює перетворення кута повороту в напругу. Тиристорний перетворювач створює керуючий вплив на двигун, та забезпечує його живлення. Інформація про стан електропривода в даний момент часу надходить до регулятора та перетворювача завдяки датчикам зворотного зв'язку-коригуючих пристроїв, що підвищують швидкодію та знижують динамічні похибки в системі, забезпечують стійкість системи.

В розробленій САК приводом робота-маніпулятора представлено три контури керування:

- контур керування по швидкості;
- контур керування по напрузі;
- контур керування по куту відхилення привода.

Щоб створити ефективну модель, необхідно змоделювати систему керування приводом робота-маніпулятора.

Проаналізувавши систему, можна сказати наступне:

- за рахунок механічного руху до входу системи надходить кут повороту;
- кут повороту перетворюється в електричну напругу з урахуванням помилки;
- сигнал надходить на двигун, посилюючись та коригуючись;
- отриманий сигнал з двигуна надходить до приводу робота-маніпулятора.

Моделювання виконується в середовищі Matlab 2015.

2.2. Оптимізація параметрів системи керування

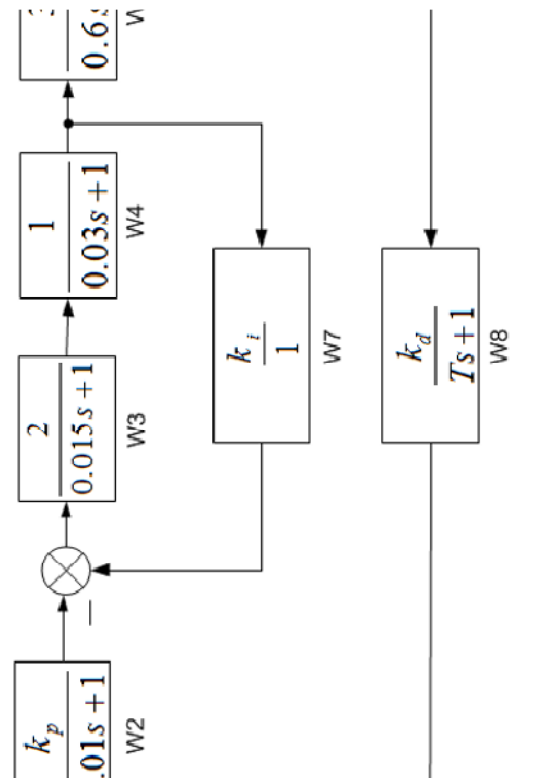
Параметри коригувальних пристроїв є важливими для оптимізації.

Отриманий вихідний сигнал має відповідати таким показникам якості:

- максимальне перерегулювання – не більше 3%;
- час наростання – не більше 2-3 с;

– тривалість перехідного процесу – не більше 3-5 с.

Потрібно скласти імітаційну модель САК приводом робота-маніпулятора для визначення параметрів підсилювача та коригуючих пристроїв (рис. 2.2). Також потрібно здійснити оптимізацію системи в середовищі Matlab Simulink, використовуючи блок Signal Constraint.



Імітаційна модель САК приводом робота-маг

Імітаційна модель містить такі елементи:

VS – блок Step, що служить вхідним сигналом;

W1 – перетворювач;

W2 – регулятор;

W3 – тиристорний перетворювач;

W4 – фільтр;

W5 – двигун постійного струму;

W6 – виконуючий пристрій;

W7, W8 – коригуючий пристрій.

Для моделювання W1, W2, W3, W4, W5, W6, W7, W8 в імітаційній моделі був застосований блок Transfer Function;

Scope – осцилограф, що дозволяє спостерігати за зміною сигналу в часі.

Signal Constraint – блок, що дозволяє задавати допустимі межі на прямих показниках якості системи.

Результат моделювання нескорегованої системи зображення на (рис. 2.3), як графік перехідного процесу. Можна зробити висновок про те, що отриманий перехідний процес не відповідає заданим показникам якості.

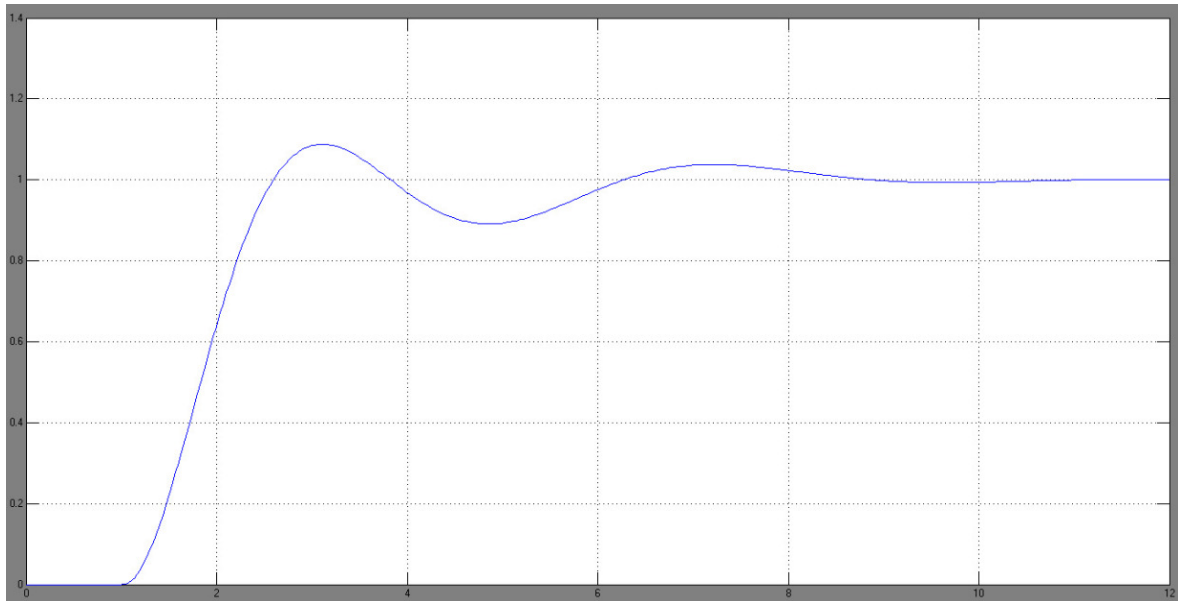


Рис. 2.3. Перехідний процес нескорегованої системи

Отже, потрібно виконати налаштування системи за допомогою виконання синтезу підсилювача та корегуючих пристроїв k_p , k_i , k_d , T_d .

Також потрібно виконати підбір параметрів, використовуючи NCD-блок, з'єднаний з виходом системи, оскільки реакція системи на одиничний ступінчастий стрибок у даній моделі і є сигналом, що контролюється (тобто її перехідною функцією ПФ).

По-перше, потрібно задати початкові коефіцієнти та налаштувати параметри блоку Signal Constraint. Отримані значення представлені на рис. 2.4.

	Variable	Value	Minimum	Maximum	Scale
<input checked="" type="checkbox"/>	Td	0.9	-Inf	Inf	1
<input checked="" type="checkbox"/>	kd	0.3	-Inf	Inf	0.5
<input checked="" type="checkbox"/>	ki	0.5	-Inf	Inf	0.5
<input checked="" type="checkbox"/>	kp	1	-Inf	Inf	1

Рис 2.4. Налаштування параметрів блоку Signal Constraint

Далі потрібно виконати оптимізацію. Оптимізація в проекті виконана з урахуванням стабільної роботи системи. Метою оптимізації є синтез таких параметрів коригуючих пристроїв, за яких обрані показники якості системи будуть набувати бажаних характеристик перехідного процесу.

Тому важливо задати ці бажані характеристики перехідного процесу та показники оптимізації (рис 2.5).

The dialog box contains the following settings:

- Include step response bound in assertion
- Step time (seconds): 0
- Initial value: 0
- Final value: 1
- Rise time (seconds): 3
- % Rise: 90
- Settling time (seconds): 5
- % Settling: 5
- % Overshoot: 10
- % Undershoot: 2
- Enable zero-crossing detection

Buttons: Show Plot, Show plot on block open, Response Optimization..., OK, Cancel, Help, Apply.

Рис. 2.5. Налаштування характеристик перехідного процесу

Далі можливо знайти коефіцієнти, підбір яких буде виконуватись за заданими параметрами перехідного процесу. Результат оптимізації представлений у вигляді графіку на (рис. 2.6).

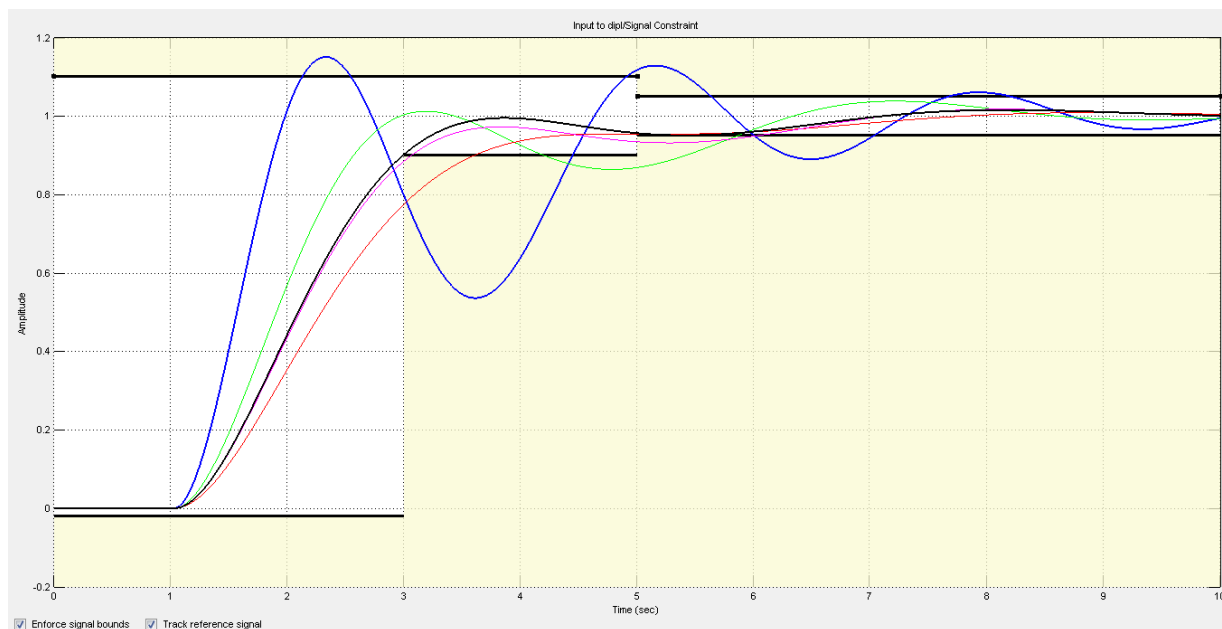


Рис. 2.6. Оптимізація перехідного процесу

В результаті оптимізації були отримані такі значення параметрів підсилювача та коригуючих пристроїв:

- $k_p = 0.4205$;
- $k_i = 1.3792$;

– $k_d = 0.3556$;

– $T_d = 0.8965$.

	Variable	Value	Minimum	Maximum	Scale
<input checked="" type="checkbox"/>	Td	0.8965	-Inf	Inf	1
<input checked="" type="checkbox"/>	kd	0.3556	-Inf	Inf	0.5
<input checked="" type="checkbox"/>	ki	1.3792	-Inf	Inf	2
<input checked="" type="checkbox"/>	kp	0.4205	-Inf	Inf	0.5

Рис. 2.7. Результати підбору параметрів з використанням блоку Signal Constraint

Отримані параметри підсилювача та коригуючих пристроїв використовуються далі для аналізу перехідного процесу.

Налаштувавши підсилювач та коригуючий пристрій за цими параметрами, був отриманий перехідний процес, що задовольняє заданим критеріям якості (рис. 2.8).

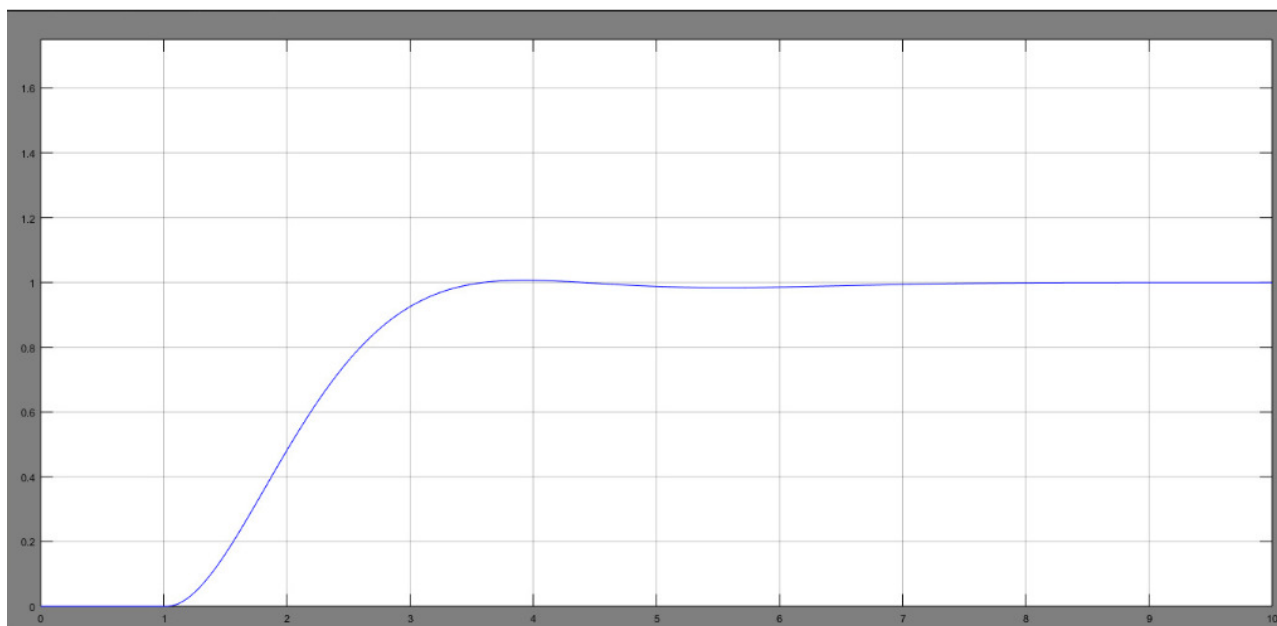


Рис. 2.8. Перехідний процес скорегованої системи

Висновки до розділу 2

Отже, в даному розділі дипломного проекту з використанням технології NCD(Nonlinear Control Design) були розраховані параметри підсилювача та коригуючих пристроїв. Інструментальний пакет цієї технології містить в собі графічний інтерфейс користувача, що дозволяє виконувати налаштування параметрів динамічних об'єктів. Це дозволяє отримувати перехідні процеси необхідної якості, налаштовувати параметри нелінійної Simulink-моделі. Вони

можуть бути представлені в якості будь-якої кількості змінних: скаляри, вектори, матриці, тощо. Особливістю цієї технології є те, що в процесі налаштування можуть бути враховані невизначеності параметричного типу математичної моделі, що робить можливим синтез робастних законів керування

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

3.1. Побудова дискретної лінійної стаціонарної математичної моделі САК приводом робота-маніпулятора

Для побудови дискретної лінійної стаціонарної математичної моделі системи автоматичного керування приводом припускається, що всі елементи, які входять до цифрової системи керування (датчик, виконуючий пристрій, сам об'єкт керування, підсилювачі, фільтри електричних сигналів (неперервні та цифрові)) працюють поблизу номінальних (розрахункових) значень параметрів та режимів. Це дозволяє вважати, що їх математичні моделі є лінійними та стаціонарними. Для аналітичного дослідження процесів в цифровій системі керування із лінійними стаціонарними математичними моделями будуть застосовуватись математичні методи дослідження, що засновані на використанні Z – перетворення. Для побудови дискретної лінійної стаціонарної математичної моделі системи автоматичного керування приводом будуть використовуватись таблиці оригіналів і зображень типових функцій, для яких обчислені неперервні перетворення Лапласа та Z – перетворення, а також пакет прикладних програм Matlab.

Проведемо обчислення передавальних функції елементів дискретної лінійної стаціонарної математичної моделі системи автоматичного керування приводом.

Для цього побудуємо математичну неперервну модель об'єкту керування:

$$W_{Hp}(s) = W_3(s)W_4(s)W_5(s),$$

Кафедра СУЛА				НАУ 21 14 87 000 ПЗ			
Виконав	Степанчук М.І.			Розробка цифрової системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора	Літера	Аркуш	Аркушів
Керівник	Тачиніна О.М.					29	43
Консульт.	Тачиніна О.М.				ФАЕТ-401 гр.		
Н-контр.	Дивнич М.П.						
Зав. каф.	Тачиніна О.М.						

де $W_3(s)$ – тиристорний перетворювач;

$W_4(s)$ – фільтр;

$W_5(s)$ – двигун постійного струму.

$$W3=tf([2],[0.015 1])$$

Transfer function:

$$\frac{2}{0.015 s + 1}$$

$$W4=tf([1],[0.03 1])$$

Transfer function:

$$\frac{1}{0.03 s + 1}$$

$$W5=tf([3],[0.6 1])$$

Transfer function:

$$\frac{3}{0.6 s + 1}$$

$$WH=W3*W4*W5$$

Transfer function:

$$\frac{6}{0.00027 s^3 + 0.02745 s^2 + 0.645 s + 1}$$

Обчислюємо період квантування за часом. Для цього необхідно побудувати діаграму Бode (bode WH), припускаючи, що нічого невідомо про верхню частоту корисного сигналу та збурення, а відома лише передаточна функція приведенного неперервного об'єкту керування, шукана частота ω -відповідає точці, в якій амплітуда сигналу на виході у 100 разів менша

порівняно із амплітудою вхідного сигналу приведеного неперервного об'єкту керування в області низьких частот (рис.3.1).

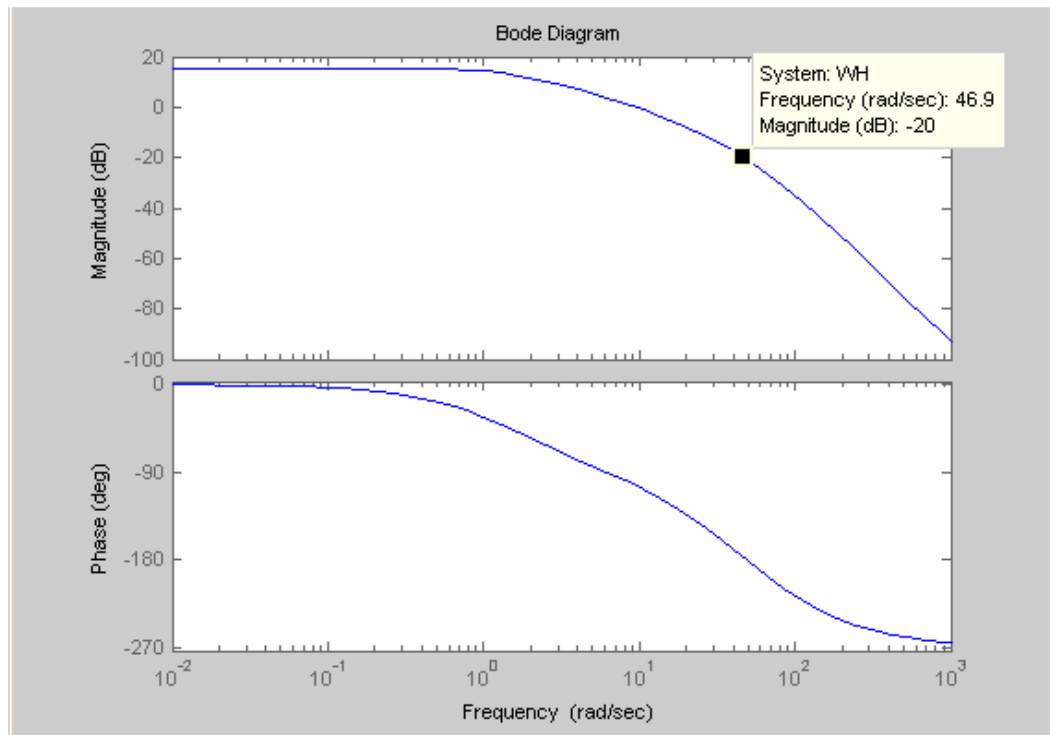


Рис. 3.1. Діаграма Бode

Після цього проводиться визначення частоти в точці де діаграма має нахил -20 db, тобто $\omega=46.9$ рад/сек.

За теоремою Котельникова визначається період квантування за часом:

$$T_0 = \pi / \omega;$$

$$T_0 = \pi / 46.9;$$

$$T_0 = 0.067.$$

Обчислюється дискретна математична модель W_3 :

$$W_3 D = c2d(W_3, T_0)$$

Transfer function:

$$1.977$$

$$z - 0.1115$$

Обчислюється дискретна математичну модель W_4 :

$$W_4 D = c2d(W_4, T_0)$$

Transfer function:

$$0.8928$$

$$z - 0.1072$$

Обчислюється дискретна математична модель W_2 :
 $W_2D=c2d(W_2,T0)$

Transfer function:

$$\frac{0.4245}{\text{-----}}$$

$$z - 0.001233$$

Sampling time: 0.066985

Проводиться побудова математичної неперервної моделі коригуючого пристрою:

$W_2=tf([0.42505],[0.01 1])$

Transfer function:

$$\frac{0.4205}{\text{-----}}$$

$$0.01 s + 1$$

Обчислюється дискретна математична модель коригуючого пристрою:
 $W_2D=c2d(W_2,T0)$

Transfer function:

$$\frac{0.4205}{\text{-----}}$$

$$z - 0.001253$$

Sampling time: 0.066985

Проводиться побудова математичної неперервної моделі коригуючого пристрою:

$W_8=tf([0.3556],[0.8 1])$

Transfer function:

$$\frac{0.3556}{\text{-----}}$$

$$0.89 s + 1$$

Обчислюється дискретна математична модель коригуючого пристрою:
 $W_8D=c2d(W_8,T0)$

0.8923

$z - 0.1077$

На основі обчислених дискретних передавальних функцій елементів будується імітаційна модель цифрової системи автоматичного керування приводом (рис. 3.4) та здійснюється імітаційне моделювання роботи системи.

Порівняльний аналіз перехідних процесів в аналоговій (рис. 3.2) та цифровій (рис. 3.3) системах автоматичного керування приводом робота-маніпулятора показує, що при переході від нелінійної до цифрової САК, за допомогою Z-перетворень, отримано однакові графіки перехідних процесів. Це доводить, що синтезовані за допомогою NCD технологій параметри коригуючих пристроїв та підсилювача є вірними. А отже, даний метод є можливим у практичному використанні.

Таким чином, розроблена цифрова модель САК приводом робота-маніпулятора побудована правильно.

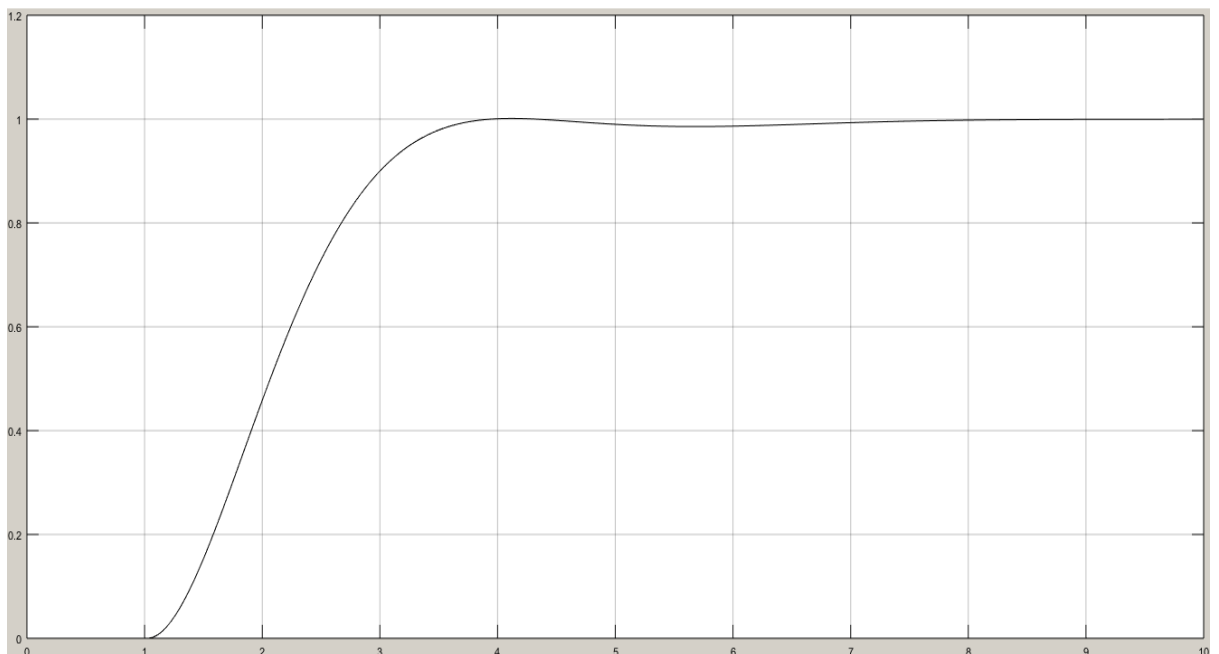


Рис. 3.2. Перехідний процес аналогової САК приводом робота-маніпулятора

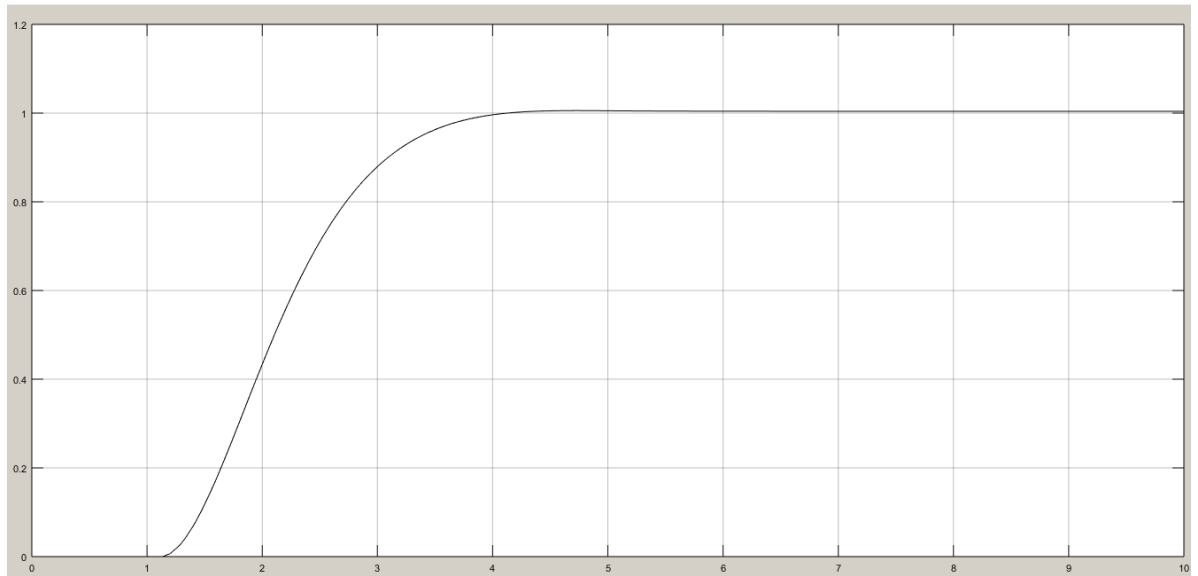
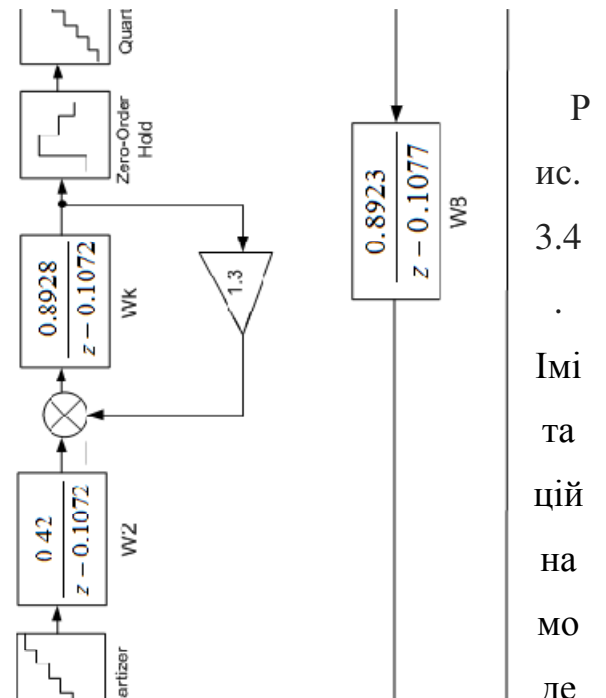


Рис. 3.3. Перехідний процес цифрової САК приводом робота-маніпулятора



3.2 Дослідження системи на стійкість

Стійкість – здатність системи зберігати стан рівноваги при впливі зовнішніх чинників. Лінійна система називається стійкою, якщо при виведенні її зі стану рівноваги (спокою) під дією зовнішніх впливів, вона повертається в нього після припинення дії цих зовнішніх впливів.

Р
ис.
3.4
·
Імі
та
цій
на
мо
де
ль
ци
фр
ов
ої
СА
К
пр
ив
од

Якщо система з часом наближається до стану рівноваги (спокою) або знаходиться в ньому, то така система побудована правильно. А у випадку коли навіть при нульових вхідних сигналах можуть виникати власні коливання, то така система вважається нестійкою. В таких система виникають дуже великі помилки, що є неприпустимим.

Виникає необхідність дослідити дану систему на стійкість. Для цього необхідно знайти передавальну функцію (ПФ) розімкненої САК та побудувати її амплітудно-фазову частотну характеристику (АФЧХ).

Популярним та актуальним в даному випадку є метод побудови моделей «вхід - вихід». Цей метод ґрунтується на визначенні реакції об'єкта на певний сигнал, що є стандартним. Одним з таких сигналів є «одиничний стрибок», що показує миттєву зміну вхідного сигналу з 0 до 1 в момент часу коли $t = 0$. Це найпростіший сигнал, його ще називають одиничний ступінчастий сигнал.

Побудова передавальної функції системи автоматичного керування роботом-маніпулятором необхідна для визначення часу перехідного процесу та перерегулювання. Цей етап буде виконуватись у додатку Matlab Simulink LTI Viewer за допомогою команди «bode», що визначить тип побудови перехідного процесу. Після виконання цього етапу отримано наступний результат (рис. 3.5):

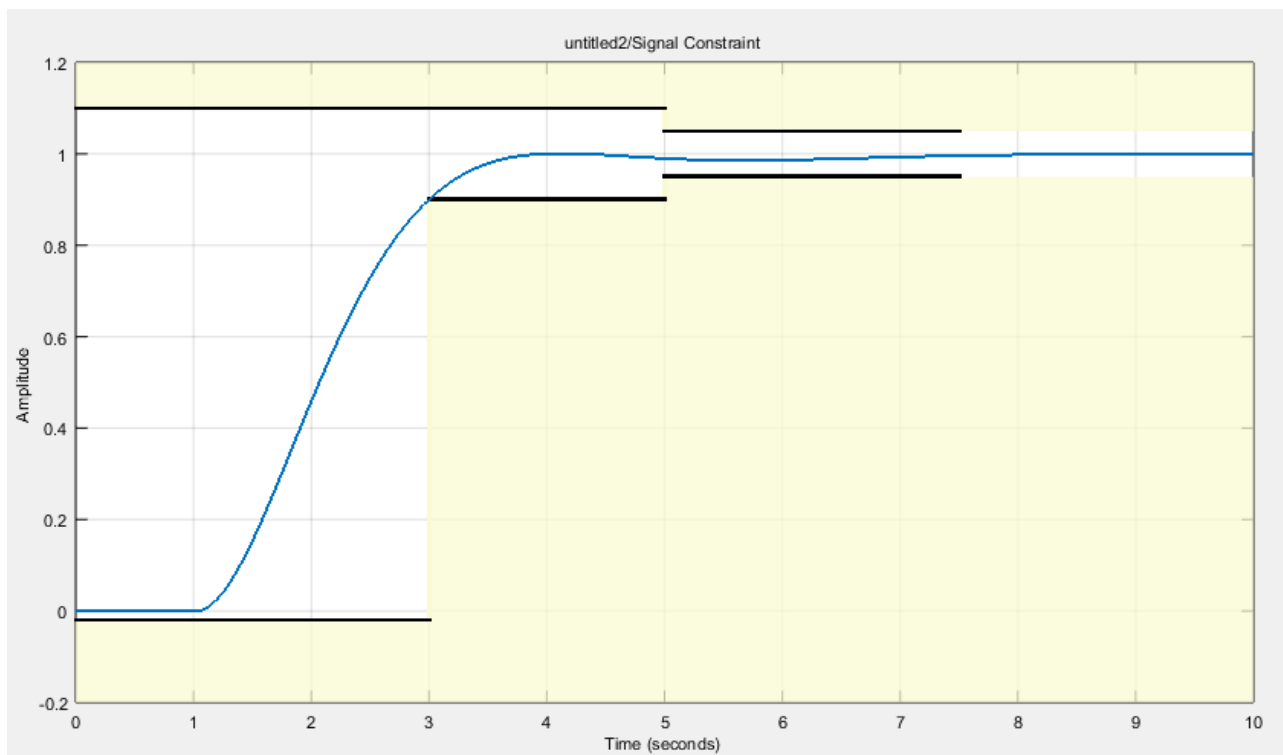


Рис. 3.5. Перехідна функція системи

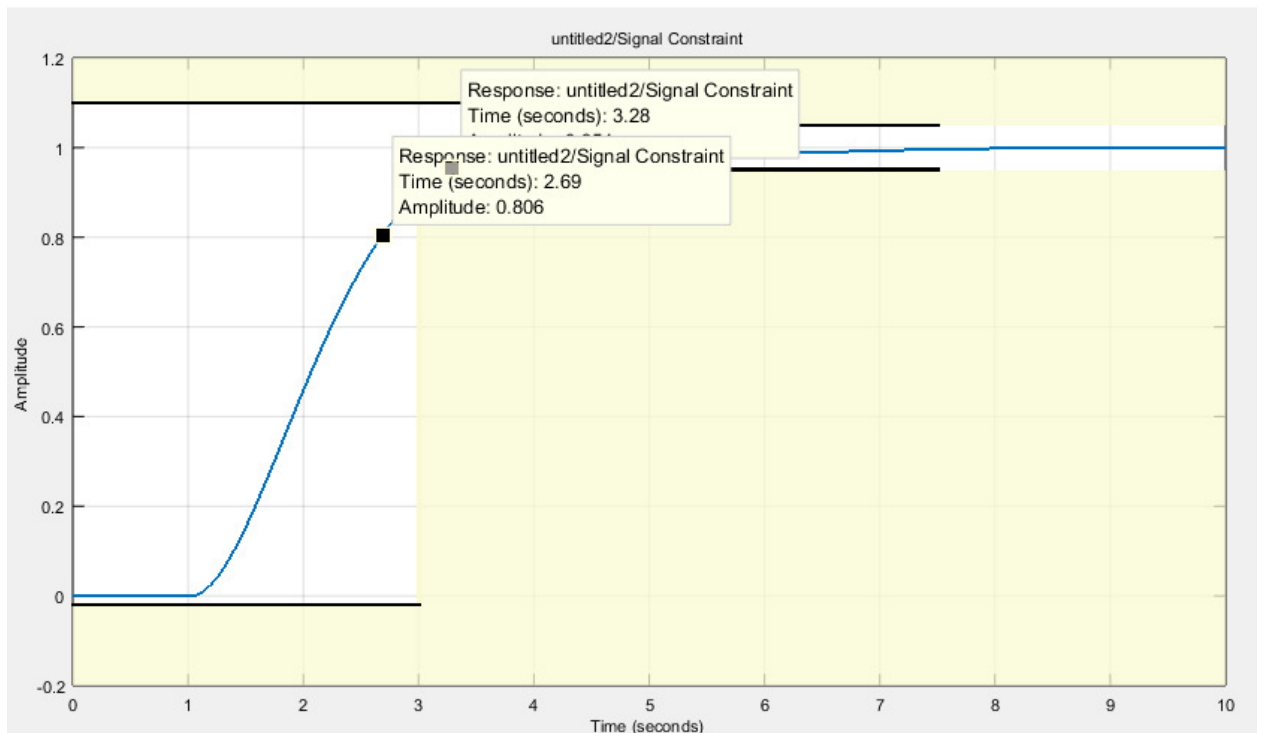


Рис. 3.6. Показники якості перехідного процесу

Знаходяться показники якості перехідного процесу. Відповідно до рис 3.6. отримано наступні значення:

- перерегулювання дорівнює 0;
- час наростання 2,69 с;
- тривалість перехідного процесу – 3,28 с.

Це відповідає заданим параметрам якості.

Далі необхідно визначити передавальну функцію, що є еквівалентною, проте вже для замкнутої та скоригованої системи. Щоб досягти цієї мети, застосуються найпростіші перетворення. Для побудови такої передавальної функції системи між заданими входом і виходом необхідно виконати перетворення структурної схеми з метою отримання в кінцевому результаті лише одного блоку з вже відомою передавальною функцією. Тому далі використовуються структурні перетворення.

Передавальна функція з паралельним з'єднанням дорівнює сумі початкових передавальних функцій, а з послідовним, відповідно, добутку.

Результат таких перетворень представлено на рис. 3.7., де рис. 3.7, а та

рис. 3.2, б відповідають перетворенню з паралельним з'єднанням, а рис. 3.7, в та рис. 3.2, г - з послідовним.

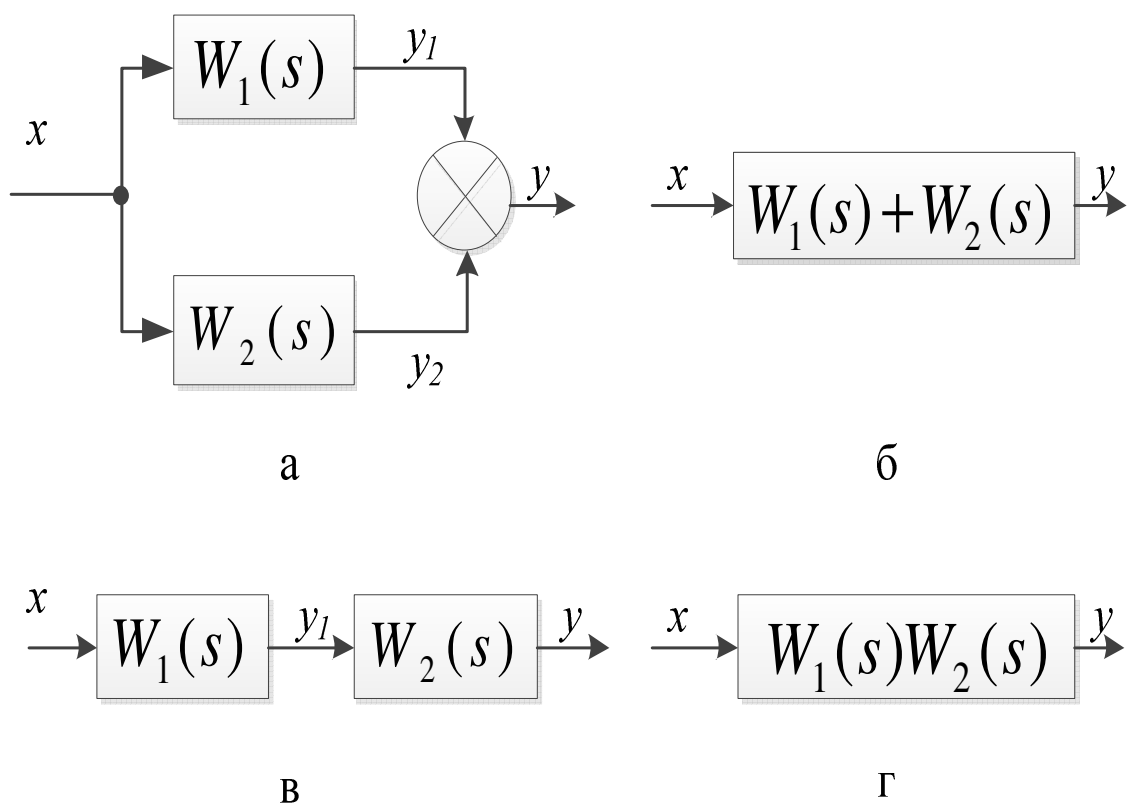


Рис. 3.7. Еквівалентні перетворення: паралельне з'єднання (а,б), послідовне з'єднання (в,г)

Хід перетворень для розімкненої системи представлено на рис. 3.8:

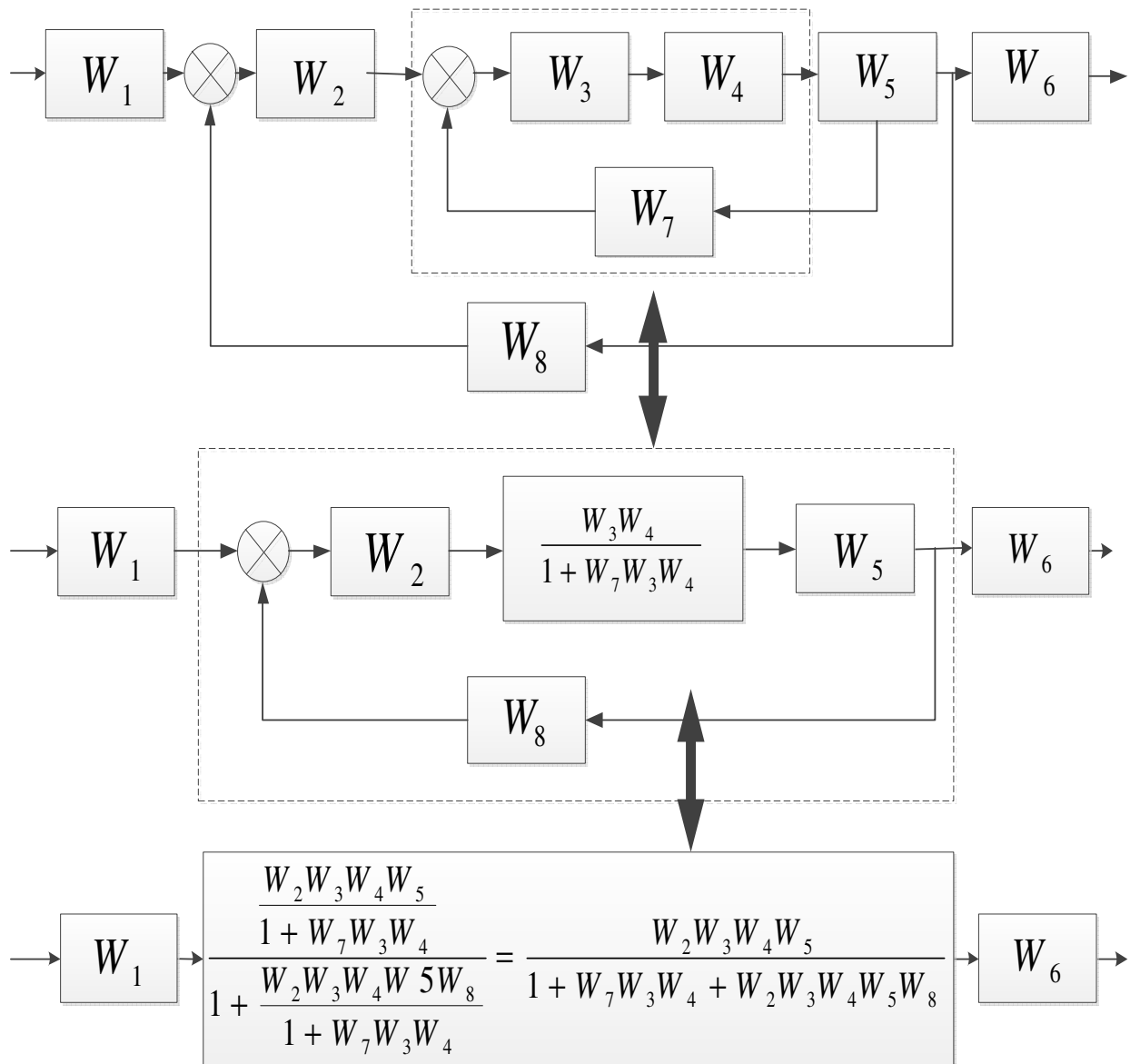


Рис. 3.8. Хід еквівалентних перетворень розімкненої САК

Таким чином, в ході всіх дій, отримано передавальну функцію САК, яка має наступний вигляд (3.1):

$$W_{pu} = \frac{W_1 W_2 W_3 W_4 W_5 W_6}{1 + W_7 W_3 W_4 + W_2 W_3 W_4 W_5 W_8}, \quad (3.1)$$

Далі відбувається підставлення вже відомих значень в (3.1). Нижче представлено отриманий результат цієї передавальної функції:

$$W_{pu} = \frac{3,4s^2 + 3,8s + 3,8}{2,43 \cdot 10^{-6} s^6 + 49,3 \cdot 10^{-5} s^5 + 0,03s^4 + 0,2s^3 + 2,7s^2 + 2,9s + 3,7}.$$

Після цього етапу необхідно визначити запас стійкості розімкнутої системи. З цією метою за допомогою LTI Viewer у Simulink буде відбуватися побудова АФЧХ заданої САК. Результат представлено на рис. 3.9.

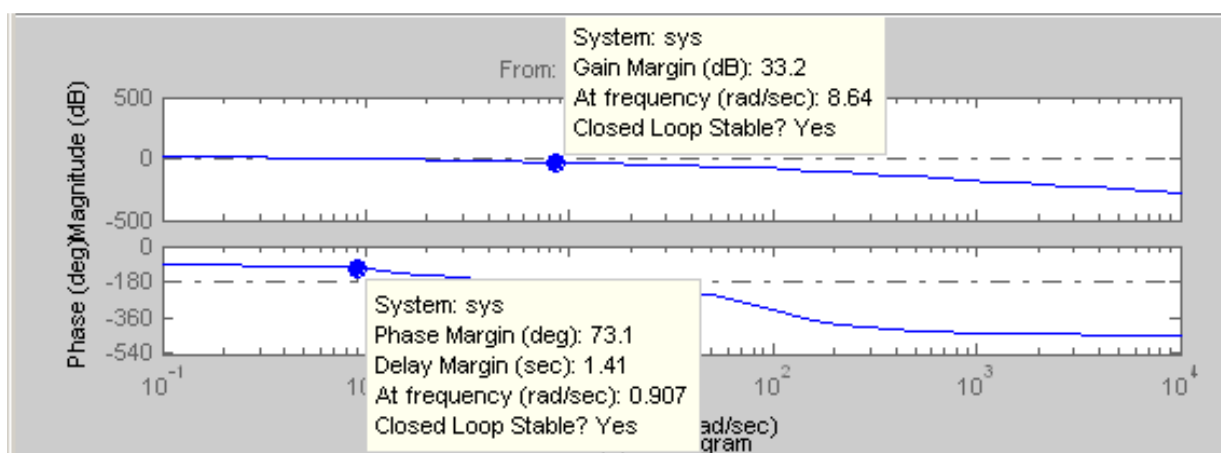


Рис. 3.9. Амплітудно-фазова частотна характеристика САК

Відповідно до графіку, що представлено вище видно система автоматичного керування приводом робота-маніпулятора є стійкою, оскільки:

- запас стійкості по фазі становить $73,1^\circ$;
- запас стійкості по амплітуді складає 33,2 дБ.

Необхідно зазначити, що запас стійкості вважається допустимим, якщо запас стійкості по амплітуді не менш ніж 6 дБ, по фазі не менш ніж 30° .

Висновки до розділу 3

Таким чином, у даному розділі побудовано дискретні лінійні стаціонарні математичні моделі системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора за допомогою таблиць оригіналів та зображень типових функцій, для яких обчислені неперервні перетворення Лапласа та Z-перетворення. Цей метод дослідження дозволяє побудувати імітаційну модель цифрової САК приводом робота-маніпулятора. А отримані однакові графіки перехідних процесів дозволяють використовувати синтезовані параметри для аналогових та цифрових систем автоматичного керування. Синтезована система є стійкою. Тобто її практичне застосування є цілком можливим.

ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломного проекту було проведено аналіз існуючих систем автоматичного керування роботами в промисловості, що вже існують у наш час.

На основі здійсненого аналізу було розроблено структурну схему системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора. Синтезовано та проведено оптимізацію параметрів коригуючих пристроїв та підсилювача системи автоматичного керування згідно з заданими критеріями якості з використанням технологій NCD. Одержані параметри параметри коригуючих пристроїв дали можливість зменшити перерегулювання, час наростання та тривалість перехідного процесу. Отже, були одержані потрібні характеристики перехідного процесу в системі автоматичного керування приводом робота-маніпулятора. Розроблено неперервну та цифрову імітаційні моделі системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора. Для переходу від неперервної до цифрової системи керування із лінійними стаціонарними математичними моделями були використані математичні методи дослідження, що засновані на використанні Z-перетворення.

Проведений порівняльний аналіз імітаційного моделювання роботи неперервної та цифрової систем автоматичного керування приводом робота-маніпулятора показав, що одержані параметри коригуючих пристроїв та підсилювача можуть бути застосованими як для аналогових, так і для цифрових систем автоматичного керування.

Система, одержана в результаті розробки, забезпечує стійкість перехідного процесу системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора та має такі характеристики перехідного процесу, що відповідають бажаним.

Кафедра СУЛА				НАУ 21 14 87 000 ПЗ			
Виконав	Степанчук М.І.			Висновки	Літера	Аркуш	Аркушів
Керівник	Гачиніна О.М.					41	43
Консульт.	Гачиніна О.М.				ФАЕТ-401 гр.		
Н-контр.	Дивнич М.П.						
Зав. каф.	Гачиніна О.М.						

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Лаборатория базовых знаний. – М. : Бином, 2004. – 79 с.
2. Дьяконов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб. : Питер, 2002. – 61 с.
3. Никульчев Е.В. Практикум по теории управления в среде MATLAB: Учебное пособие / Е.В. Никульчев. – М.: МГАПИ, 2002. – 87 с.
4. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание, 2007. – 187 с.
5. Рекомендації щодо розроблення навчальних планів / Уклад. В. П. Головенкін. – К. : Нац. техн. ун-т України «Київ. політех. ін-т», 2012. – 23 с.
6. Репнікова Н. Б. Теорія автоматичного керування: класика і сучасність; підручник / Н. Б. Репнікова. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 328 с.
7. Електромеханічні системи автоматичного керування та електрориводи: навч. посібник / М.Г. Поповіч, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; за ред. М.Г.Поповіча, О.Ю.Лозинського. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
8. Казачковський М.М. Комплектні електроприводи: навч. посібник / М. М. Казачковський. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 226 с.
9. Цвіркун Л. І., Грулер Г. О. Робототехніка та мехатроніка: навчальний посібник. – Д. : Національний гірничий університет, 2007. – 216 с.
10. Lung-Wen Tsai Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. – New York : Wiley, 1999. – 505 p.
11. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напр. «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані Технології» / М.В. Лукінюк ; Нац. техн. ун-т України «Київськ. політехн. ін-т». – К. : КПІ, 2008. – 236 с.
12. Кім Д.П. Теорія автоматичного керування. Том 2. Багатовимірні,

нелінійні, оптимальні й адаптивні системи/ Д.П. Кім. – Фізматліт, 2004. – 32 с.

13. Нікулін О.А. Основи теорії автоматичного управління. Частотні методи аналізу та синтезу систем. / О.А. Нікулін. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.

14. Герасимяк Р. П. Теорія автоматичного керування. Збірник задач: навчальний посібник / Р.П. Герасимяк. – О.: Наука і техніка, 2003. – 108 с.

15. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: Підручник / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – Київ: «Либідь», 2007. – 656 с. - ISBN: 966-06-0447

16. Гоголюк П. Ф. Теорія автоматичного керування: навч. посіб. / П.Ф. Гоголюк, Т.М. Гречин. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. – 280 с. – ISBN: 978-966-553-725-0.

17. Мокін Б. І. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів: навч. посіб. / Б.І. Мокін, В.Б. Мокін, О.Б. Мокін. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2005. – 300 с. – ISBN 966-641-136-9

18. Лешошч О. Л., Крак Ю. В. Елементи теорії керування. Навчально-методичний посібник для студентів факультету кібернетики спеціальності «Інформатика». – К. : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2002. – 85 с.

19. Дубовой В. М., Моделювання та оптимізація систем: підручник / В.М. Дубовой, Р.Н. Кветний, О.І. Михальов, А.В.Усов. – Вінниця: «ТД «Еднльвейс», 2017. – 804 с. – ISBN 97

20. Худайберганов А.П., Черняк А.Я., Лозинский А.С. Справочник молодого слесаря-сборщика летательных аппаратов – М.:Машиностроение, 1987 – 88 с.