

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**П. І. Кравець
В.М. Шимкович
Ю.М. Бердник**

Інформаційно- керуючі системи

Локальні інформаційно-керуючі системи

Лабораторний практикум

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтегровані інформаційні системи»
спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент: *Волокита А. М.*, к.т.н., доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, факультет інформатики та обчислювальної техніки, кафедра обчислювальної техніки

Відповідальний редактор: *Новацький А. О.*, к.т.н., доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, факультет інформатики та обчислювальної техніки, кафедра інформаційних систем та технологій

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського

(протокол № 5 від 26.05.2022 р.)

*за поданням Вченої ради факультету Інформатики та обчислювальної техніки
(протокол № 9 від 11.05.2022 р.)*

Навчальний посібник охоплює теоретичний матеріал та практичні завдання, які необхідні для виконання лабораторного практикуму з дисципліни «Інформаційно-керуючі системи». Практикум виконується у комп'ютерному класі кафедри з використанням «MatLab» та моделюючого пакету MatLab Simulink. В посібнику наводяться рекомендації по використанню цих програмних продуктів та виконанню робіт з наступної тематики: визначення статичних характеристик об'єкта керування, часових та частотних характеристик об'єктів на основі вхідної та вихідної змінних; моделювання систем керування з лінійними регуляторами, релейними регуляторами, цифровими регуляторами, імпульсними регуляторами; побудова і моделювання інваріантних систем керування. В роботі наводяться приклади побудови систем керування з різними регуляторами та приклади побудови статичних та динамічних моделей об'єктів керування.

Робота може бути корисною студентам відповідних спеціальностей при вивченні дисциплін, пов'язаних із використанням регуляторів, а також при виконанні бакалаврських робіт, курсових проектів, магістерських робіт, в яких використовуються відповідні пристрої та системи керування. Останнє було враховано при оформленні роботи, яке виконано згідно вимог до конструкторської документації.

Реєстр. № НП 21/22-493. Обсяг 5,9 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідectво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© П. І. Кравець, В. М. Шимкович, Ю. М. Бердник
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.....	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 Визначення статичних характеристик об'єкта керування	14
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 Побудова часових та частотних характеристик об'єктів на основі вхідної та вихідної змінних.....	29
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 Оцінювання параметричних моделей	38
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 Моделювання систем керування з лінійними регуляторами	51
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 Моделювання систем керування з релейними регуляторами	69
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 Моделювання систем керування з імпульсними регуляторами.....	81
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 Моделювання систем керування з цифровими регуляторами	92
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8 Моделювання систем керування з регулятором змінної структури	103
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9 Інваріантні системи автоматичного керування	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	126
Додаток А – Таблиця варіантів для лабораторної роботи №1 згідно з шифром навчальної групи та номером студента за списком навчальної групи	129
Додаток Б – Таблиця варіантів передавальної функції згідно з шифром навчальної групи та номером студента за списком навчальної групи	139

ВСТУП

Сучасні досягнення інформаційних технологій проектування та реалізації систем управління для різних класів об'єктів і процесів пов'язані з широким впровадженням в практику проектування та реалізації інформаційно-керуючих систем засобів обчислювальної техніки, інструментальних засобів і систем та спеціальних мов і засобів програмування, що регламентуються міжнародними стандартами, а також впровадженням сучасної елементної бази для побудови інформаційно-керуючих систем управління – вільно програмованих контролерів. Використання таких технологій і реалізація на їх основі систем управління різного класу об'єктів потребує фахівців з відповідними знаннями в цій галузі.

Дисципліна «Інформаційно-керуючі системи» входить у комплекс наскрізної безперервної технічної підготовки спеціалістів з освітньої програми «Інтегровані інформаційні системи» спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» і є частиною навчального плану 6-7-го учебного семестрів. В структурно-логічній схемі навчання дисципліна «Інформаційно-керуючі системи» входить в цикл навчальних дисциплін «Проектування інформаційних систем та технологій» і вивчається на етапі підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр». Вивчення дисципліни базується на знаннях, навичках та уміннях, отриманих під час вивчення студентами дисциплін математичного циклу, теорії систем, моделювання процесів та систем, теорії автоматичного керування, алгоритмічного та програмного забезпечення систем управління.

Основна мета вивчення дисципліни – придбання знань, початкового досвіду і умінь застосування сучасних методів і засобів побудови, моделювання та реалізації інформаційно-керуючих систем та їх елементів. В результаті вивчення дисципліни студент повинний знати особливості різних типів інформаційно-керуючих систем та отримати уміння розробляти такі

системи, використовуючи для цього сучасні засоби автоматизації їх проектування.

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Посібник призначений для виконання лабораторних робіт з навчального компоненту «Локальні інформаційно-керуючі системи», дисципліни «Інформаційно-керуючі системи». Він складається з дев'яти тем лабораторного практикуму, де для кожної із тем систематизовані теоретичні матеріали, приклади технічної реалізації, завдання, методики виконання роботи та рекомендована література.

Базами для самостійної роботи служать навчальні дисципліни «Основи інформаційних систем», «Теорія автоматичного управління», курс лекцій з дисципліни «Інформаційно-керуючі системи», освітнього компонента «Локальні інформаційно-керуючі системи» і рекомендована навчальна література.

В процесі вивчення даної навчальної дисципліни студенти засвоюють основні принципи побудови інформаційно-керуючих систем, їх архітектуру та засоби реалізації, алгоритми функціонування, технології моделювання та налагодження.

В лабораторному практикумі основна увага приділяється створенню та дослідженню базових компонентів інформаційно-керуючих систем - моделей об'єктів управління та регулюючих пристроїв і систем керування на їх основі. В процесі виконання робіт студенти вивчають технології побудови статичних та динамічних моделей об'єктів управління і роботу з ними, вивчити основні типи регуляторів, знати математичні рівняння, що описують роботу регуляторів, їх передавальні функції і перехідні характеристики, вивчити структуру регуляторів і їх програмну реалізацію з необхідними динамічними характеристиками, набути практичних навичок з розрахунку оптимальних параметрів налаштування регуляторів відповідно до заданих критеріїв якості роботи системи керування.

При вивченні конкретної теми слід уважно ознайомитися з поставленим завданням, підібрати літературу для самопідготовки, ретельно пропрацювати матеріали лабораторного практикуму по цій темі, доповнюючи їх змістом рекомендованої літератури.

Лабораторний практикум відпрацьовується студентами групи індивідуально, кожний студент отримує індивідуальне завдання. Протягом всього практикуму студенти виконують всі заплановані лабораторні роботи одну за одною: кожна робота – окреме зайняття.

Перед початком виконання лабораторної роботи студенти мають самостійно (до початку занять) ознайомитись з порядком виконання на поточну роботу, засвоїти математичний апарат, план виконання та свій варіант до цієї роботи.

Кожна практична робота лабораторного практикуму оформляється у вигляді звітнього документу.

Звіт по роботі формулюється на основі протоколу, який ведеться під час виконання поточної роботи та результатів домашньої (теоретичної, математичної) підготовки.

Звіт повинен містити наступні розділи:

- стандартний титульний лист (із назвами: ВНЗ, факультету, кафедри; темою та номером поточної роботи; номером групи та П.І.Б. виконавця; П.І.Б. викладача що перевірятиме роботу);
- назва та мета роботи;
- завдання до роботи;
- початкові дані варіанту досліджень;
- тези теоретичних відомостей (опорні формули, визначення);
- проміжні математичні розрахунки, математичні моделі систем;
- результати моделювання у вигляді отриманих параметрів коефіцієнтів, функцій, графіків, гістограм, таблиць тощо;
- порівняння теоретичних та практичних результатів;
- обов'язково висновки про результати досліджень;

Сучасні інформаційно-керуючі системи (ІКС) можуть мати складну архітектуру. На рисунку 1 показана архітектура такої складної ІКС управління підприємством. Система має п'ять рівнів ієрархії 1...5. Перший рівень називають «польовим» і він включає в себе датчики і виконавчі органи, що встановлені на об'єкті управління. Другий рівень – рівень промислових контролерів PLC, що організовують локальні замкнуті системи управління окремими елементами або процесами об'єкта управління. Третій рівень називають операторським. На цьому рівні, реалізованих на основі комп'ютерів (в тому числі і промислових), організовується людино-машинний інтерфейс НМІ оператора, обробка, зберігання і передача інформації про стан і функціонування ОУ на вищі рівні ієрархії системи і отримання від них завдань керування ОУ. Рівні 4 і 5 є організаційними. Четвертий MES – рівень керування виробничими процесами. П'ятий ERP – рівень планування і організації виробництва. Всі рівні об'єднані між собою відповідними інформаційними мережами, вибір яких визначається кількістю і часом обміну інформацією.

Основною частиною такої складної ІКС (в принципі і ІКС будь-якої складності) є перших три рівні, а власне підсистема, що керує окремими об'єктами і процесами, реалізується в основному першим і другим рівнями.

З точки зору теорії автоматичного управління (ТАУ) системи керування окремими агрегатами або процесами відносяться до локальних систем автоматичного управління (САУ) узагальнена структурна схема якої показана на рисунку 2, де основними елементами є пристрій (ЗП), що формує завдання управління, датчик чи датчики регульованого параметра (Д), елемент порівняння (ЕП), що формує сигнал помилки управління з відповідним знаком, власне регулюючий пристрій (РП), що обробляє і перетворює сигнали помилки в вихідні сигнали управління, виконавчий пристрій

(ВП), що перетворює сигнали управління регулятора у відповідну силову дію, здатну управляти об'єктом.

В сучасних ІКС елементи такої САУ ЗП, ЕП, РП реалізуються програмним шляхом промисловими контролерами PLC, тобто на другому рівні. Цю частину САУ в подальшому будемо розглядати як автоматичний регулятор (АР), який є основною складовою локальної ІКС.

Історично, на різних етапах розвитку систем локальної автоматики, регулятори реалізовувалися по різному на тогочасній елементній базі і на сьогодні класифікуються за різними ознаками.

Відповідно до загальної класифікації регуляторів, показаної на рисунку 3, їх можна розділити за принципом налаштування на АР з детермінованим налаштуванням і АР з самоналаштуванням. Параметри налаштування першого типу регуляторів задаються жорстко і не змінюються в процесі роботи, як би не змінювалися параметри об'єкту і збурення в системі. Налаштування другого типу регуляторів можуть змінюватися автоматично.

АР з детермінованим налаштуванням, у свою чергу, діляться на регулятори прямої і непрямої дії. Регулятори прямої дії управляють ОУ за рахунок енергії, що отримується від регульованого середовища, в регуляторах непрямої дії АР управляє енергією, що поступає від стороннього джерела.

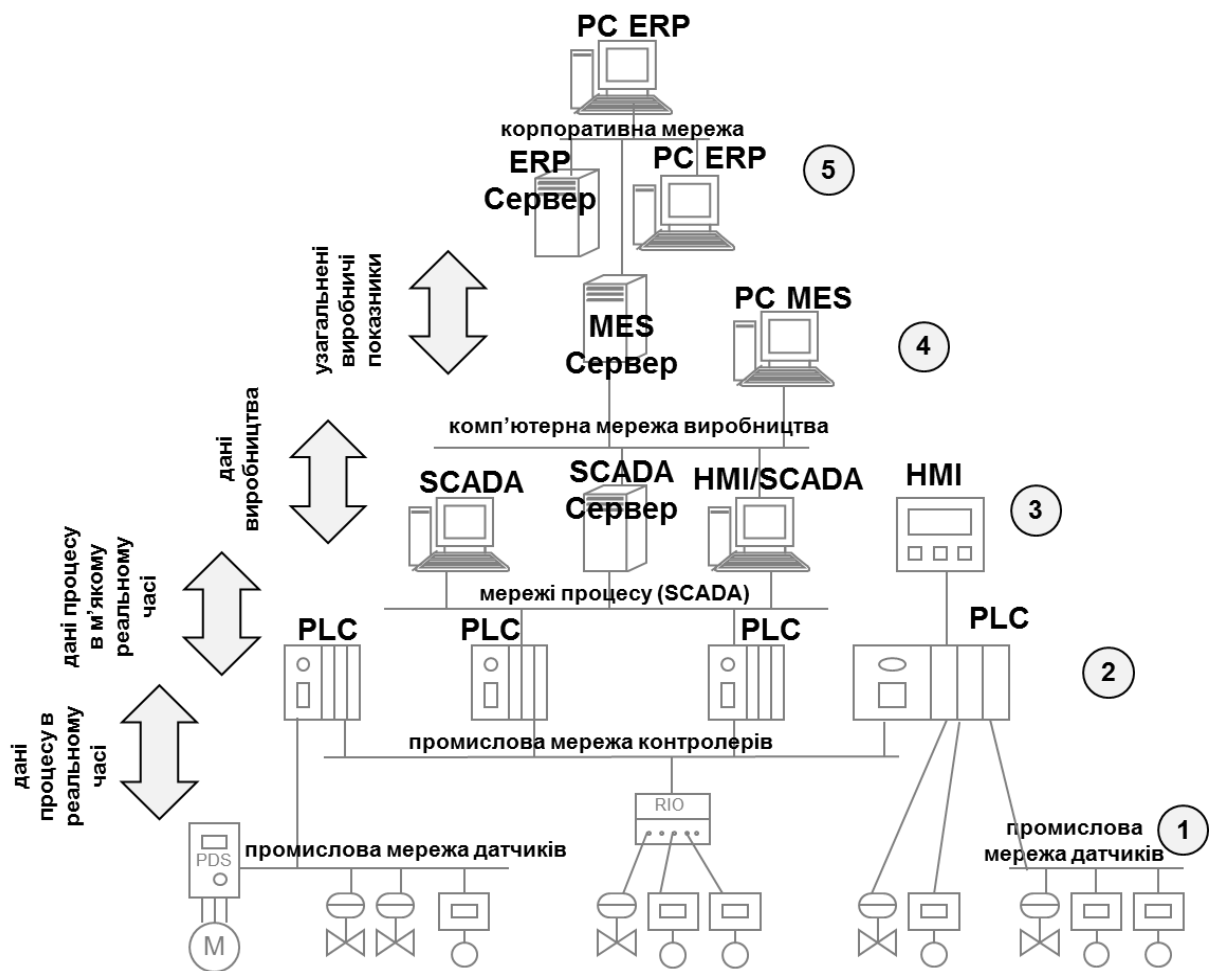


Рисунок 1 – Архітектура складної ІКС управління підприємством

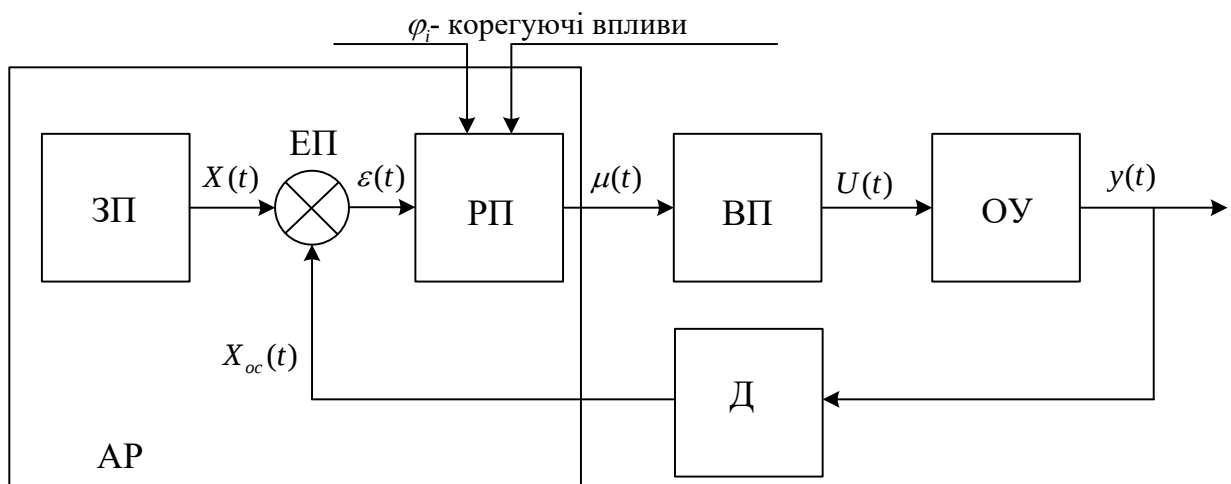


Рисунок 2 – Узагальнена структурна схема САУ : $X(t)$ – задання; $\varepsilon(t)$ – помилка регулювання; $X_{oc}(t)$ – сигнал зворотного зв'язку; $\mu(t)$ – регулюючий вплив; $U(t)$ – силовий регулюючий вплив; $y(t)$ – регульований параметр.



Рисунок 3 – Класифікація АР

Залежно від характеру впливу на об'єкт розрізняються регулятори безперервної і дискретної дії. Перші забезпечують безперервні зміни регулюючого впливу, другі змінюють регулюючий вплив тільки в певні моменти часу, в інтервалі між якими він постійний.

Безперервні регулятори можуть мати лінійну і нелінійну характеристику і поділятися на лінійні і нелінійні.

Дискретні АР залежно від виду квантування вхідного сигналу, у свою чергу, поділяються на релейні, імпульсні і цифрові.

АР з самоналаштуванням можна розділити на два класи: екстремальні і адаптивні. Екстремальні працюють на ділянці характеристики з чітко вираженим екстремумом та забезпечують мінімальне значення регульованого параметра. Адаптивні перебудовують свої параметри або навіть структуру залежно від величини збурень і стану параметрів об'єкту.

Окрім приведеної класифікації існують також інші, що використовують різноманітні класифікаційні ознаки [15, 18, 27, 29, 30].

Залежно від роду споживаної енергії АР діляться на електричні, пневматичні і гідравлічні. У цих регуляторах відповідно використовуються три види носіїв енергії: електричний струм, стисле повітря і рідина (спеціальне масло) під тиском. Застосування різних джерел енергії зумовлює і види сигналів носіїв інформації. Використання кожного з цих носіїв має свої переваги і недоліки.

Електричні регулятори набули значного поширення, оскільки мають практично необмежений ресурс застосування та дозволяють легко та швидко виконувати математичні операції (підсилення, сумування, інтегрування, диференціювання).

Істотні переваги пневматичних регуляторів – вибухо- і пожежобезпека, висока швидкість і надійність виконавчих пристроїв. У нашій країні розроблена і освоєна «Універсальна система елементів промислової пневмоавтоматики» (УСЕППА), яка має повний функціональний набір елементів, що дозволяє побудувати будь-який керуючий пристрій безперервного або безперервно-дискретного впливу.

Гідравлічні регулятори застосовуються головним чином там, де необхідне швидке відпрацювання потужного вихідного сигналу. До переваг цих регуляторів слід віднести їх простоту, надійність роботи, нечутливість до вібрацій і зручність перетворення енергії стисненої рідини в зусилля без застосування проміжних механізмів. При тій же масі і габаритних розмірах потужність гідравлічного ВП у декілька разів вища електричного або пневматичного.

Переваги регуляторів з різними видами носіїв енергії стали причиною створення комбінованих регуляторів. Тепер найчастіше використовуються електропневматичні і електрогідравлічні регулятори, в яких ЗП, Д і РП є електричними, а ВП – пневматичними або гідравлічними.

По потужності виконавчих пристроїв АР поділяються на регулятори малої потужності (до 50 Вт), середньої потужності (до 500 Вт) і великої потужності (понад 500 Вт). Залежно від виду вирішуваних завдань АР

призначаються для стабілізації регульованого параметра, для регулювання співвідношення двох і більше змінних, для застосування в каскадних системах регулювання, для використання в супервізорному режимі. Крім того, усі АР поділяються на спеціалізовані та універсальні загальнопромислового застосування.

Відповідно до числа регульованих величин регулятори поділяються на одноканальні і багатоканальні.

Ознака покоління чітко проявляється в електричних регуляторах. Тут можна виділити чотири покоління регуляторів.

До першого покоління відносяться регулятори, у яких основу функціональних вузлів складають електронні лампи. Прикладом можуть бути електронні регулятори типу ЕР, БРМ-П, БРМ-21, регулятори уніфікованої системи автоматичного контролю і регулювання (УСАКР) та ін.

Регулятори другого покоління побудовані на напівпровідникових елементах, наприклад, регулятори системи «Каскад».

Регулятори третього покоління виконуються на мікросхемах. До них відноситься агрегатний комплекс електричних засобів регулювання (АКЕЗР) в мікроелектронному виконанні. На базі пристроїв цього комплексу можна побудувати різноманітні системи регулювання і управління технологічними процесами від простих сигналізаторів і позиційних регуляторів до великих і складних САУ з автоматичним налаштуванням статичних і динамічних параметрів через зміну топологічної структури.

Регулятори четвертого покоління побудовані на мікропроцесорних пристроях. Для цього використовуються універсальні мікропроцесорні комплекти інтегральних схем. Основна перевага мікропроцесорних регуляторів – їх гнучкість в зміні алгоритмів регулювання. Детальніше з питаннями побудови мікропроцесорних пристроїв можна ознайомитися в [1, 6, 7, 15, 18, 21, 22, 27, 29, 30].

Сучасні регулятори реалізуються програмно в спеціальних промислових контролерах, реалізованих на базі мікропроцесорної техніки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Визначення статичних характеристик об'єкта керування

Мета роботи: Побудувати та дослідити просту регресійну модель об'єкта керування.

Короткі теоретичні відомості

Експеримент – форма пізнання об'єктивної дійсності, один з основних методів наукового дослідження, в якому вивчення явищ відбувається в доцільно вибраних або штучно створених умовах, що забезпечують появу тих процесів, спостереження яких необхідне для встановлення закономірних зв'язків між явищами [1,2].

Експерименти бувають двох видів:

- пасивний експеримент
- активний експеримент

Пасивний експеримент

При пасивному експерименті інформація про досліджуваний об'єкт накопичується шляхом пасивного спостереження, тобто інформацію отримують в умовах звичайного функціонування об'єкта. Активний експеримент проводиться з застосуванням штучного впливу на об'єкт за спеціальним алгоритмом.

При пасивному експерименті існують лише фактори у вигляді вхідних контрольованих, але некерованих змінних, і експериментатор знаходиться в становищі пасивного спостерігача. Завдання планування в цьому випадку зводиться до оптимальної організації збору інформації та вирішення таких питань, як вибір кількості та частоти вимірювань, вибір методу обробки результатів вимірювань.

Найчастіше метою пасивного експерименту є побудова математичної моделі об'єкта, яка може розглядатися або як добре, або як погано організований об'єкт. У добре організованому об'єкті мають місце певні процеси, в яких взаємозв'язок вхідних і вихідних параметрів встановлюється

у вигляді детермінованих функцій. Тому такі об'єкти називають детермінованими. Погано організовані або дифузні об'єкти є статистичними моделями. Методи дослідження з використанням таких моделей не вимагають детального вивчення механізму процесів і явищ, що протікають в об'єкті.

Прикладом пасивного експерименту може бути аналіз роботи схеми, яка не має входів, тільки виходи, і вплинути на її роботу неможливо. Яскравим прикладом пасивного експерименту з дифузним об'єктом є вимірювання метеорологічних параметрів (температури, швидкості вітру і т.д.) під час природних катаклізм.

Активний експеримент

Активний експеримент дозволяє швидше й ефективніше вирішувати завдання дослідження, але більш складний, вимагає великих матеріальних витрат і може перешкодити нормальному ходу технологічного процесу. Іноді відсутня можливість проведення активного експерименту (наприклад, при дослідженні явищ природи). Проте, враховуючи переваги активного експерименту, тоді, коли це можливо, перевагу віддають йому. При активному експерименті фактори повинні бути керованими і незалежними.

Активний експеримент припускає можливість впливу на хід процесу і вибору в кожному досліді різних факторів впливу. При плануванні активного експерименту вирішується завдання раціонального вибору факторів, що істотно впливають на об'єкт дослідження, і визначення відповідного числа проведених дослідів. Збільшення числа включених у розгляд чинників призводить до різкого зростання числа дослідів, зменшення – до істотного збільшення похибки дослідів. Фактор вважається заданим тільки тоді, коли при його виборі вказується його область визначення – сукупність значень, які може приймати даний фактор. В експерименті використовується обмежена частина області визначення, що задається зазвичай у вигляді безлічі дискретних рівнів. Вибрані фактори повинні бути однозначно керованими і операційним, тобто піддаються регулюванню з підтриманням на заданому

рівні протягом всього досліді при дотриманні послідовності необхідних для цього дій.

Методи планування експерименту

При моделюванні використовують пасивний і активний експерименти.

Пасивний експеримент характерний тим, що при ньому відсутня можливість вибирати умови досліді за власним розсудом і встановлювати значення факторів у кожному досліді.

Вибір виду залежності вихідного параметра макромоделі y (у загальному випадку розглядається вектор вихідних параметрів y) від зовнішніх параметрів, об'єднаних у вектор факторів Q , здійснюється проектувальником.

Звичайно в методах планування експерименту використовують лінійні

$$y = AQ \quad (1.1)$$

або квадратичні моделі

$$y = AB \quad (1.2)$$

де A – вектор-рядок коефіцієнтів (параметрів) моделі; Q – вектор, що включає фактори q_k , ті чи інші добутки з двох, трьох і більше факторів і, можливо, квадрати факторів $q_k^2, k = \overline{1, p}$; p – число факторів.

Число дослідів N , як правило, повинне перевищувати число обумовлених параметрів вектора A . Параметри розраховують за МНК, тобто з умови мінімізації суми квадратів відхилень значень $\tilde{y}_l$, знайдених за рівнянням моделі, і обмірюваних значень

$$y_l = \min \sum_{l=1}^N (\tilde{y}_l(A) - y_l^2), \quad (1.3)$$

де l – номер досліді.

Перевага активних експериментів перед пасивними полягає в тому, що відкривається можливість одержання оптимального розташування області адекватності, у її збільшеному обсязі, у спрощенні оцінок точності і т.п.

Регресивний аналіз

Зв'язок між y і Q може бути не функціональним, а статистичним, що особливо характерно при пасивних експериментах. Для одержання моделі в такій ситуації часто застосовують регресивний аналіз. Модель шукаємо у формі рівняння регресії (1.1), в якому роль коефіцієнтів a_k у векторі A виконують коефіцієнти відносної регресії.

Алгоритм обчислення a_k :

1) За результатами пасивних експериментів одержують оцінки математичних очікувань M_y , M_x , середньоквадратичних відхилень відповідно для вихідного y і зовнішніх q_k параметрів, а також коефіцієнти кореляції r_k між y і q_k , що утворюють вектор R , і коефіцієнти кореляції α_{kj} , між факторами і q_j , що утворюють матрицю D .

2) Розв'язуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$D\eta = R \quad (1.4)$$

і отриманий вектор $\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_p)$ використовуємо при розрахунку відносних коефіцієнтів регресії за формулою

$$a_k = \eta_k \sigma_y / \sigma_k. \quad (1.5)$$

У випадку, якщо фактори q_k некорельовані, то D – одинична матриця і немає необхідності вирішувати систему (1.4), тому що

$$\eta_k = r_k.$$

Експериментальне визначення оптимальних параметрів світлотехнічних і електротехнічних пристроїв методом градієнтного спуску. Побудова багатофакторного експерименту.

Через відсутність точної математичної моделі пошук конструктивних та інших параметрів, забезпечення максимального наближення до ідеальних лампових або вольт-секундних характеристик запобіжників можливо тільки на основі експерименту. Розглянемо розв'язання задачі оптимального планування експерименту. Для її вирішення скористаємося методом градієнтного спуску. Відповідно до цього методу для руху до оптимуму

вибираємо найкращий локальний напрямок найшвидшої зміни функції (тобто за градієнтом).

Для вибору кроку ітерації можна використовувати числа Фібоначчі, що дозволяє істотно скоротити обсяг обчислень у порівнянні з методом золотого перетину, розділення відрізка навпіл та ін. Для ілюстрації методу розглянемо функцію $\Phi(x_1, \dots, x_n)$, що залежить від параметрів, де Φ_0 – задане значення, яке потрібно одержати при проектуванні нового виду освітлювача.

Тоді поставлена задача може бути сформульована як задача вирішення отриманого на основі експерименту нелінійного рівняння

$$\hat{O}(\tilde{o}_1, \dots, \tilde{o}_n) - \hat{O}_0 = 0, \quad (1.6)$$

де $\Phi(x_1, \dots, x_n)$ – реально існуюча, але невідома нам складна функціональна залежність, окремі значення якої будемо встановлювати експериментально.

Вирішення рівняння (1.6) доцільно звести до задачі мінімізації функції декількох змінних

$$F = [\hat{O}(\tilde{o}_1, \dots, \tilde{o}_n) - \hat{O}_0]^2 = F(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1.7)$$

Пошук глобального мінімуму функції (1.7) дозволив би розв'язати тим самим рівняння (1.6). Тому будемо вирішувати наступну задачу оптимізації:

$$\min F(x_1, \dots, x_n)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \in X,$$

де x – область визначення функцій (1.6) і (1.7).

Для вирішення задачі (1.7) звернемося до одного з методів спуску. Сутність цього методу полягає в тому, що при заданому наближенні визначається будь-який напрямок, в якому функція спадає, і здійснюється переміщення наближення у цьому напрямку. Наближення оцінюємо у вигляді:

$$\vec{x}^{m+1} = \vec{x}^m - \alpha_m \text{grad} F(\vec{x}^m), \quad (1.8)$$

значення α_m знаходимо з умови:

$$\psi^*(\alpha_m^*) = \min F[\vec{x}^m - \alpha_m \text{grad} F(\vec{x}^m)]. \quad (1.9)$$

Таким чином, даний алгоритм полягає в послідовній мінімізації функції однієї змінної α_m . Матимемо на увазі, що у виразі (1.8) і (1.9) $\vec{x}^m$ є вектором

$$\vec{x}^m = (x_1^m, x_2^m, \dots, x_n^m).$$

Введемо позначення для допоміжної функції однієї змінної:

$$\psi(\alpha_m) = F[\vec{x}^m - \alpha_m \text{grad}F(\vec{x}^m)]. \quad (1.10)$$

Слід зазначити, що в одержанні повного рішення задачі мінімізації (1.9) немає необхідності. Доцільно досягти лише деякого зсуву у бік мінімуму допоміжної функції однієї змінної і потім перейти до наступного кроку ітераційного процесу. В околиці точки свого мінімуму допоміжна функція однієї змінної змінюється незначно і перебування її точки мінімуму не призведе до істотного зменшення розглянутих значень функції, коли врахувати, що

$$\text{grad}F(x) = \left(\frac{\partial F}{\partial x_1}, \frac{\partial F}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x_n} \right)^T. \quad (1.11)$$

Зважаючи на специфіку нашої функціональної залежності (значення якої встановлюється лише експериментальним шляхом), для перебування часткових похідних за параметрами можна скористатися наближеною формулою

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{F(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) - F(x_1, \dots, x_n)}{\Delta x_i}. \quad (1.12)$$

Для мінімізації функції однієї змінної $\psi(\alpha_m)$ скористаємося планом Фібоначчі пошуку екстремуму, оскільки він вимагає найменшої кількості дій при заданій точності. Задавшись точністю ξ , визначимо α_m з умови

$$u_{l+1} \geq \frac{1}{2\xi},$$

де u_{l+1} – число Фібоначчі, яке розраховуємо за формулою $u_{l+1} = u_l + u_{l-1}$, $u_1 = u_2 = 1$. Знаходимо необхідне число ітерацій для визначення α_m із заданою точністю.

Методика з обробки і планування експерименту на основі ЕОМ

Багато з розглянутих вище методів планування експерименту, що дозволяють одержати оптимальні в деякому плані рішення експериментальних задач, вимагають великого обсягу обчислень. Тому прагнуть максимально використовувати ЕОМ, а в деяких випадках майже повністю автоматизувати експеримент.

Обробка статистичної сукупності даних

При обробці результатів експерименту над n об'єктами $x_1, x_2, \dots, x_n$ однієї генеральної сукупності можна виділити наступні етапи:

- упорядкування за величиною результатів спостережень (складання варіаційного ряду);
- складання статистичного ряду, тобто таблиці емпіричного розподілу;
- побудова гістограмами або полігону емпіричного розподілу;
- обчислення математичного чекання, дисперсії, середньоквадратичного відхилення, коефіцієнтів асиметрії й ексцесу досліджуваної випадкової величини;
- обчислення χ^2 -критерію емпіричного розподілу.

Перераховані етапи обробки дослідних даних можна записати на будь-якій алгоритмічній мові. Однак, незважаючи на існуючі формальні прийоми розбивки діапазону величин, що спостерігаються, при відсутності апріорних даних про їхній закон розподілу важко заздалегідь призначити кількість розрядів статистичного ряду і їх границь. У цьому випадку доцільно автоматизувати роботу з упорядкування і розрахунку повторюваності складових простого варіаційного ряду, а побудову гістограми розподілу здійснювати вручну. З аналогічних міркувань доцільно доручити ЕОМ трудомісткі розрахунки математичних чекань, коефіцієнтів асиметрії й ексцесу, χ^2 -критерію, а статистичну перевірку зі значущістю, що вимагає табличних значень, виконувати окремо.

Апроксимація дослідних даних багаточленом оптимального ступеня

Якщо при апроксимації дослідних даних $y_i = f(x_i)$, $i=1,2,\dots,N$ у вигляді багаточлена:

$$y = b_1 + b_2 x + \dots + b_m x^m \quad (1.13)$$

передбачається, що шукана залежність $f(x)$ може бути точно представлена багаточленом m -ступеня, то виникає задача вибору оптимального ступеня.

Згладжування помилок Δy_i обмірюваних значень y_i за методом найменших квадратів можливо при $m < N-1$.

Якщо вид формули невідомий заздалегідь, то при необхідності підвищити ступінь апроксимуючого багаточлена за методом найменших квадратів потрібно перерахування всіх коефіцієнтів $b_j (j=1,2,\dots,m)$, знайдених для багаточлена ступеня $m-1$.

Представимо шукані залежності $y=f(x)$ у вигляді узагальненого полінома

$$y_i = a_1 \varphi_1(x_i) + a_2 \varphi_2(x_i) + \dots + a_m \varphi_m(x_i) = \sum_{j=1}^m a_j \varphi_j(x_i), \quad (1.14)$$

де $\varphi_j(x_i)$ – базисні поліноми Чебишева, що володіють властивостями ортогональності й нормування:

$$\sum_{i=1}^N \varphi_j(x_i) \varphi_k(x_i) = 0 \quad i=1,2,\dots,m, \quad (1.15)$$

$$\sum_{i=1}^N \varphi_j^2(x_i) = H_j \quad j=1,2,\dots,m \quad (1.16)$$

і дозволяють обчислити коефіцієнти a_j при будь-якому ступені багаточлена за формулою

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \varphi_j(x_i)}{\sum_{i=1}^N \varphi_j^2(x_i)} = \frac{1}{H_j} \sum_{i=1}^N y_i \varphi_j(x_i) \quad (1.17)$$

При цьому передбачається, що обмірювана величина y_i має тільки незалежну і нормально розподілену випадкову помилку Δy_i з однаковою дисперсією при рівноточечних вимірах.

Ступінь апроксимації багаточлена y_i вважається оптимальним при досягненні мінімуму оцінки дисперсії наближення:

$$D_j = \frac{S_j}{N-j-1} = \frac{1}{N-j-1} \sum_{i=1}^N \left[y_i - \sum_{j=1}^m a_j \varphi_j(x_i) \right]^2 = \frac{1}{N-j-1} \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 - \sum_{j=1}^m a_j^2 H_j \right], \quad (1.18)$$

де відповідно до (1.14), (1.16)

$$S_j = \sum_{i=1}^N \left[y_i - \sum_{j=1}^m a_j \varphi_j(x_i) \right]^2 = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \sum_{j=1}^m a_j^2 H_j, \quad (1.19)$$

$j = 1, 2, \dots, m$

якщо сума квадратів відхилень Δy_i від y_i . Базисні поліноми Чебишева обчислюються в два етапи. Спочатку обчислюють поліноми

$$\varphi_1(x_i) = 1; \varphi_2(x_i) = x_i - \bar{x}, \quad (1.20)$$

а потім поліноми вищих ступенів за формулою

$$\varphi_{j-1}(x_i) = \left[x_i - \frac{1}{\sum_{i=1}^N \varphi_i^2(x_i)} \sum_{j=1}^m x_i \varphi_j^2 \right] \varphi_i(x_i) = \frac{H_j}{H_{j-1}} \varphi_{j-1}(x_i). \quad (1.21)$$

Попередньо необхідно визначити

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{in},$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i = a_1. \quad (1.22)$$

Якщо є повторні ($q=1, \dots, n_i$) для кожного $i=1, \dots, N$, досвіду q_k , то знаходять середнє

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} = \sum_{q=1}^{n_i} y_{qi}. \quad (1.23)$$

Відповідно до сказаного обчислювальний алгоритм реалізується в два етапи: спочатку знаходимо $\bar{x}, \varphi_1(x_i), \varphi_2(x_i), H_1, H_2, a_1, a_2, S_1, D_1, S_2, D_2$ за формулами (1.22), (1.20), (1.16), (1.17), (1.19), (1.18), а потім $\varphi_j(x_i), H_j, a_j, S_j, y$ за формулами (1.21), (1.16), (1.17), (1.19).

Метод найменших квадратів

Способом наближення даних безперервної функції є наближення поліномом методом найменших квадратів. Для набору даних:

$$(x_i, y_i)_{i=1,2,\dots,N}$$

Треба знайти поліном степені n

$$p^{(n)}(x) = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \dots + p_n x + p_{n+1}$$

коефіцієнти якого є рішенням наступної задачі мінімізації

$$\min_{p_1, p_2, \dots, p_{n+1}} \sum_{i=1}^N (p^{(n)}(x_i) - y_i)^2$$

Тобто, іншими словами, розшукується поліном, який найменш ухиляється від заданих даних в тому сенсі, що сума квадратів відстаней від заданих точок (x_i, y_i) до $(x_i, p^{(n)}(x_i))$ буде мінімальною.

Степінь полінома повинен бути меншим за кількість заданих точок для того, щоб такий поліном був єдиним. Наприклад, якщо задані три точки, то їх можливо наблизити або поліномом нульового або першого ступеня (пряма), або параболою. Причому, парабола буде точно проходити через три задані точки (сума квадратів відстаней дорівнюватиме нулю), оскільки три коефіцієнти квадратичного полінома однозначно визначаються з трьох умов проходження через задані точки. В даному випадку, ми отримаємо вже не наближення даних, а їх інтерполяцію. На практиці, звичайно використовуються поліноми не дуже високих степенів.

В MATLAB для наближення даних методом найменших квадратів використовується функція `polyfit`, вхідними аргументами якої є вектори даних, а вихідними є вектор коефіцієнтів полінома, починаючи зі старшої степені.

Функція `polyfit` може визиватися також із більшим числом вхідних і вихідних аргументів, що може бути потрібним для покращення якості приближення.

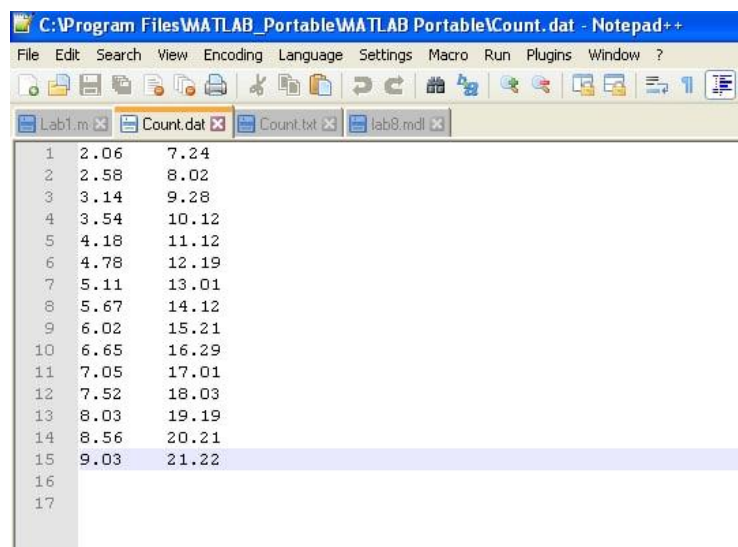
Завдання на лабораторну роботу

1. Варіант завдання обрати з додатка А відповідно до шифру своєї групи та номера у списку групи (вибирати відповідні рядки).
2. Степінь полінома лінійної регресійної моделі обрати рівним 1, 3, 5.
3. Обрахувати лінійну регресійну модель, яка прогнозує значення y по вхідним значенням x поліномами 1, 3 і 5 степеня.
4. Побудувати графіки знайдених поліномів.
5. Оцінити кожен з отриманих моделей шляхом обчислення відсотка варіацій змінної y , які прогнозує кожне з отриманих лінійних регресійних рівнянь.
6. Зробити висновки.

Приклад виконання лабораторної

1. Створюємо дві змінні x та y з перших двох стовпців змінної count в демонстраційному файлі count.dat (Рисунок 1.1):

```
>> load count.dat  
>> x = count(:,1);  
>> y = count(:,2);
```



1	2.06	7.24
2	2.58	8.02
3	3.14	9.28
4	3.54	10.12
5	4.18	11.12
6	4.78	12.19
7	5.11	13.01
8	5.67	14.12
9	6.02	15.21
10	6.65	16.29
11	7.05	17.01
12	7.52	18.03
13	8.03	19.19
14	8.56	20.21
15	9.03	21.22
16		
17		

Рисунок 1.1 – Приклад демонстраційного файлу з варіаціями змінних x та y

2. Використовуємо *polyfit* щоб обрахувати лінійну регресійну модель яка прогнозує значення y по вхідним значенням x поліномами 1, 3 і 5 степені. Використовуємо функцію *polyfit*, вказавши в її аргументах вектори даних і степені поліномів. Самі коефіцієнти запишемо в вектори $p1$, $p3$ и $p5$, відповідно:

```
>> p1 = polyfit(x, y, 1)
p1 =
-0.6191  0.6755
>> p3 = polyfit(x, y, 3)
p3 =
2.2872 -12.1553  17.0969 -4.5273
>> p5 = polyfit(x, y, 5)
p5 =
-6.0193  33.9475 -62.4220  35.9698  4.7121 -3.8631
```

Отримаємо поліноми:

$$p^{(1)}(x) = -0.6191 \cdot x + 0.6755$$

$$p^{(3)}(x) = 2.2872 \cdot x^3 - 12.1533 \cdot x^2 + 17.0969 \cdot x - 4.5273$$

$$p^{(5)}(x) = -6.0193 \cdot x^5 + 33.9475 \cdot x^4 - 62.422 \cdot x^3 + 35.9698 \cdot x^2 + 4.7121 \cdot x - 3.8631$$

3. Для побудови графіків цих поліномів необхідно знайти їх значення в проміжкових точках, які належать інтервалу, на якому задані дані, тобто між $x(1)$ и $x(\text{end})$. Згенеруємо 100 точок, рівномірно розташованих на області визначення даних, за допомогою функції *linspace*

```
>> xx = linspace(x(1), x(end), 100);
```

4. Обчислимо в них значення $p^{(1)}(x)$, $p^{(3)}(x)$, $p^{(5)}(x)$ за допомогою функції *polyval* і запишемо знайдені значення у вектори $yy1$, $yy3$, $yy5$ відповідно. Вхідними аргументами функції *polyval* в найпростішому випадку є вектор коефіцієнтів полінома і вектор значень незалежної змінної, для яких

потрібно обчислити значення полінома, а вихідним – вектор значень полінома

```
>> yy1 = polyval(p1, xx);  
>> yy3 = polyval(p3, xx);  
>> yy5 = polyval(p5, xx);
```

5. Для наочності побудуємо графіки поліномів і розмістимо задані масивами x і y точки круглими маркерами

```
>> plot(x, y, 'o', xx, yy1, xx, yy3, xx, yy5)
```

Крім цього, за допомогою функції `legend` розмістимо праворуч від осей легенду, в якій вкажемо відповідність ліній полінома:

```
>> legend('DATA', '\itp^{\{1\}}(\itx)', '\itp^{\{3\}}(\itx)',  
         '\itp^{\{5\}}(\itx)')
```

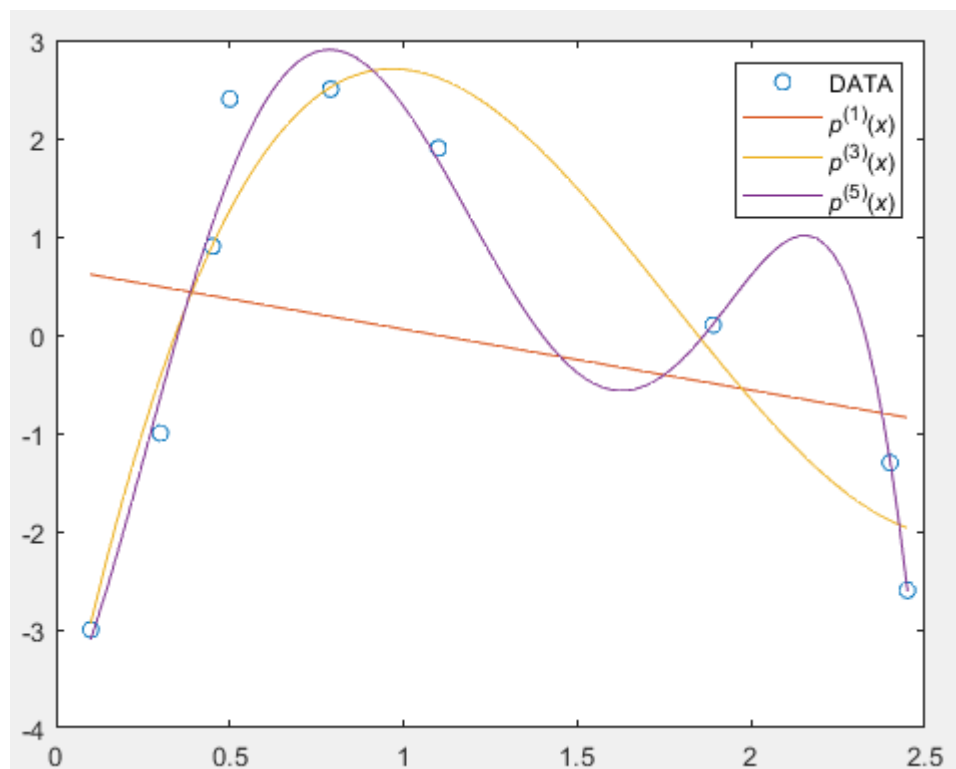


Рисунок 1.2 – Графіки поліномів

```
>> p = polyfit(x,y,1)  
p = 1.5229 -2.1911
```

$p(1)$ геометрично є нахилом лінійної моделі та $p(2)$ є шумом лінійного передбачення.

6. Обчислюємо залишкову вартість, як вектор чисел із знаком:

```
>> yfit1 = polyval(p1, x);  
>> yfit3 = polyval(p3, x);  
>> yfit5 = polyval(p5, x);  
>> yresid1 = y - yfit1;  
>> yresid3 = y - yfit3;  
>> yresid5 = y - yfit5;
```

Обчислюємо суму квадратів залишкової вартості:

```
>> SSresid1 = sum(yresid1.^2);  
>> SSresid3 = sum(yresid3.^2);  
>> SSresid5 = sum(yresid5.^2);
```

7. Обчислюємо загальну суму квадратів, перемножуючи дисперсію вектора y на кількість спостережень мінус 1:

```
>> SStotal = (length(y)-1) * var(y);
```

10. Обчислюємо R^2 використовуючи формулу:

```
>> rsq1 = 1 - SSresid1/SStotal  
>> rsq3 = 1 - SSresid3/SStotal  
>> rsq5 = 1 - SSresid5/SStotal
```

Цей приклад демонструє, що лінійне регресійне рівняння $1.5229 * x - 2.1911$ прогнозує 87% варіацій змінної y .

Питання для самоперевірки

1. Розкрийте суть лінійної регресії.
2. Розкрийте зміст коефіцієнтів рівняння лінійної регресії.
3. Як знайти коефіцієнти лінійної регресії.
4. Що потрібно для формування висновку про доцільність використання знайденої моделі.
5. Для чого використовується критерій Фішера і як він розраховується
6. Загальна дисперсія, її зміст та визначення.

7. Пояснювальна дисперсія, її зміст та визначення.
8. Загальна дисперсія, її зміст та визначення.
9. Яким показником характеризується міра тісноти зв'язку, метод його розрахунку.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Побудова часових та частотних характеристик об'єктів на основі вхідної та вихідної змінних

Мета роботи: Дослідити побудову часових і частотних характеристик об'єктів на основі вхідної і вихідної матриць [1-5]. Промодельовати весь процес в середовищі MATLAB.

Короткі теоретичні відомості

Під *ідентифікацією динамічних об'єктів* розуміють процедуру визначення структури і параметрів їх математичних моделей, які за однакових вхідному сигналі об'єкта і моделі забезпечують близькість виходу моделі до виходу об'єкта за наявності будь-якого критерію якості [1-5].

Зазвичай ідентифікація – багатоетапна процедура. Основні її етапи наступні:

1. *Структурна ідентифікація* полягає у визначенні структури математичної моделі на підставі теоретичних міркувань.
2. *Параметрична ідентифікація* включає в себе проведення ідентифікуючого експерименту і визначення оцінок параметрів моделі за експериментальними даними.
3. *Перевірка адекватності* – перевірка якості моделі в сенсі обраного критерію близькості виходів моделі і об'єкта.

У зв'язку з різноманіттям об'єктів і різних підходів до їх моделювання існує безліч варіантів задачі параметричної ідентифікації, класифікація яких показана на рисунку 1.

Види моделей об'єктів

Розглянемо основні види моделей лінійних безперервних стаціонарних динамічних об'єктів і їх характеристики.

1. Диференціальне рівняння. Найбільш універсальна модель, що має форму

$$\sum_{i=0}^{na} a_i y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^{nb} b_j u^{(j)}(t),$$

де na – порядок моделі ($na > nb$), a_i і b_j – постійні коефіцієнти (параметри моделі), $u^{(j)}(t)$ і $y^{(i)}(t)$ – похідні, відповідно, вхідного й вихідного сигналів.

2. Передавальна функція. Дана характеристика визначається як відношення перетворень Лапласа вихідного і вхідного сигналів

$$W(s) = \frac{L\{y(t)\}}{L\{u(t)\}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\sum_{j=0}^{nb} b_j s^j}{\sum_{i=0}^{na} a_i s^i}.$$

3. Імпульсна характеристика (ІХ) $w(t)$. Під ІХ розуміється реакція об'єкта з нульовими початковими умовами на вхідний сигнал у вигляді δ -функції.

4. Перехідна функція $h(t)$. Це реакція об'єкта з нульовими початковими умовами на вхідний сигнал у вигляді одиничного стрибка.

5. Частотні характеристики. Частотні характеристики об'єкта визначаються його комплексним коефіцієнтом передачі $W(j\omega)$, який є перетворенням Фур'є ІХ.

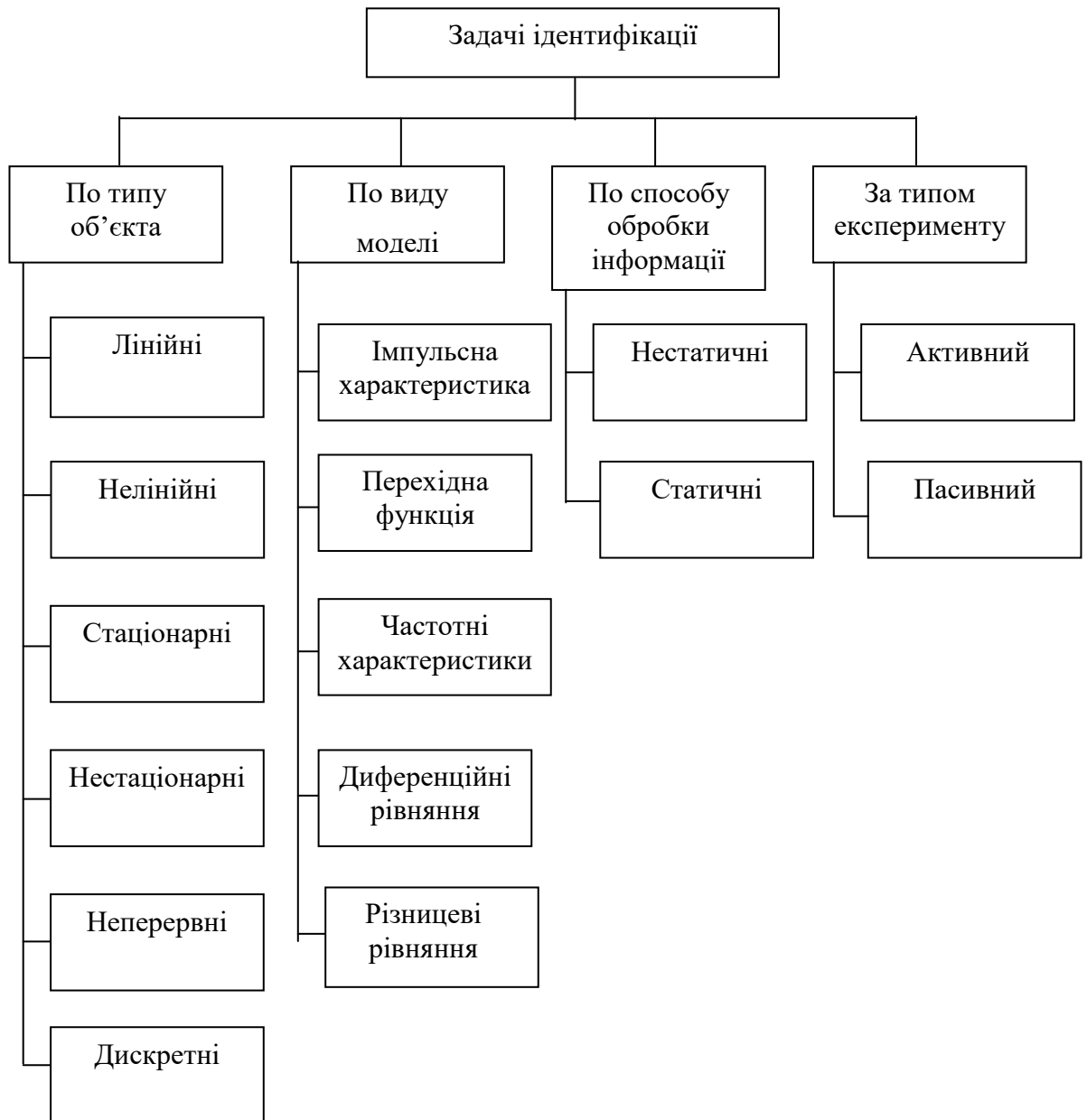


Рисунок 2.1 – Класифікація задач ідентифікації

Розглянемо основні види моделей лінійних безперервних стаціонарних динамічних об'єктів.

1. Диференціальне рівняння. Найбільш універсальна модель, що має форму:

$$\sum_{i=0}^{na} a_i y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^{nb} b_j u^{(j)}(t),$$

де na – порядок моделі ($na > nb$), a_i і b_j – постійні коефіцієнти (параметри моделі), $u^{(j)}(t)$ і $y^{(i)}(t)$ – похідні, відповідно, вхідного і вихідного сигналів.

2. Передавальна функція. Дана характеристика визначається як відношення перетворень Лапласа вихідного і вхідного сигналів

$$W(s) = \frac{L\{y(t)\}}{L\{u(t)\}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\sum_{j=0}^{nb} b_j s^j}{\sum_{i=0}^{na} a_i s^i}.$$

3. Імпульсна характеристика (IX) $w(t)$. Під IX розуміється реакція об'єкта з нульовими початковими умовами на вхідний сигнал у вигляді δ -функції.

4. Перехідна функція $h(t)$. Це реакція об'єкта з нульовими початковими умовами на вхідний сигнал у вигляді одиничного стрибка.

5. Частотні характеристики. Частотні характеристики об'єкта визначаються його комплексним коефіцієнтом передачі $W(j\omega)$, який є перетворенням Фур'є IX .

Модуль комплексного коефіцієнта передачі $W(j\omega) = A(\omega)$ являє собою, амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) об'єкта з передатною функцією $W(p)$, а аргумент $\arg W(j\omega) = \varphi(\omega)$ – фазочастотну характеристику (ФЧХ). Графічне представлення $W(j\omega)$ на комплексній площині при зміні частоти від 0 до ∞ називається амплітудно-фазочастотною характеристикою (АФЧХ), а в англomовній літературі – діаграмою Найквіста. У теорії управління часто використовується логарифмічні частотні характеристики (ЛЧХ).

6. Модель в просторі станів. У просторі станів об'єкт управління описується сукупністю наступних векторів: вектор вхідних впливів U , вектор станів X і вектор виходу Y .

Лінійний стаціонарний об'єкт представляють у вигляді векторно-матричних рівнянь:

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= AX(t) + BU(t), \\ Y(t) &= CX(t) + DU(t);\end{aligned}$$

де A – матриця об'єкта розмірністю $n \times n$;

B – матриця управління розмірністю $n \times m$;

C – матриця виходу розмірністю $r \times n$;

D – матриця розмірністю $r \times m$.

Представлення об'єктів у просторі станів є математичним і змінні стану об'єкта часто не несуть фізичного сенсу. Тому існує безліч способів переходу від диференціальних рівнянь або передавальних функцій до рівнянь станів, що призводять до різних значень матриць A, B, C, D.

Всі наведені моделі є еквівалентними, тобто, знаючи яку з них, можна отримати всі інші.

На практиці в більшості випадків вимір безперервних сигналів проводиться в дискретні моменти часу, що представляє певну зручність при подальшій обробці даних на ЕОМ. Тому безперервні об'єкти наближено відображають дискретними моделями. Наприклад використовуючи Z-перетворення або білінійної перетворення.

Множник $z^{-1} = e^{-pt}$ являє собою *оператор затримки*, тобто $z^{-1} u(k) = u(k-1)$, $z^{-2} u(k) = u(k-2)$ і т. д. Беручи до уваги цю обставину і позначаючи моменти дискретного часу тим же символом t , що і безперервний час (в даному випадку $t = 0, 1, 2, \dots$), наведемо кілька поширених моделей дискретних об'єктів для тимчасової області, що враховують дію шуму спостереження.

Порядок виконання роботи

Варіант завдання на дану лабораторну роботу вибираються з додатка Б за шифром групи та номером студента в списку групи.

Графічний інтерфейс пакета System Identification Toolbox MATLAB запускається з режиму командного рядка командою

`>>Ident`

В результаті її виконання з'являється діалогове вікно (рисунок 2.2).

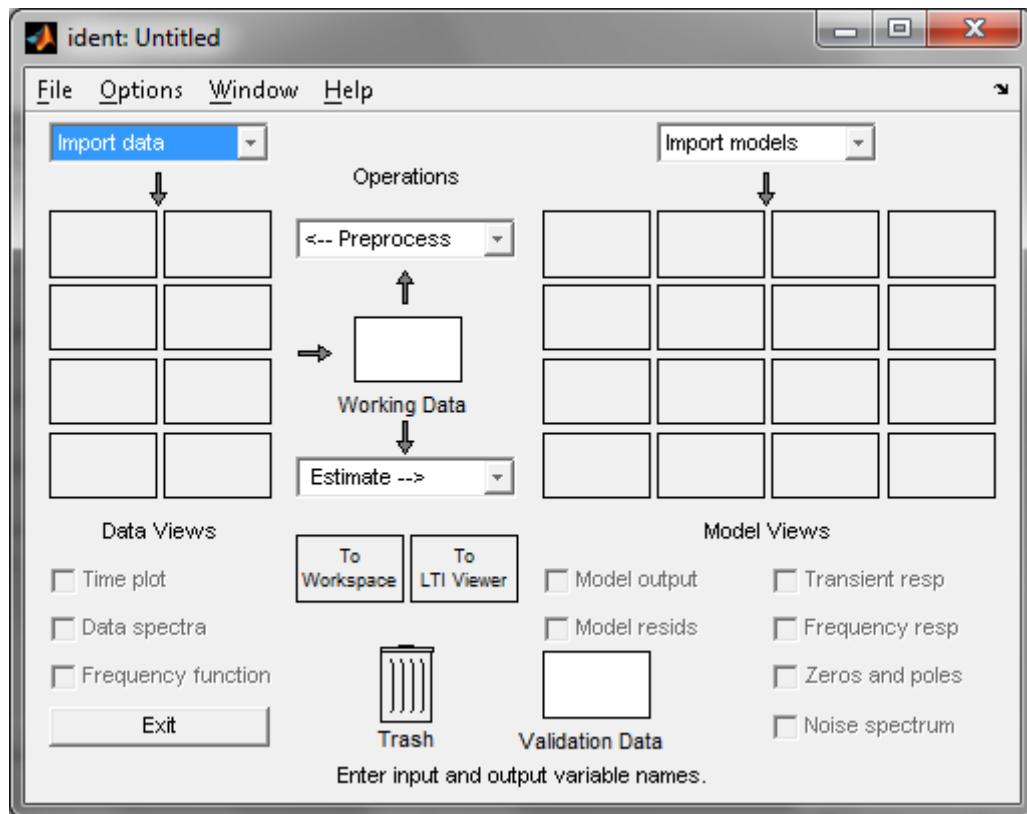


Рисунок 2.2 – Діалогове вікно тулбоксу Ident

Розглянемо роботу з тулбоксом на прикладі. Для цього зберемо схему системи, як зображено на рисунку 2.3.

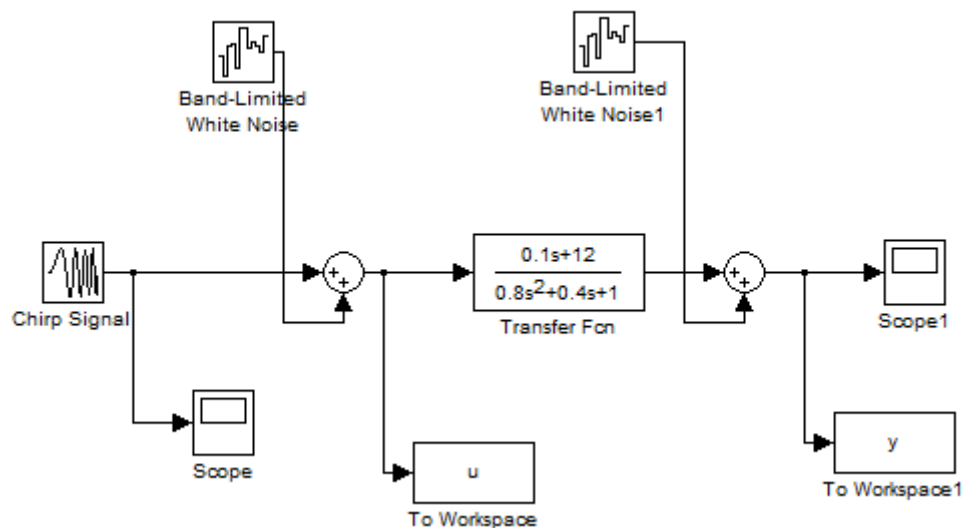


Рисунок 2.3 – Модель для отримання даних

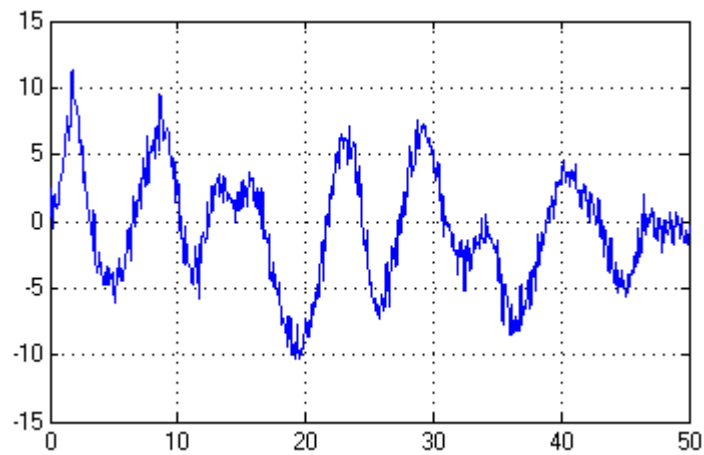


Рисунок 2.4 – Графік вихідного сигналу

Проведемо дослідження вихідних даних, для чого встановимо прапорець Time plot (Тимчасовий графік) в лівій нижній частині вікна інтерфейсу. Майже відразу з'явиться графічне вікно, що містить графіки сигналів u і y від часу (рисунок 2.6).

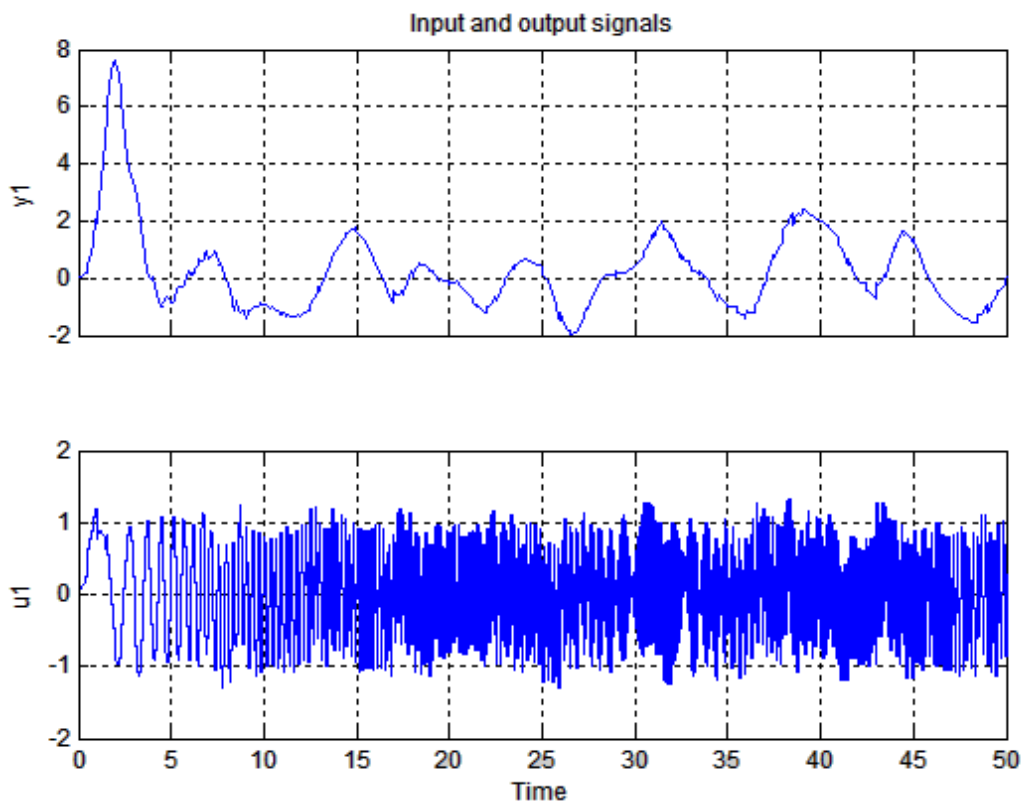


Рисунок 2.6 – Тимчасові діаграми вхідного і вихідного сигналів

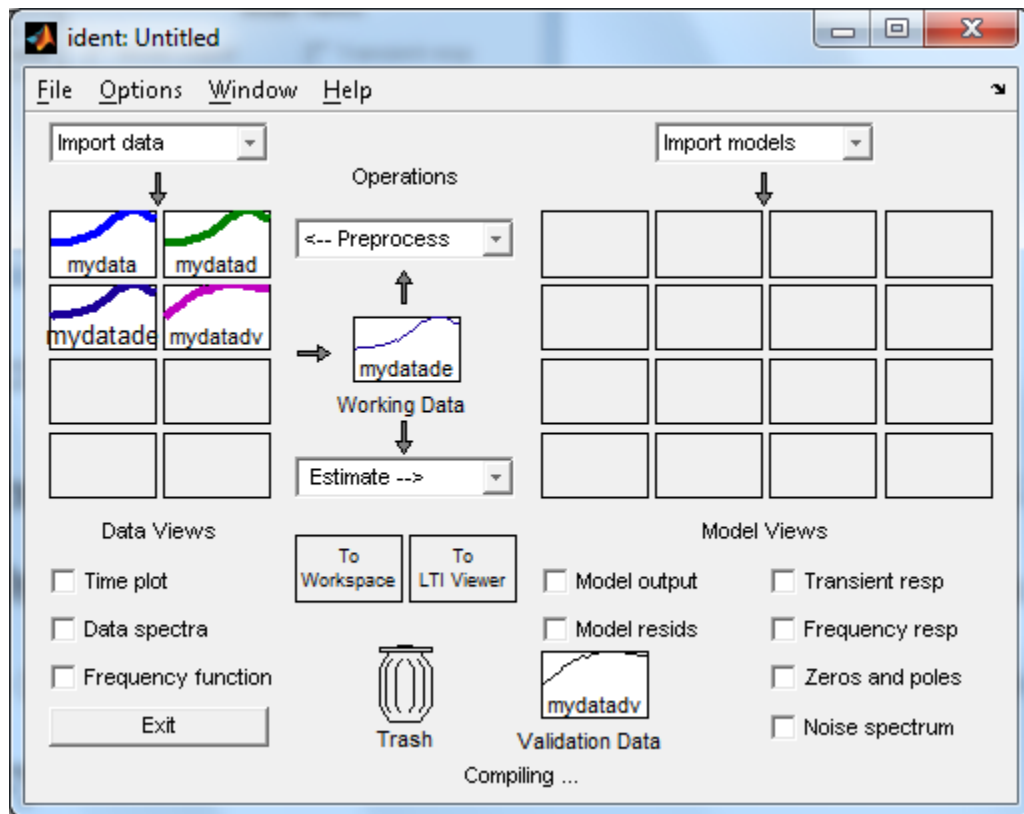


Рисунок 2.7 – Вікно інтерфейсу після попередньої обробки даних

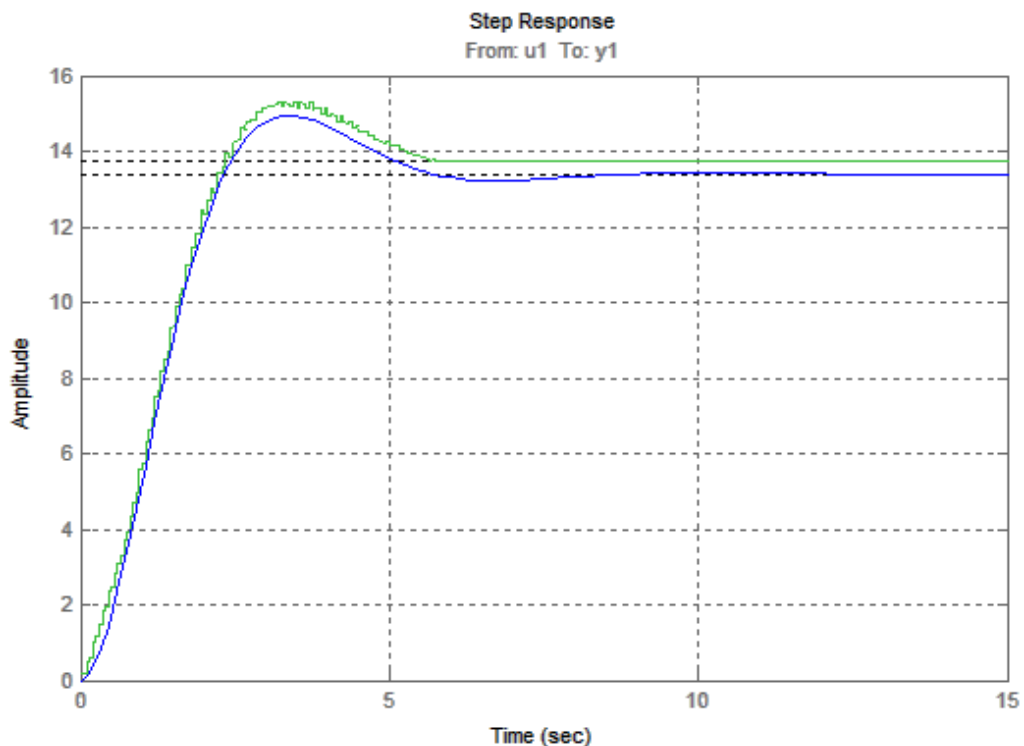


Рисунок 2.8 – Оцінка перехідної характеристики, знайденої кореляційним методом

Оцінімо модель такого вигляду – частотні характеристики об'єкта. Виберемо в списку Estimate варіант Spectral model і повторимо щойно пророблені операції по знаходженню оцінки моделі. У результаті в основному вікні інтерфейсу (у його правій частині – Model Views) з'явиться ще один значок з ім'ям `spd`, символічно представляє модель у вигляді частотних характеристик, знайдених спектральним методом. Результат ідентифікації і порівняння з характеристикою, побудованої за передавальною функцією, виконується аналогічно описаний вище перехідної характеристики.

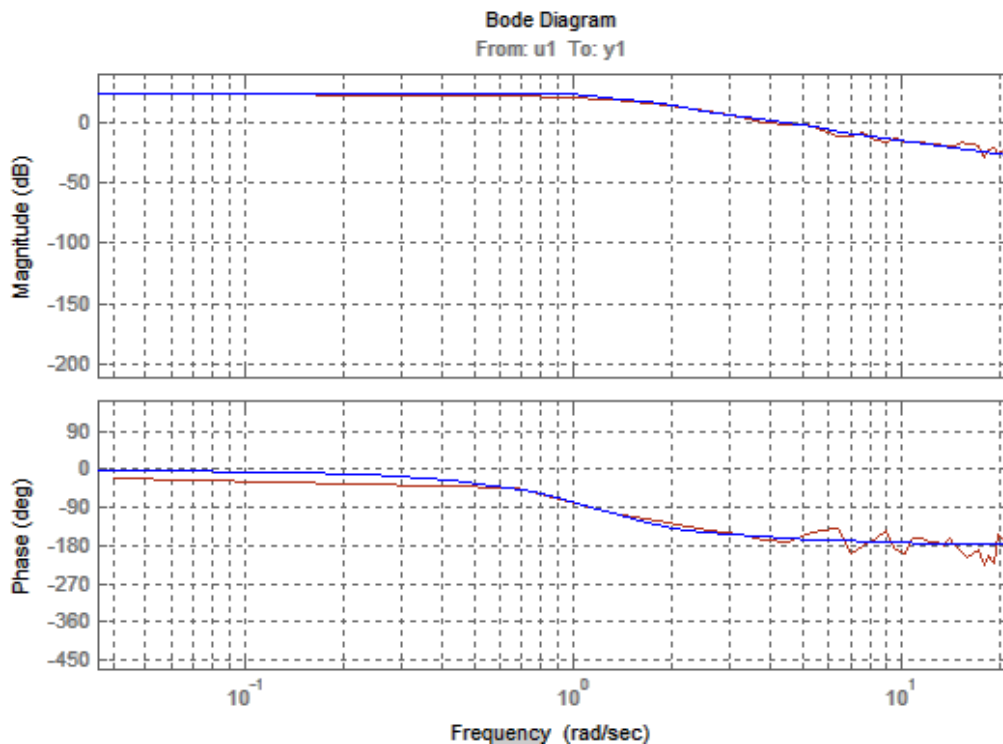


Рисунок 2.9 – Частотні характеристики, знайдені спектральним методом

Завдання на лабораторну роботу

1. Вибрати варіант завдання на дану лабораторну роботу з додатка Б за шифром групи та номером студента в списку групи.
2. Побудувати модель для отриманих даних в відповідності з заданою передатною функцією об'єкта і періодом дискретизації.
3. Оцінити перехідну характеристику і логарифмічну амплітудно-фазочастотну характеристики об'єкта і порівняти з відповідними характеристиками, побудованими для об'єкта засобами MATLAB.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Оцінювання параметричних моделей

Мета роботи: Дослідити алгоритми побудови параметричних моделей [2-5] та порівняти їх з вихідною передавальною функцією у тулбоксі Simulink.

Короткі теоретичні відомості

1. Модель авторегресії AR (AutoRegressive) – вважається простим описом:

$$A(z) y(t) = e(t) ,$$

де $A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na}$.

2. ARX – модель (Autoregressive with eXternal input) – більш складна модель:

$$A(z)y(t) = B(z) u(t) + e(t) ,$$

або в розгорнутому вигляді:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-n) = b_1 u(t) + b_2 u(t-1) + \dots + b_{nb} u(t-m) + e(t) .$$

Тут й нижче $e(t)$ – дискретний білий шум.

$$B(z) = b_1 + b_2 z^{-1} + \dots + b_{bn} z^{-nb+1} .$$

3. ARMAX-модель (AutoRegressive-Moving Average wiht eXternal input – модель авторегресії ковзаючого середнього):

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - nk) + C(z)e(t) ,$$

де nk – величина затримки (запізнювання),

$$C(z) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{nc} z^{-nc} .$$

4. Модель «вхід-вихід» (в закордонній літературі «Output-Error», тобто «вихід-помилка», скорочено ОЕ):

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t - nk) + e(t) ,$$

де $F(z) = 1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_{nf} z^{-nf}$.

5. Так звана модель Бокса-Дженкінса (BJ):

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)} e(t) ,$$

поліноми $B(z)$, $F(z)$, $C(z)$ визначені раніше, а поліном $D(z)$ визначається за формулою:

$$D(z) = 1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_{nd} z^{-nd} .$$

Дані моделі можна розглядати, як окремі випадки узагальненої параметричної лінійної структури:

$$A(z)y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)} e(t) ,$$

при цьому всі вони допускають розширення для багатовимірних об'єктів (що мають кілька входів і виходів).

6. Модель для змінних стану (State-space):

$$\mathbf{X}(t + 1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t),$$

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{U}(t) + v(t),$$

де $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$ – матриці відповідних розмірів, $v(t)$ – корельований білий шум спостережень.

Можлива й інша (так звана оновлена або канонічна) форма представлення даної моделі:

$$\mathbf{X}(t + 1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{K}e(t) ,$$

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{U}(t) + e(t) ,$$

де $\mathbf{K}$ – деяка матриця (вектор стовбець), $e(t)$ – дискретний білий шум (скаляр).

Порядок виконання роботи

Вихідними даними для виконання роботи стане вікно тулбокса Identification, отримане в кінці лабораторної роботи № 2 (рисунок 3.1).

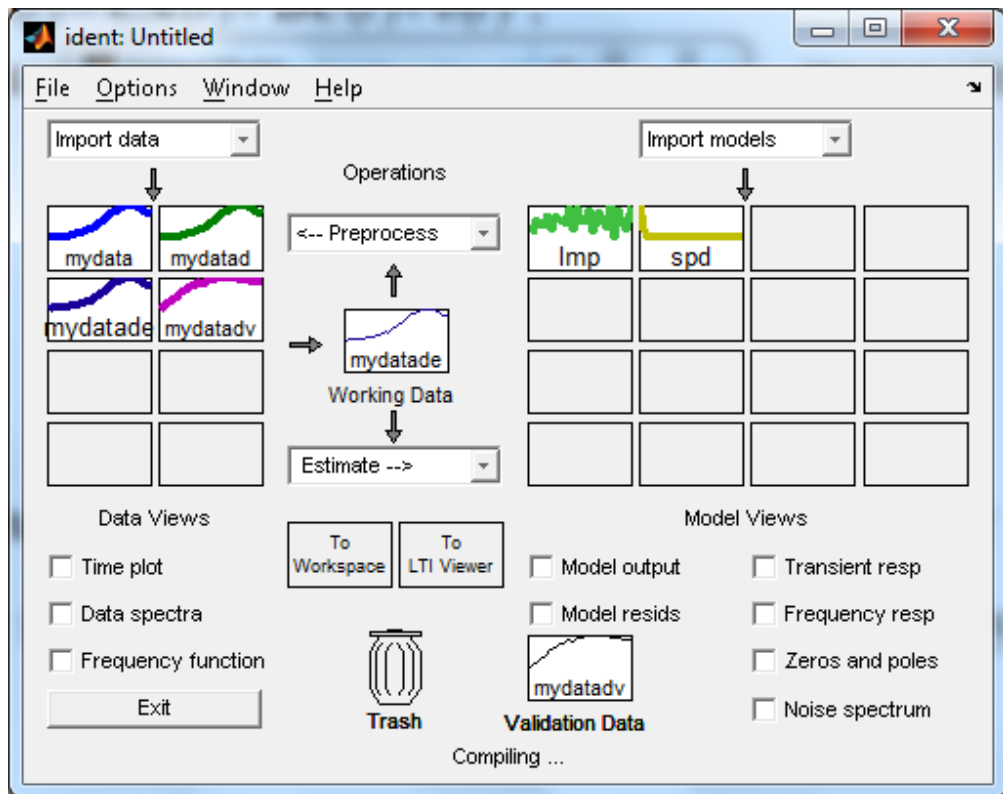


Рисунок 3.1 – Вікно інтерфейсу тулбокса Identification

Оцінімо параметричні моделі, вибравши в списку Estimate варіант Parametric models. даний вибір призведе до відкриття діалогового вікна завдання структури моделі (рисунок 3.2).

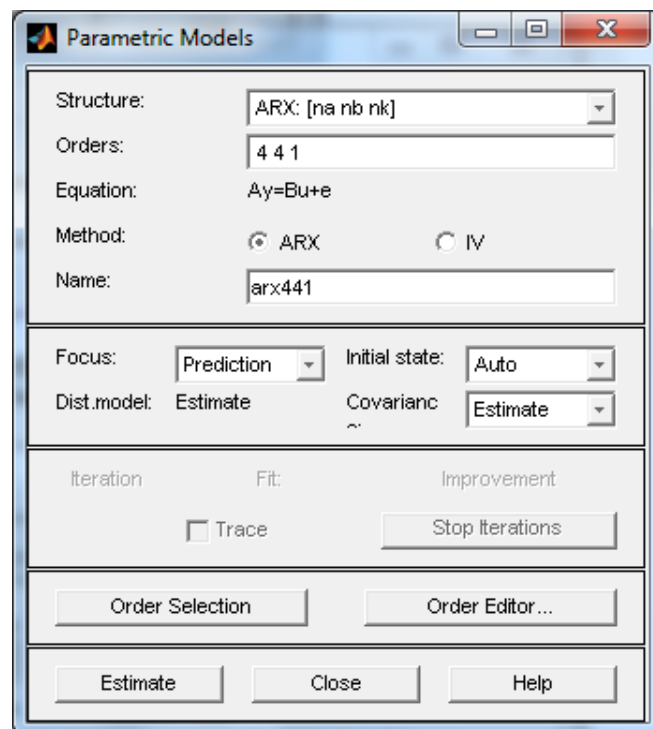


Рисунок 3.2 – Діалогове вікно завдання структури моделі

С початку користувачеві пропонується модель типу ARX (див. вище) з параметрами $n_a = 4$, $n_b = 4$, $n_k = 1$. Ці параметри можна змінити за допомогою редактора моделі (Order editor), що викликається натисканням відповідної кнопки. Результатом виконання цієї операції з'явиться поява діалогового вікна редактора порядку моделі (рисунок 3.3).

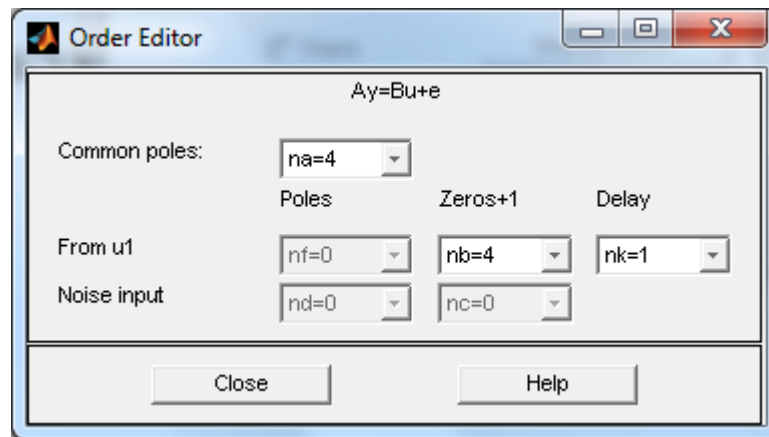


Рисунок 3.3 – Діалогове вікно редактора порядку моделі

Позначення прийняті в діалоговому вікні порядку моделі: n_a – кількість полюсів, n_b – кількість нулів, n_k – кількість тактів запізнювання. Можна вибрати конкретні значення параметрів, а можна задати діапазон зміни кожного, натисканням кнопки Order selection, що призведе до появи діапазонів $[1:10 \ 1:10 \ 1:10]$ в полі Orders вікна завдання параметрів моделі (рисунок 3.2).

Після натискання кнопки Estimate буде виведений графік залежності функції втрат від числа оцінюваних коефіцієнтів моделі (рисунок 3.4).

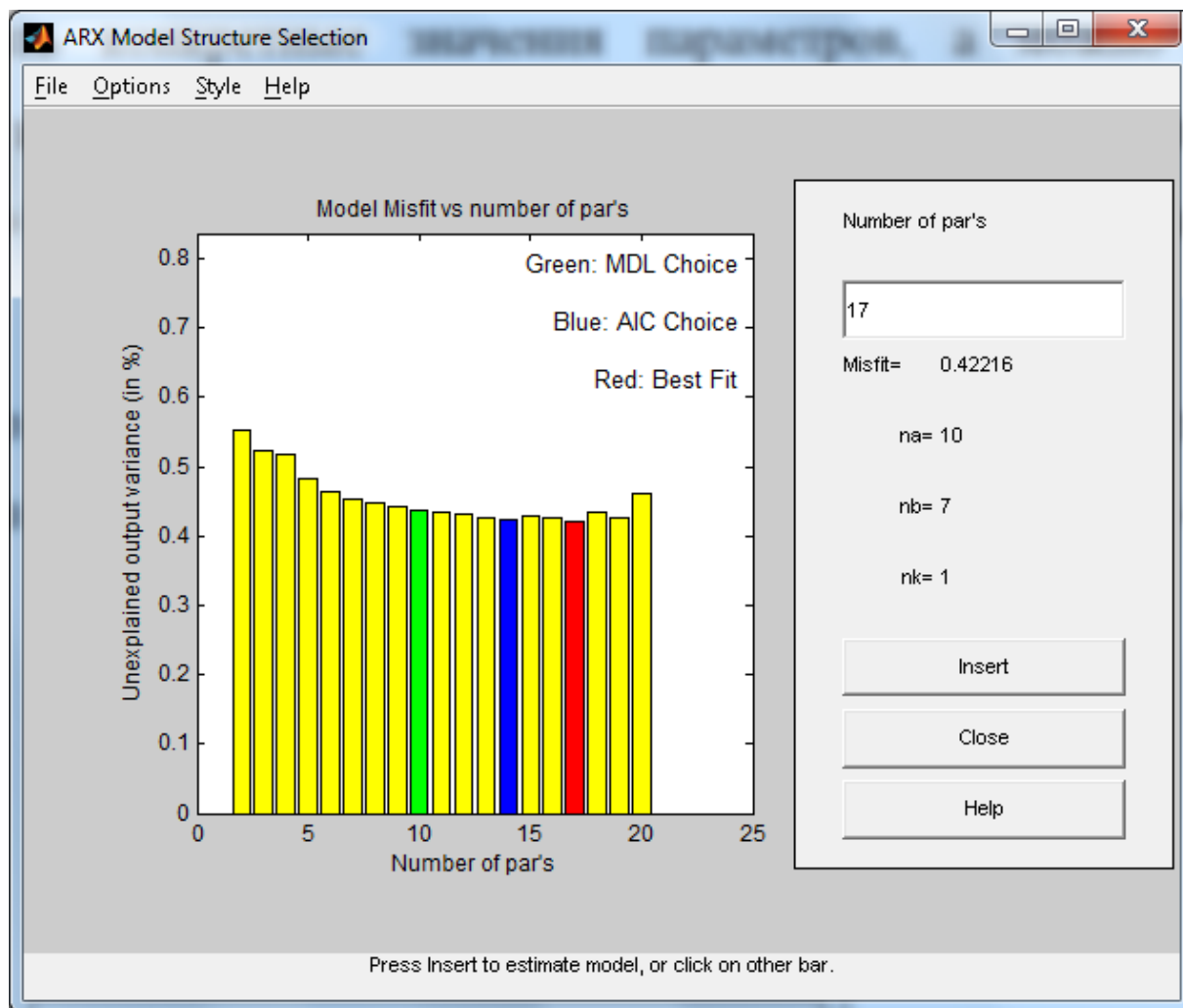


Рисунок 3.4 – Вікно вибору структури моделі

Клацаючи кнопкою миші на певних стовпцях, вибираємо ті чи інші параметри моделі.

Побудуємо моделі для трьох рекомендованих наборів параметрів: відповідно з мінімізацією критерію Ріссанена MDL (зелений), з мінімізацією критерію Акайке AIC (синій) і найбільш підходящий моделі (червоний). Клацнувши мишею по відповідному стовпчику виберемо набір параметрів і натиснемо кнопку Insert. Відповідні значки моделей з'являться в головному вікні тубокса, з іменами $arx823$, $arx1043$ і $arx1071$. Цифри в назві моделі відповідають значенням параметрів na , nb , nk .

Зовнішній вигляд вікна тубокса прийме вигляд, який зображено на рисунку 3.5.

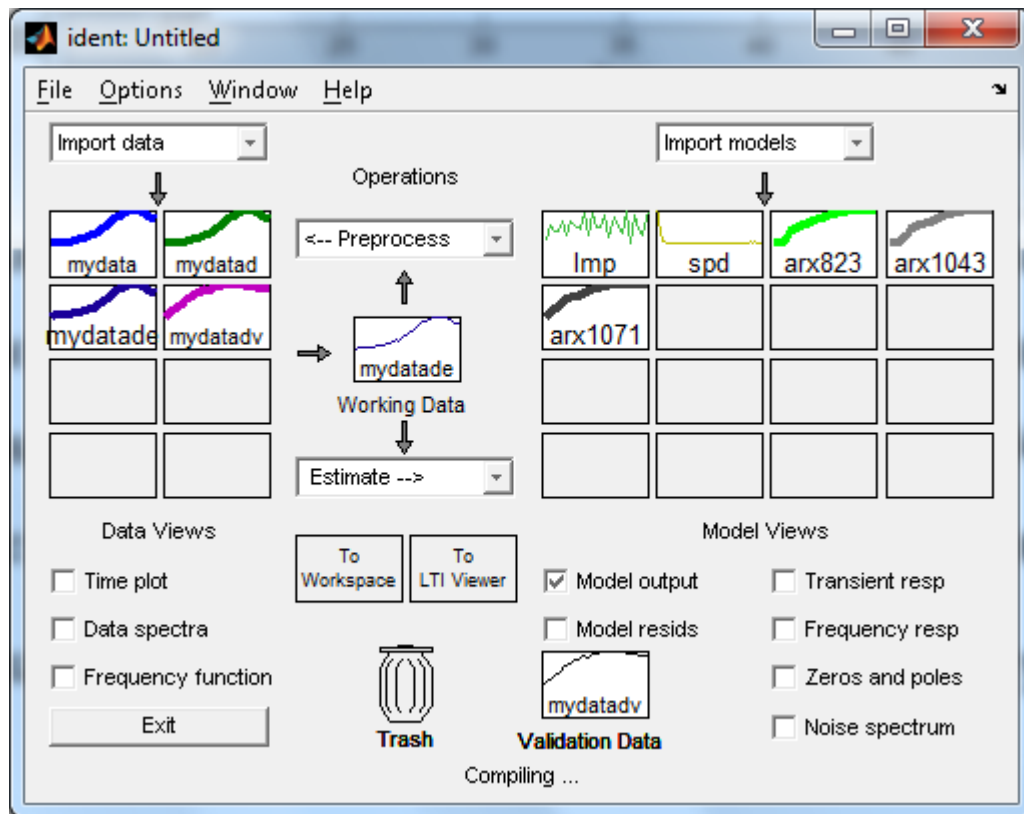


Рисунок 3.5 – Головне вікно інтерфейсу тулбокса Identification

Дослідимо міру близькості моделі вихідного процесу. Для цього по черзі будемо включати тільки одну модель (клацаючи на інші значки, роблячи їх неактивними або активними) і активізувати графічне вікно Model Output відповідним прапорцем у нижній частині вікна інтерфейсу.

Вид вікна Model Output для вибраної моделі arx1071 представлений на рисунку 3.6.

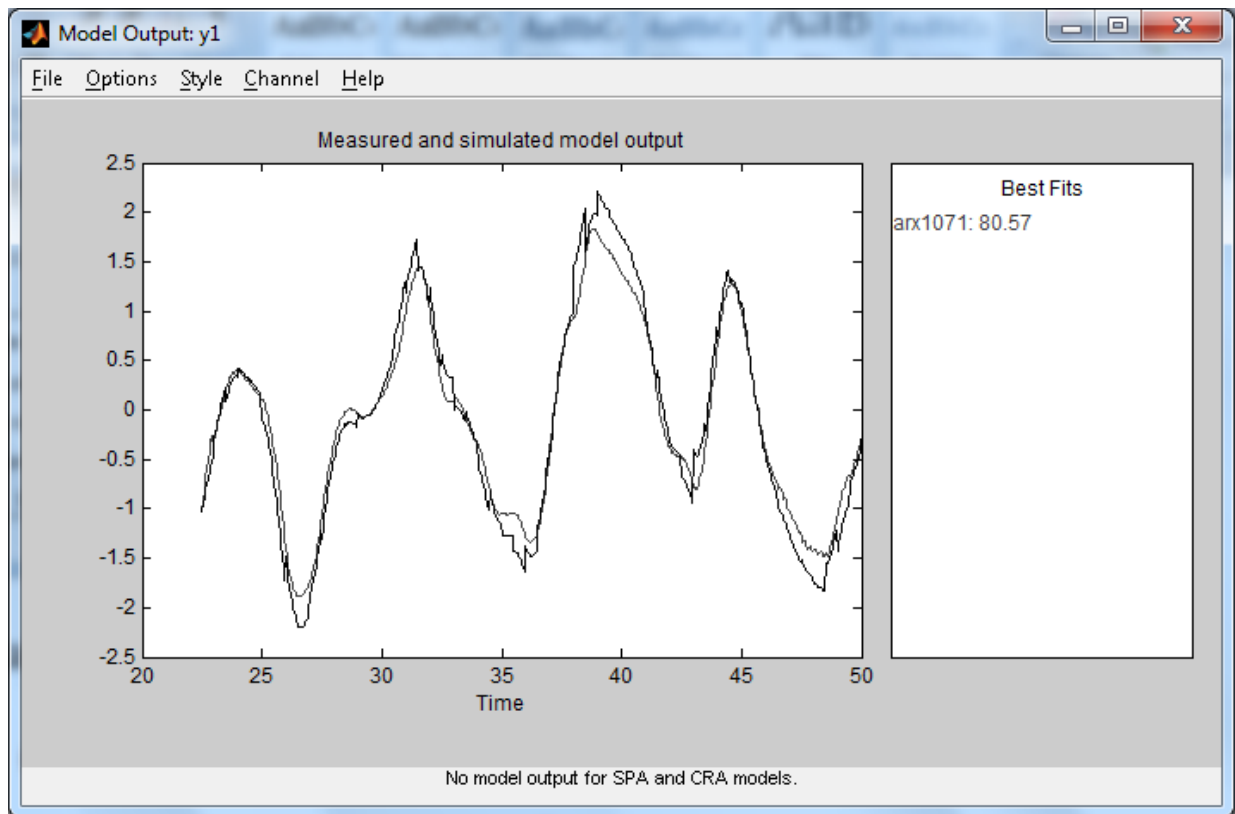


Рисунок 3.6 – Вікно порівняння виходів моделей

У правій частині вікна вказана величина середньоквадратичної неузгодженості експериментальних даних і виходу моделі.

Оцінімо ще один вид моделі – модель простору станів State Space. Для цього у вікні (рисунок 3.2) зі списку Structure виберемо State Space.

У діалоговому вікні завдання структури моделі в полі Orders за замовчуванням пропонується модель 4-го порядку. Виберемо пошуковий метод визначення найкращої структури (порядку) моделі, вказавши в рядку Orders (Порядок) діапазон можливих значень порядку моделі, натиснувши кнопку Order Selection, що призведе до появи діапазону 1:10. Проробивши це і натиснувши кнопку Estimate, як результат виконаної дії відкрилося вікно вибору порядку моделі (рисунок 3.7).

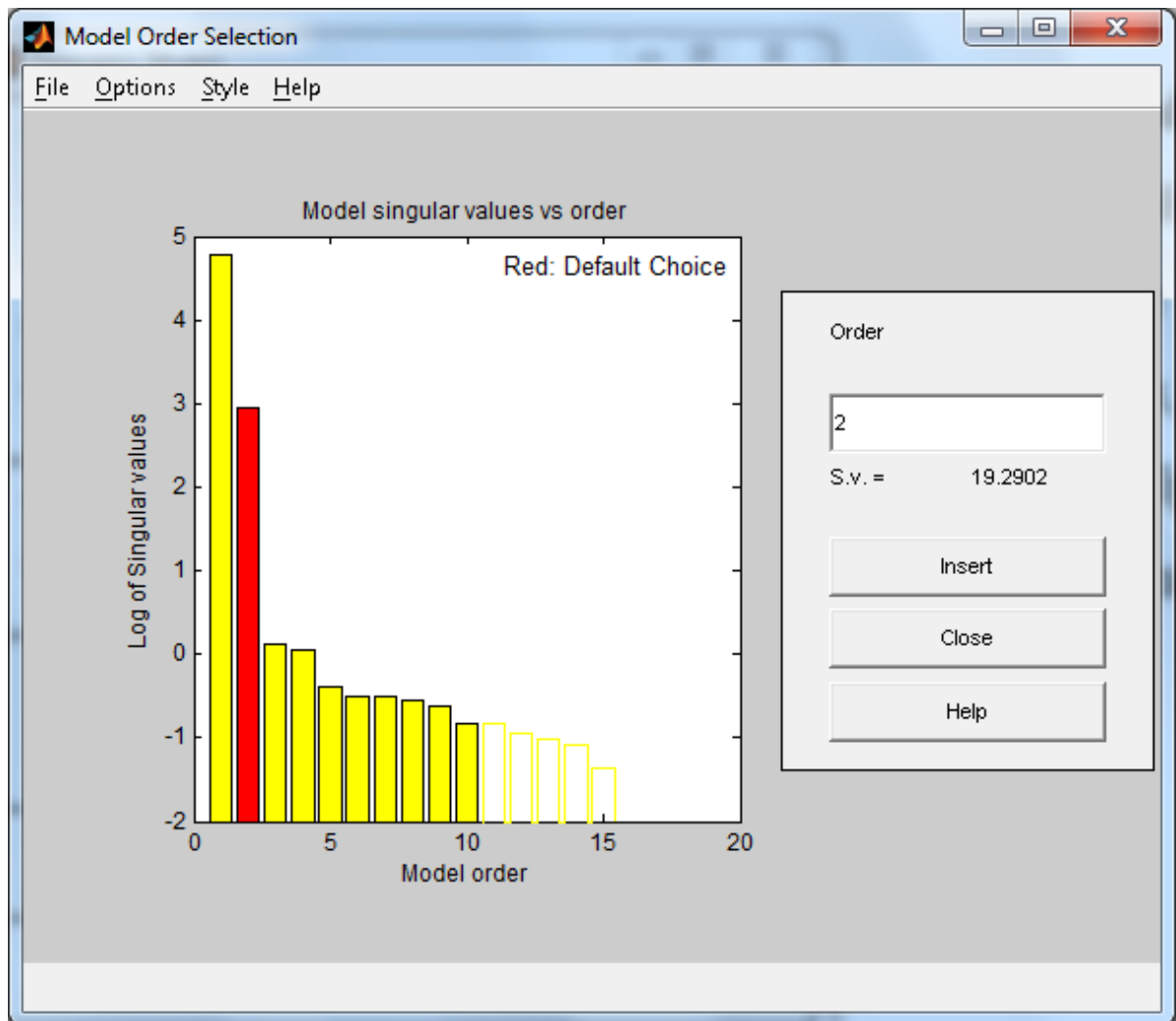


Рисунок 3.7 – Вікно вибору порядку моделі

Графік показує внесок n -й складовій вектора змінних стану у вихідний сигнал моделі (значення n вказані по осі абсцис). Доцільно вибирати значення n таким, щоб стовпці, що відповідають складовим з номерами більше n , мали б набагато меншу висоту, ніж стовпчики, розташовані зліва від них. Виходячи з цих передумов система пропонує порядок, виділяючи його червоним кольором, на якому ми і зупинимося ($n = 2$).

Натиснемо на червоному стовпці, а після - на кнопку Insert. У головному вікні інтерфейсу з'являється знак з ім'ям $n4s2$.

Перевіримо адекватність отриманої моделі за допомогою вікна Model Output як це робилося для ARX-моделей вище.

Збереження побудованих моделей проводиться в два етапи:

1) модель вводиться до робочого оточення системи MATLAB (перетягуванням піктограми моделі в область To Workspace в центрі робочого вікна інтерфейсу), при цьому модель буде фігурувати в робочому просторі MATLAB під тим самим ім'ям, що і в середовищі інтерфейсу;

2) виконується перетворення моделей.

Перетворення моделей полягає в наступному: слід вказати, що отримані моделі представлені в так званому тета-форматі (внутрішньому вигляді матричних моделей) і є дискретними. Для перетворення моделей з тета-формату в вид зручний для подальшого використання при аналізі та синтезі систем управління є спеціальні функції:

1. Функція `thd2thc` перетворює дискретну модель тета-формату в безперервну модель того ж формату:

```
>> Ім'я моделі1 = thd2thc (ім'я моделі2);
```

2. Функція `th2tf` перетворює модель тета-формату об'єкта в передавальну функцію:

```
>> [num, den] = th2tf (ім'я моделі)
```

3. Для подання передавальної функції у вигляді, звичному для нашого погляду, скористаємося командою `tf`:

```
>> Ім'я моделі = tf (num, den)
```

Результатом буде модель у вигляді неперервної передавальної функції відповідного порядку. Послідовність команд для вибраного прикладу представлена на рисунку 3.8.

```

Command Window
File Edit Debug Desktop Window Help
>> w1=thd2thc(arx1071);
>> [num,den]=th2tf(w1);
>> w2=tf(num,den)

Transfer function:
|
0.2814 s^9 + 29.75 s^8 + 2990 s^7
-----
s^10 + 55.5 s^9 + 7509 s^8 + 2.704

```

Рисунок 3.8 – Фрагмент вікна командного рядка MATLAB

Аналогічні дії виконуються для моделей у просторі станів.

Імпортувавши отриману модель (n4s2) в робочу область MATLAB, роздрукуємо її структуру набравши ім'я та натиснувши клавішу введення. Результат представлений на рисунку 3.9. Як ми бачимо, представлений зовнішній вигляд рівнянь простору станів (див. короткі теоретичні відомості вище) в оновленій формі з урахуванням впливу шуму, значення відповідних матриць і початкових умов.

Перетворимо отриману модель використовуючи функцію d2c:

>> Ws = d2c (n4s2)

```

Command Window
File Edit Debug Desktop Window Help
>> n4s2
State-space model:  x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)
                   y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)

A =
           x1      x2
x1    0.99016  -0.016641
x2    0.22384   0.89048

B =
           u1
x1  -0.0026853
x2  -0.11692

```

Рисунок 3.9 – Фрагмент вікна командного рядка MATLAB

Порівнюємо поведінку отриманих моделей у тулбоксі Simulink. Зберемо схему моделі системи управління як показано на рисунку 3.10.

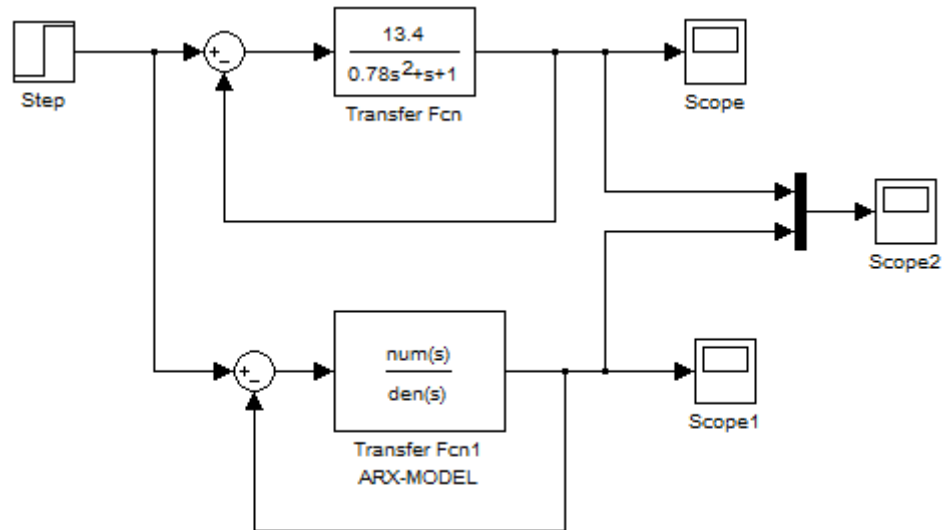


Рисунок 3.10 – Порівняння відомої передавальної функції і ARX-моделей
Графіки перехідного процесу представлені на рисунку 3.11.

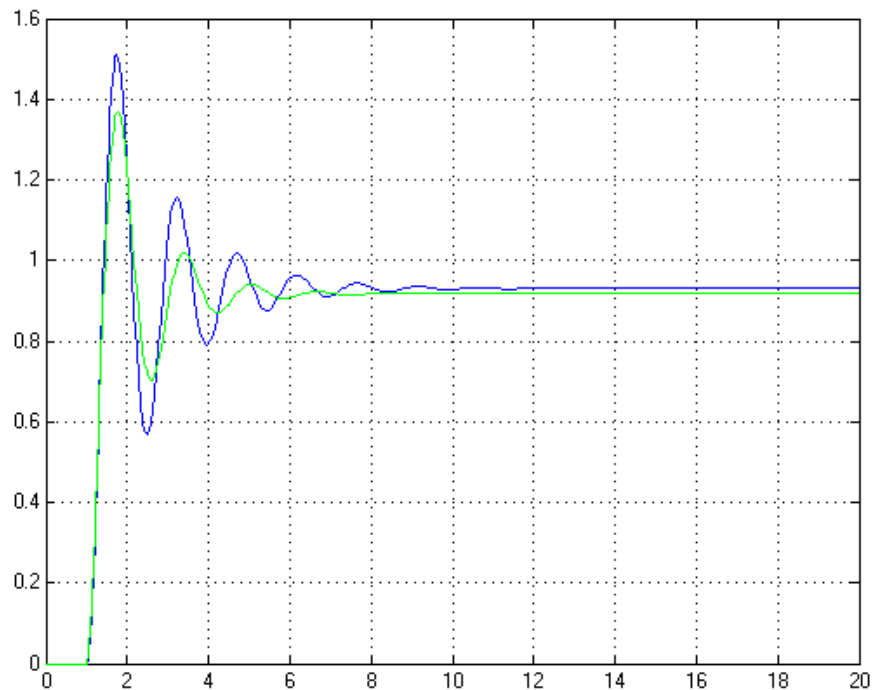


Рисунок 3.11 – Графіки перехідного процесу моделі і вихідного об'єкта

Виконаємо аналогічне порівняння вихідної передавальної функції з моделлю в просторі станів нехтуючи в отриманій моделі матрицею шуму K , але враховуючи початкові умови, які вводимо в поле Initial conditions блоку

State space. Побудована схема представлена на рисунку 3.12, а графіки перехідного процесу на рисунку 3.13.

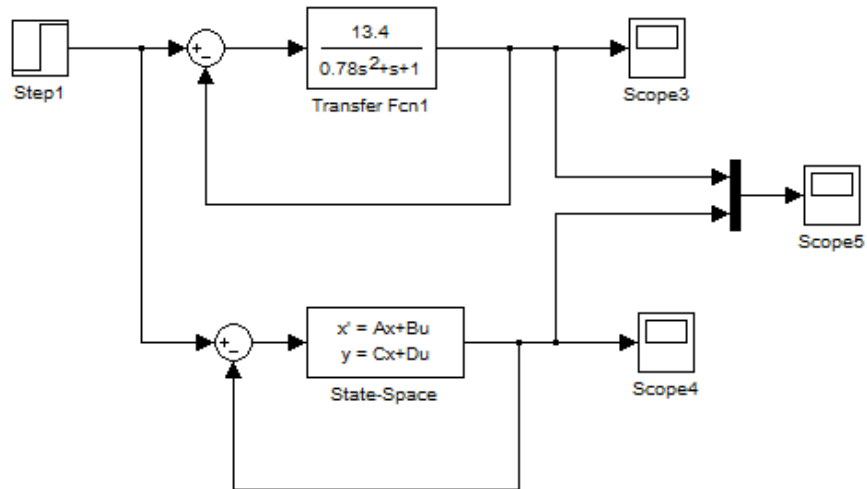


Рисунок 3.12 – Схема порівняння роботи моделі простору станів і вихідної передавальної функції

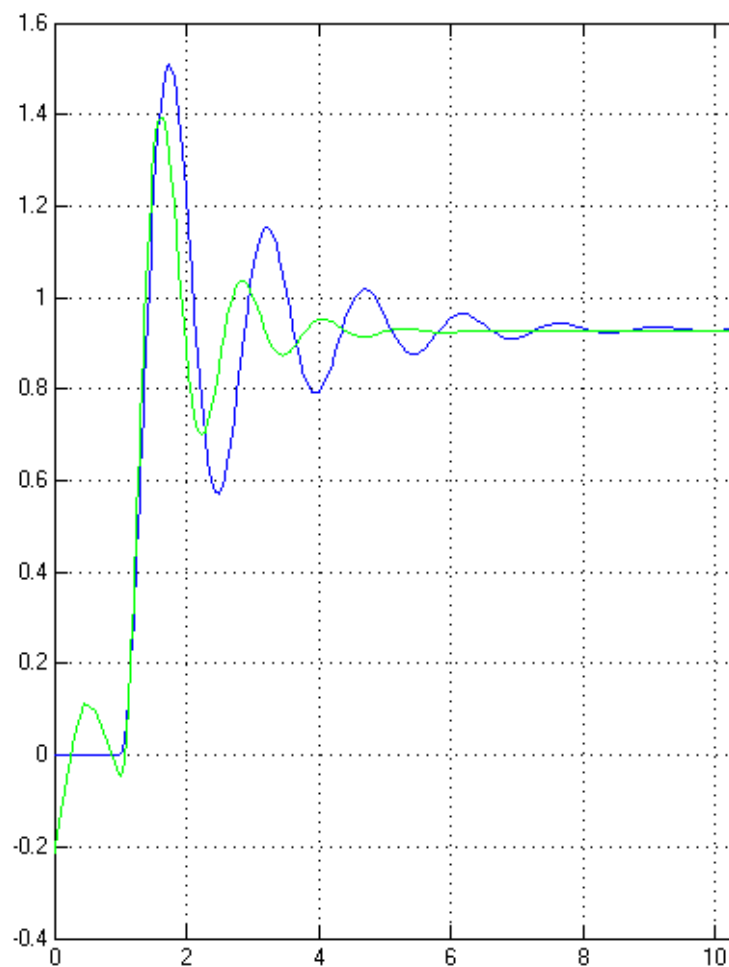


Рисунок 3.13 – Графіки перехідних процесів вихідної передавальної функції і отриманої моделі

Завдання на лабораторну роботу

1. Вихідними даними для виконання роботи стане вікно тулбокса Identification, отримане в кінці лабораторної роботи № 2 (рисунок 3.1).
2. Побудувати три ARX-моделі (у відповідності до мінімізації критерію Ріссанена MDL, до мінімізації критерію Акайке AIC та найбільш підходящої моделі Best Fit);
3. Порівняти величини середньоквадратичного розузгодження експериментальних даних та виходу ARX-моделей;
4. Побудувати три моделі у просторі станів (вибрати рекомендований системою порядок моделі, та ще два на вибір);
5. Порівняти величини середньоквадратичного розузгодження експериментальних даних та виходу моделей у просторі станів;
6. Експортувати BCI отримані моделі у робочу область MATLAB та отримати неперервні передавальні функції для ARX-моделей та матриці для моделей у просторі станів;
7. Порівняти функціонування трьох ARX-моделей з вихідною передавальною функцією за допомоги моделювання у тулбоксі Simulink.
8. Порівняти функціонування трьох моделей у просторі станів з вихідною передавальною функцією за допомоги моделювання у тулбоксі Simulink.
9. Зробити висновки, опираючись на кількісну та якісну оцінки інформації, отриманої в ході виконання лабораторної роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Моделювання систем керування з лінійними регуляторами

Мета роботи: Ознайомитись з методикою розрахунку лінійних регуляторів [3-15] за допомогою утиліти Signal Constraint пакету MATLAB та за допомогою методів ручного розрахунку.

Короткі теоретичні відомості

Динамічні характеристики лінійних автоматичних регуляторів.

Динаміка лінійних автоматичних регуляторів (АР) описується рівнянням виду:

$$(1 + T_1 s + T_2 s^2 + \dots + T_n s^n) \mu(t) = \left(\frac{C_0}{s} + C_1 + C_2 s + C_3 s^2 + \dots \right) \varepsilon(t),$$

де $\varepsilon(t)$ – вхідний сигнал, $\mu(t)$ – вихідний сигнал.

Якщо регулятор ідеальний, то:

$$\mu(t) = K_p \left(\frac{1}{T_u s} + 1 + T_{i\delta 1} s + T_{i\delta 2} s^2 + \dots \right) \varepsilon(t),$$

а його передатна функція має вигляд:

$$\frac{\mu(t)}{\varepsilon(t)} = K_p \left(\frac{1}{T_u s} + 1 + T_{i\delta 1} s + T_{i\delta 2} s^2 + \dots \right)$$

$K_p = C_0$ – коефіцієнт передачі регулятора.

Однією із характеристик промислових регуляторів є *міра відповідності* реальних динамічних властивостей ідеальним, що визначаються рівняннями ідеальних регуляторів. Для оцінки цієї міри передатну функцію ідеального регулятора $W_p(s)$ подають у виді добутку передатної функції ідеального регулятора $W_{i\delta}(s)$ та передатної функції деякої «баластної» ланки $W_\delta(s)$, що визначає похибку даного добутку $W_p(s) = W_{i\delta}(s)W_\delta(s)$.

В залежності від значення коефіцієнту передачі та постійних часу можна отримати різні типи лінійних регуляторів:

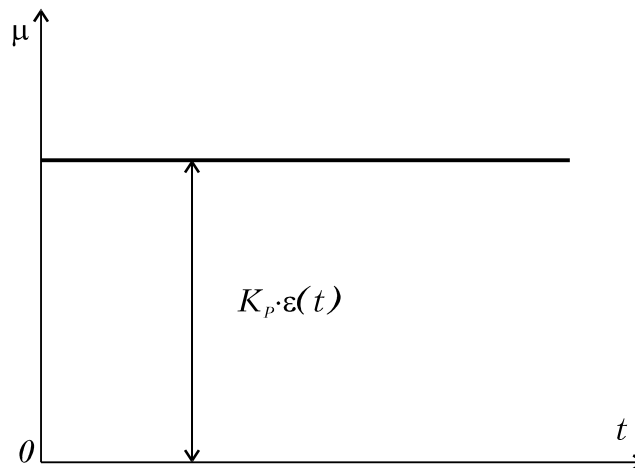
- пропорційний (П)

- інтегральний (І)
- пропорційно-інтегральний (ПІ)
- пропорційно-диференціальний (ПД)
- пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД)

Пропорційний лінійний регулятор:

1. Диференціальне рівняння: $\mu(t) = \mu_0 + K_p \varepsilon(t)$

2. Передатна функція: $W(s) = K_p$

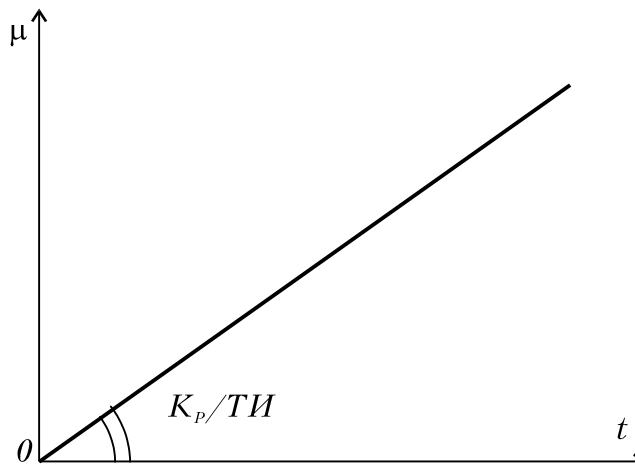


3. Параметри налаштування: K_p

Інтегральний лінійний регулятор:

1. Диференціальне рівняння: $\mu(t) = \mu_0 + \frac{K_p}{T_n} \int_0^t \varepsilon(t) dt$

2. Передатна функція: $W(s) = \frac{K_p}{T_n s}$

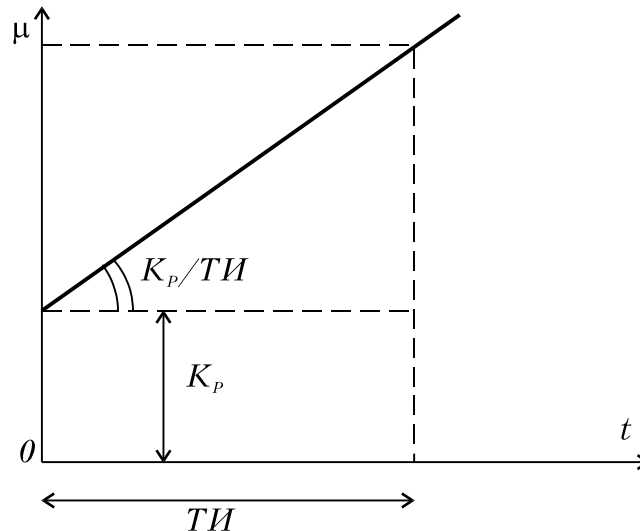


3. Параметри налаштування: $T_p = \frac{T_n}{K_p}$

Пропорційно-інтегральний лінійний регулятор:

1. Диференціальне рівняння: $\mu(t) = \mu_0 + K_p[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_n} \int_0^t \varepsilon(t) dt]$

2. Передатна функція: $W(s) = K_p \frac{T_n s + 1}{T_n s}$

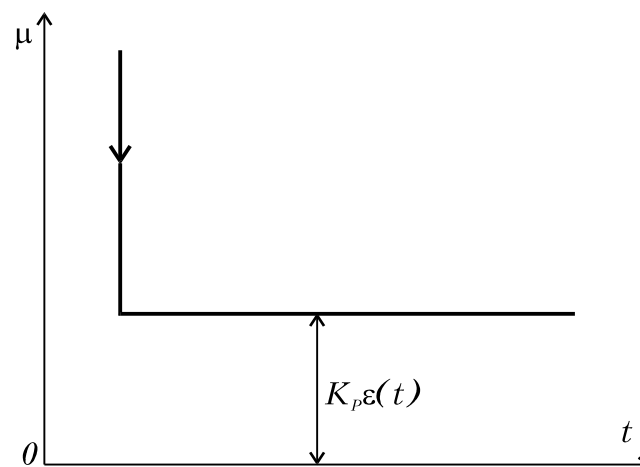


3. Параметри налаштування: K_p, T_n

Пропорційно-диференціальний лінійний регулятор:

1. Диференціальне рівняння: $\mu(t) = \mu_0 + K_p \left[\varepsilon(t) + T_{\bar{e}} \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]$

2. Передатна функція: $W(p) = K_p [1 + T_{\bar{A}} p]$

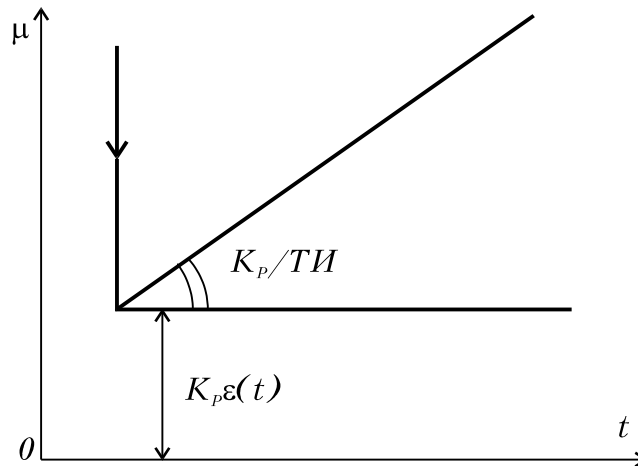


3. Параметри налаштування: $K_p, T_{\bar{A}}$

Пропорційно – інтегрально – диференціальний лінійний регулятор

1. Диференціальне рівняння: $\mu(t) = \mu_0 + K_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]$

2. Передатна функція: $W_{\Sigma}(p) = K_p \left[1 + T_d p + \frac{1}{T_i p} \right]$



3. Параметри налаштування: K_p, T_d, T_i

Порядок виконання роботи

Варіант завдання на дану лабораторну роботу вибираються з додатка Б за номером групи та номером студента в списку групи:

$$W(s) = \frac{12}{s^2 + 0.8s + 1}$$

Замкнена передатна функція: $W(s)_z = \frac{W(s)}{W(s)+1} = \frac{12}{s^2+0.8s+13}$

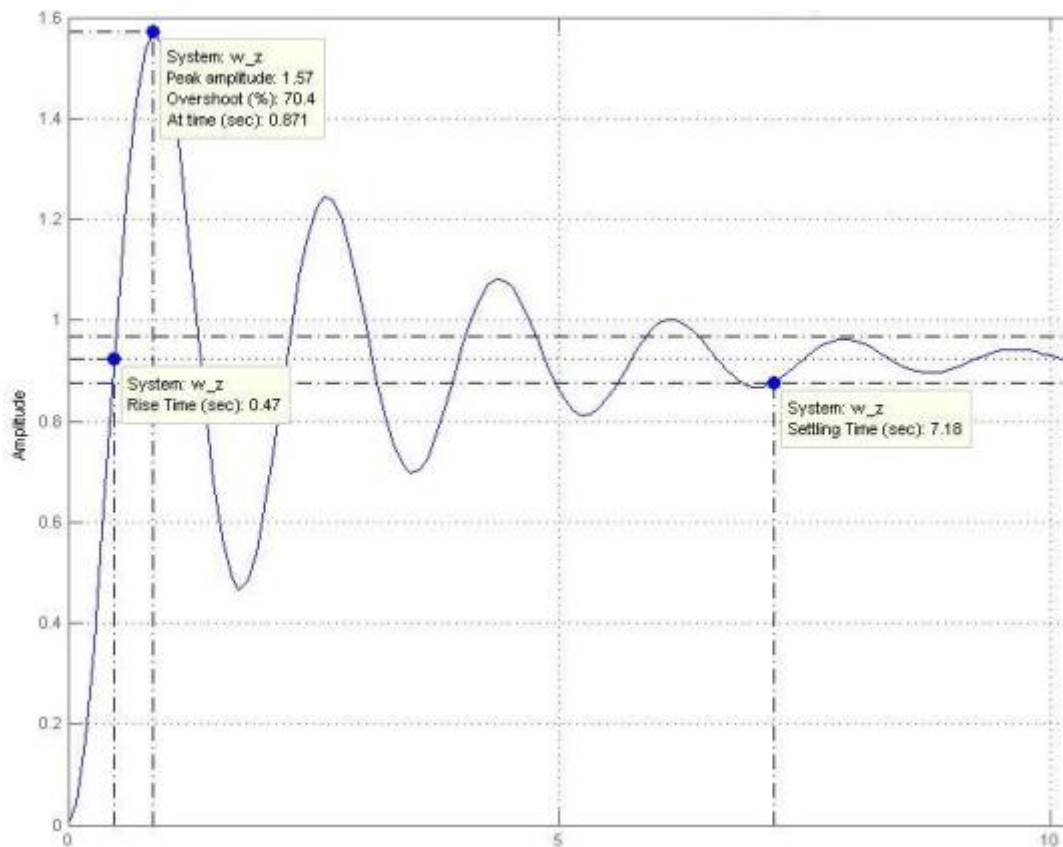


Рисунок 4.1 – Перехідна характеристика об'єкта

Перерегулювання складає 70,4%.

Час регулювання 7.18 с.

Пропорційний регулятор:

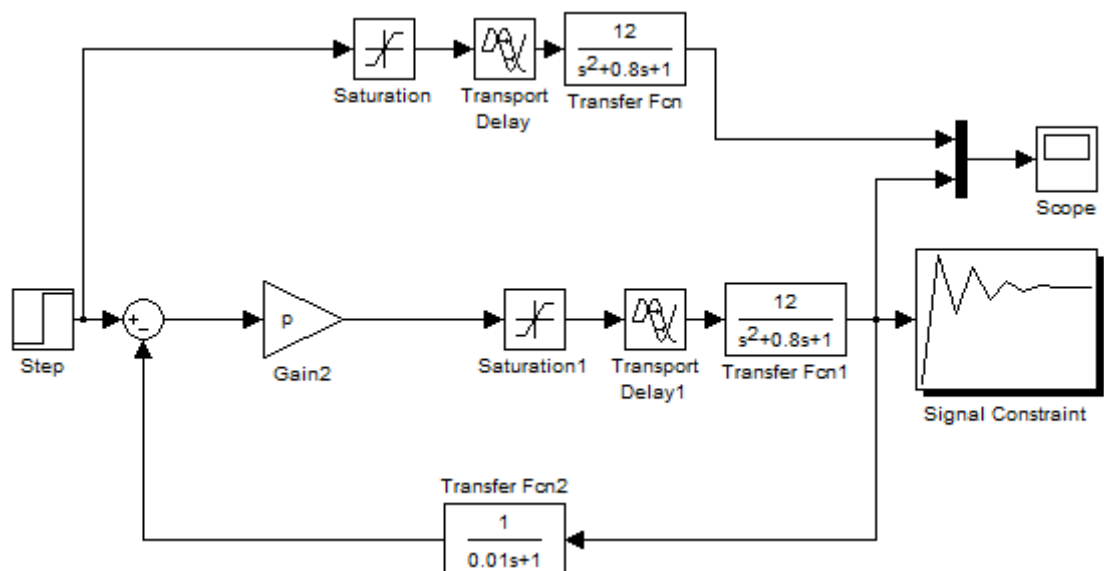


Рисунок 4.2 – Модель системи з пропорційним регулятором

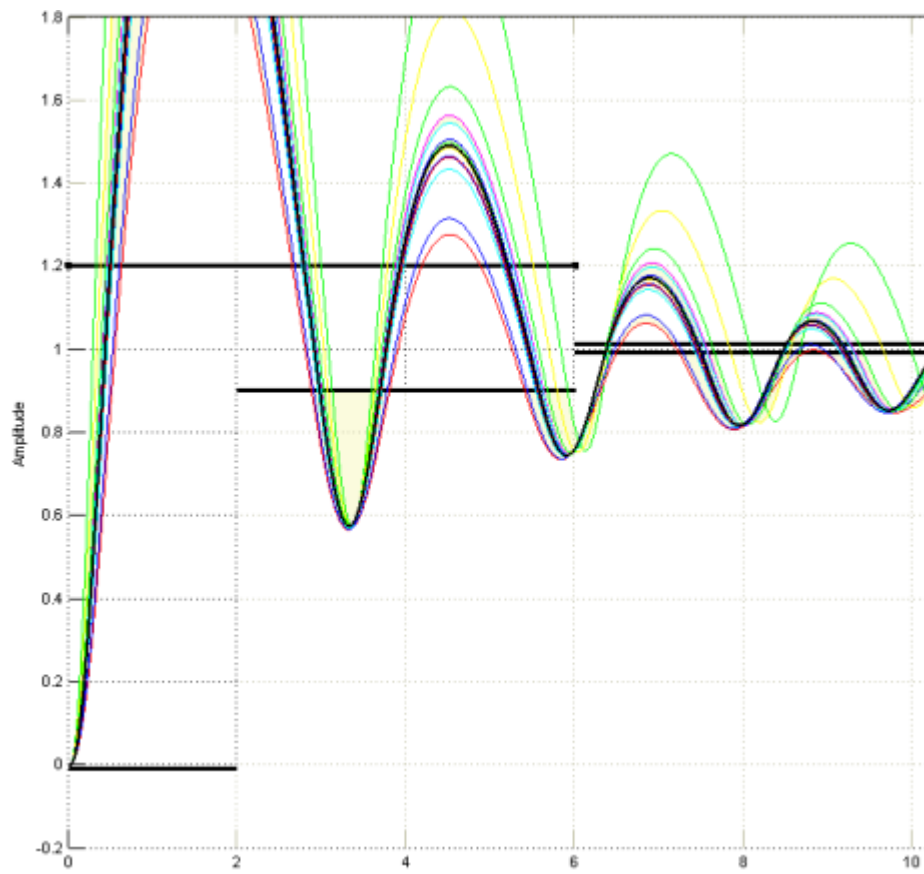


Рисунок 4.3 – Розрахунок коефіцієнта підсилення пропорційного регулятора
Результат обчислення: $p = 1.3213$

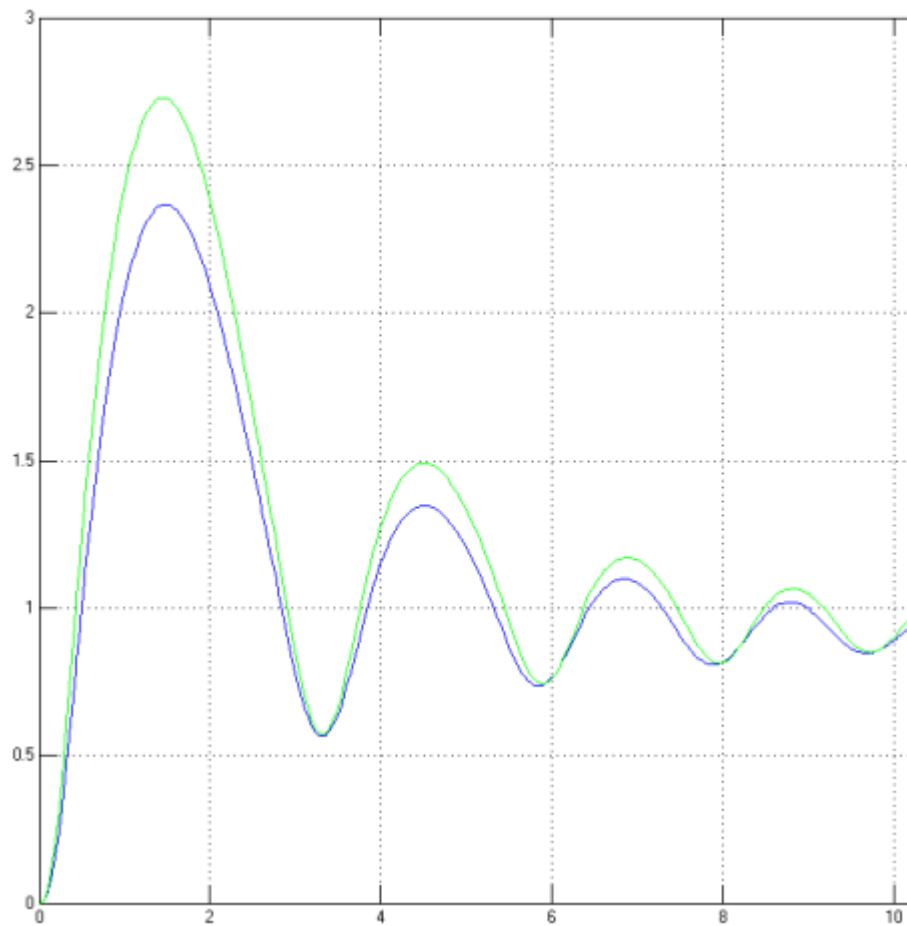


Рисунок 4.4 – Перехідний процес системи з пропорційним регулятором та без регулятора

Інтегральний регулятор:

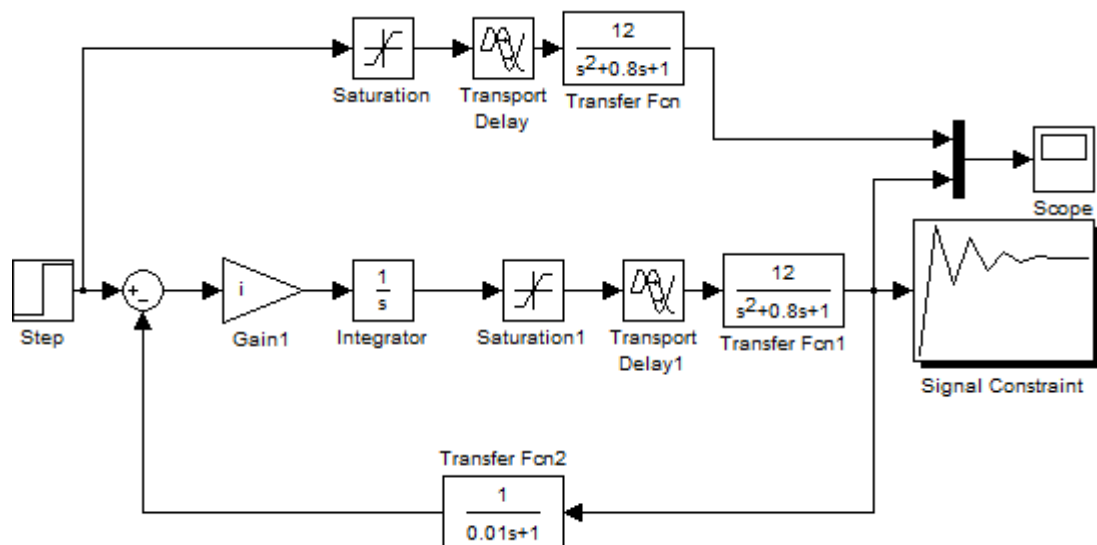


Рисунок 4.5 – Модель системи з інтегральним регулятором
Результат обчислення: $i = 20.7599$

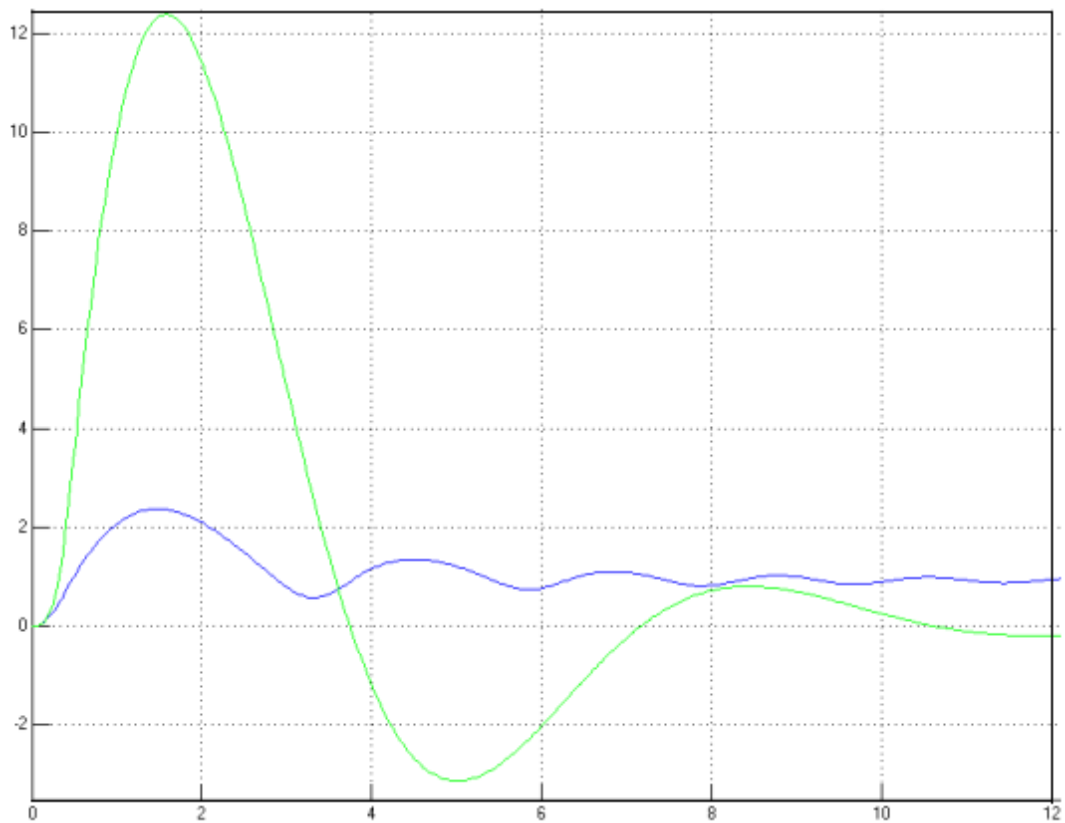


Рисунок 4.6 – Перехідний процес системи з інтегральним регулятором та без регулятора

Пропорційно – інтегральний регулятор:

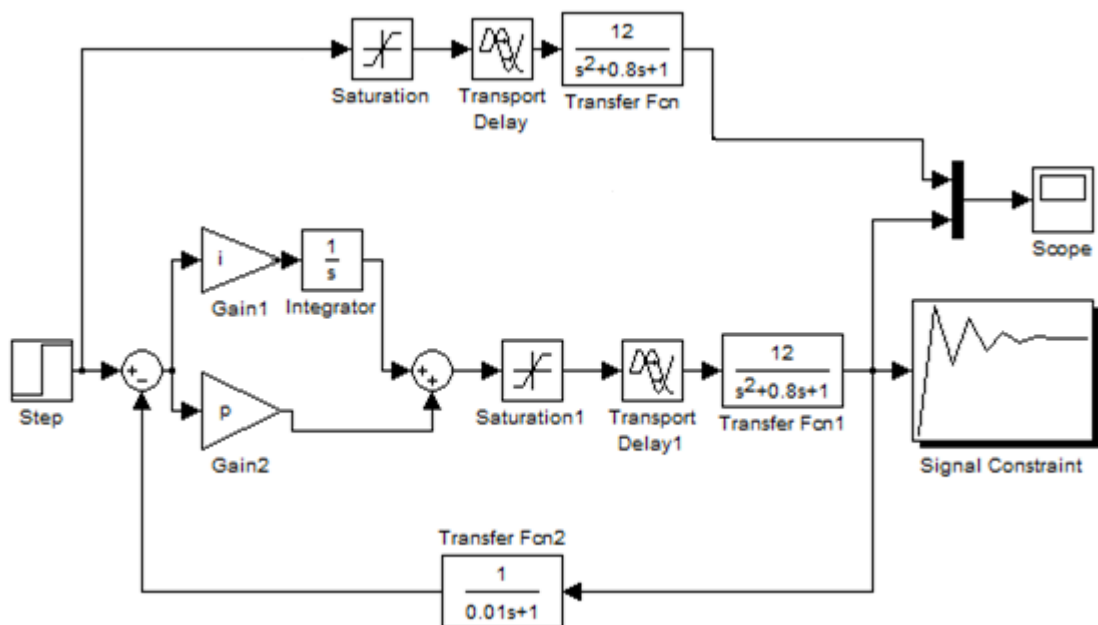


Рисунок 4.7 – Модель системи з пропорційно-інтегральним регулятором

Результат обчислення: $i = 50.1005$, $p = 6.8258$.

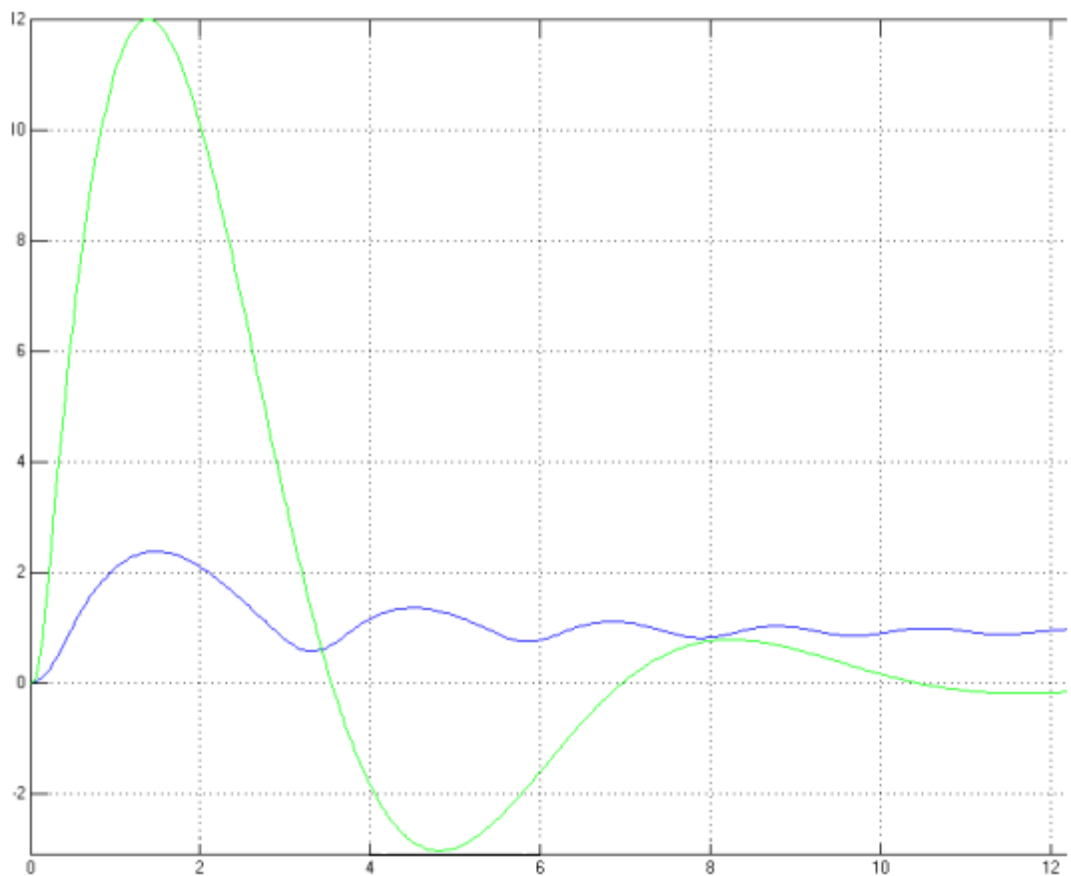


Рисунок 4.8 – Перехідний процес системи з пропорційно-інтегральним регулятором та без регулятора

Пропорційно-диференціальний регулятор:

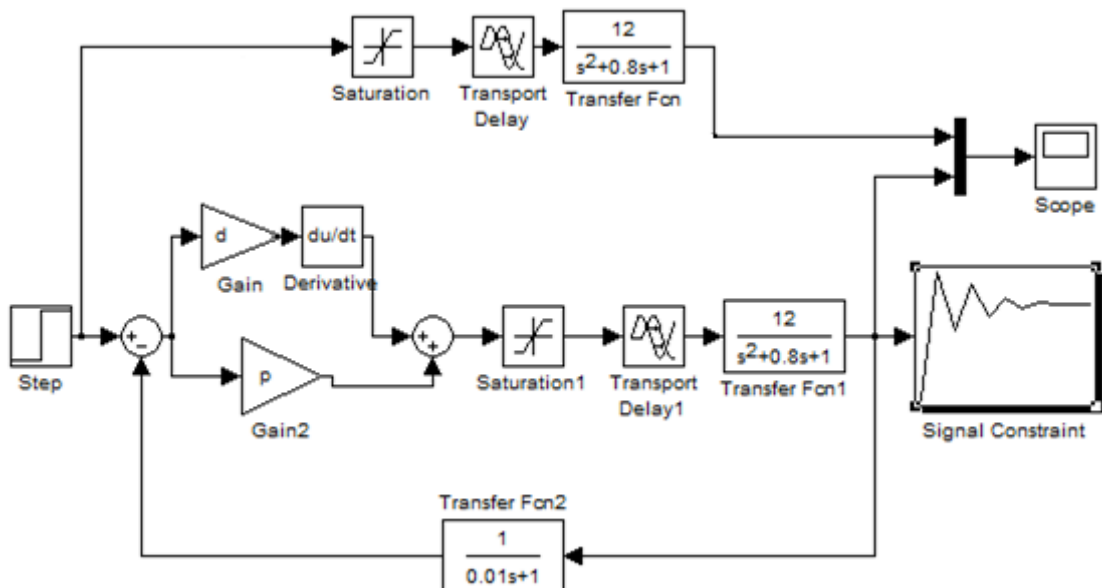


Рисунок 4.9 – Модель системи з пропорційно-диференціальним регулятором

Результат обчислення: $d = 4.8241$, $p = 4.0863$

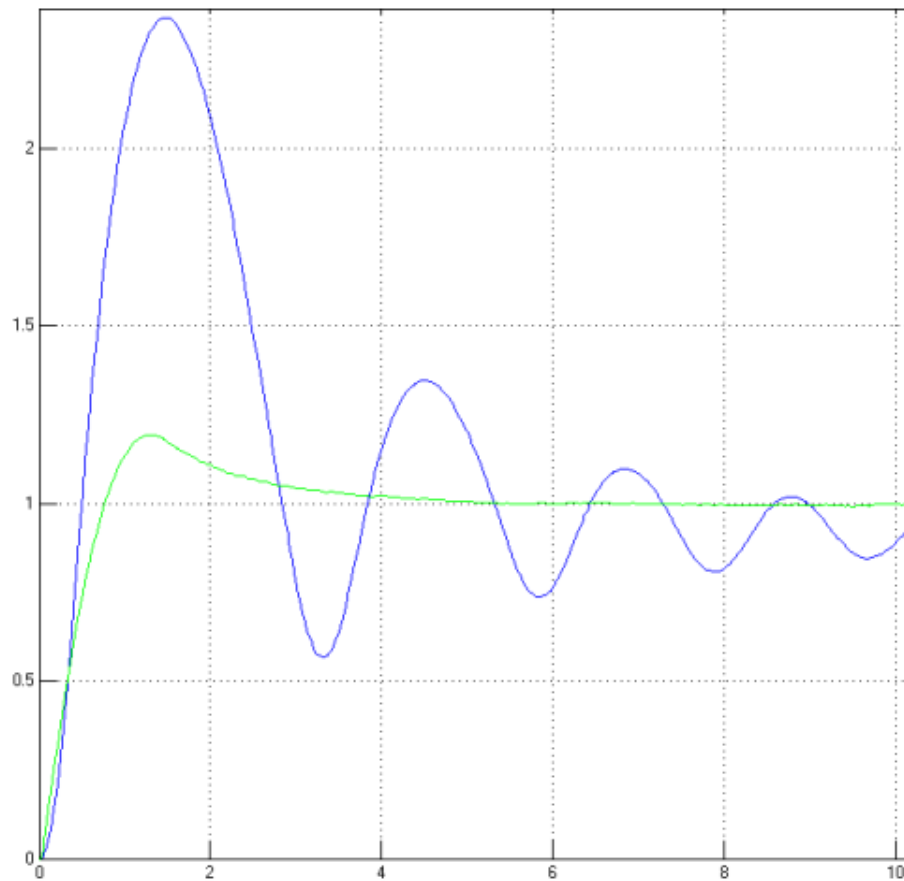


Рисунок 4.10 – Перехідний процес системи з пропорційно-диференціальним регулятором та без регулятора

Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор:

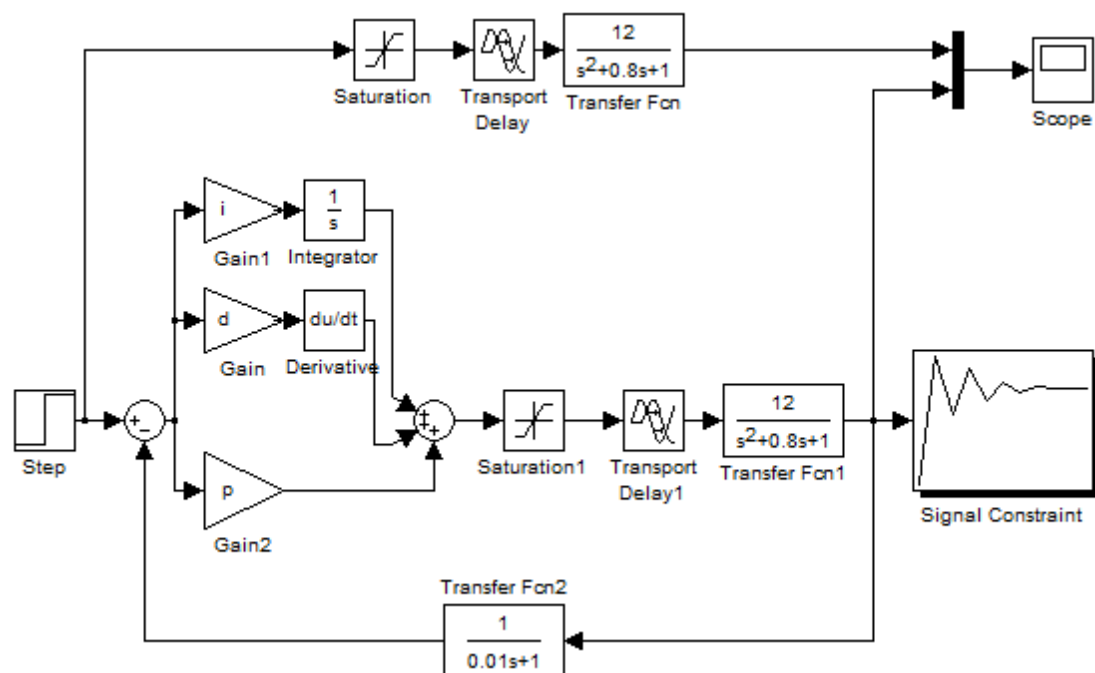


Рисунок 4.11 – Модель системи управління з ПІД регулятором

Результат обчислення: $d = 0.9168$, $i = 0.8560$, $p = 1.2211$

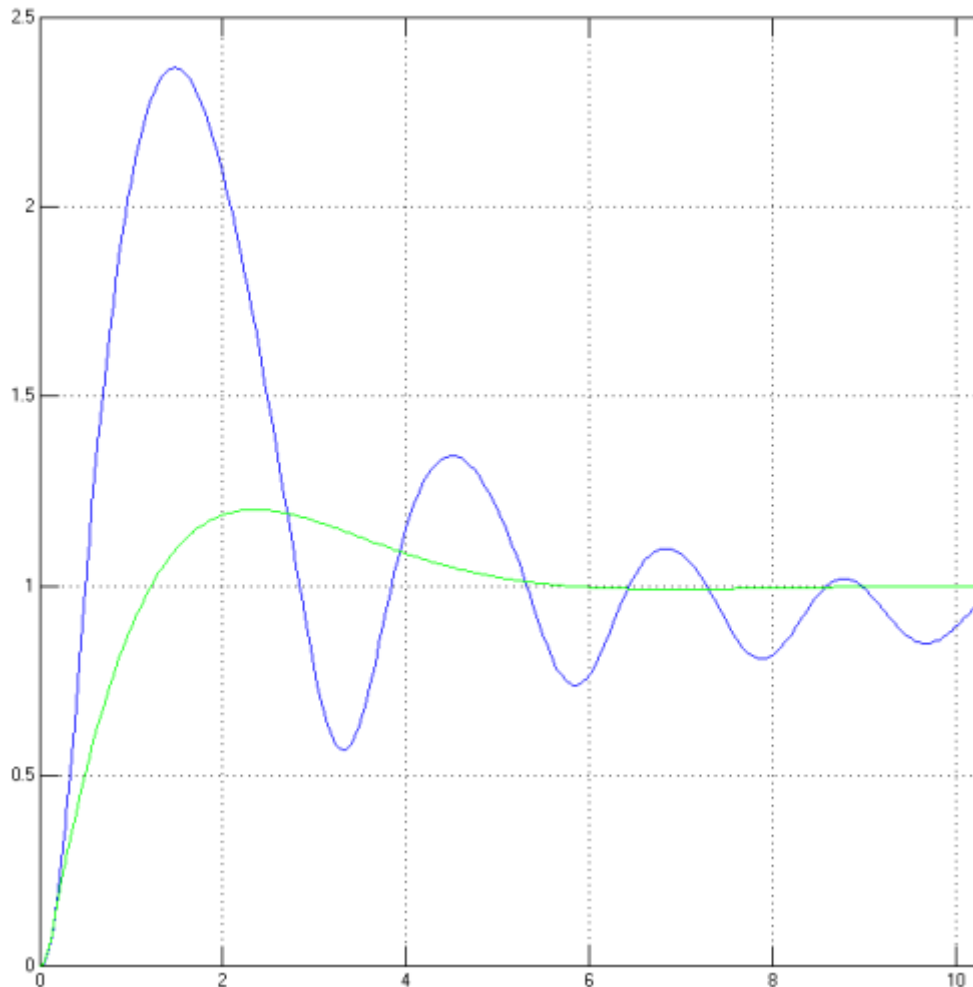


Рисунок 4.12 – Перехідний процес системи з пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором та без регулятора

Розрахунок параметрів регуляторів аналітично

Наочну демонстрацію впливу параметрів ПІД-регулятора на перехідну характеристику системи можна побачити за посиланням: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PID_Compensation_Animated.gif.

Для підбору параметрів регулятора частіше за все застосовують методи дослідження об'єкту в порівнянні з моделями першого або другого порядку. Для прикладу розглянемо метод з застосуванням моделі першого порядку.

Модель першого порядку з транспортною затримкою описується виразом:

$$y(t) = \begin{cases} y_{уст} \left[1 - \exp\left(-\frac{t-L}{T}\right) \right] + y_0, & t \geq L \\ y_0, & t < L \end{cases}$$

де $y(t)$ – вихідна величина об'єкта; y_0 – значення вихідної величини при $t < L$; L – затримка; T – постійна часу; t – час; $y_{уст}$ – усталене значення вихідної величини. Коефіцієнт передачі можна виразити наступним чином:

$$K_p = \frac{(y_{уст} - y_0)}{u_{max}},$$

де u_{max} – амплітуда вхідного стрибку («р» – від слова «process»). Тоді модель першого порядку можна переписати у вигляді:

$$y(t) = \begin{cases} K_p \left[1 - \exp\left(-\frac{t-L}{T}\right) \right], & t \geq L \\ 0, & t < L \end{cases}$$

Для дослідження необхідно перейти до передатної функції об'єкта управління першого порядку з транспортною затримкою L :

$$W(s) = \frac{K_p}{(sT + 1)} e^{-sL}$$

Налаштування параметрів регулятора по методу Зіглера-Нікольса.

Зіглер і Нікольс запропонували метод розрахунку ПІД-регулятора, заснований на параметрах відгуку об'єкта на одиничний стрибок.

Вихідна величина регулятора описується наступним рівнянням:

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

де t – час; K, T_i, T_d – пропорційний коефіцієнт, постійна часу інтегрування, постійна часу диференціювання.

Таблиця 4.1 – Формули для розрахунку коефіцієнтів регулятора

	Розрахунок по реакції на стрибок		
Регулятор	K	T_i	T_d
П	$\frac{1}{a}$	-	-
ПІ	$\frac{0,9}{a}$	$\frac{3L}{K}$	-
ПІД	$\frac{1,2}{a}$	$\frac{0,9L}{K}$	$\frac{0,5L}{K}$

Для розрахунку параметрів регулятора використовуються всього дві змінні a та L .

У випадку, коли перехідний процес описується моделлю першого порядку з затримкою, його не можна характеризувати одним параметром «постійна часу», як для процесів без затримки. Тому використовують поняття «середня тривалість перехідного процесу» (average residence time), яке визначається рівнянням:

$$T_{ar} = T + L,$$

де T – постійна часу; L – транспортна затримка.

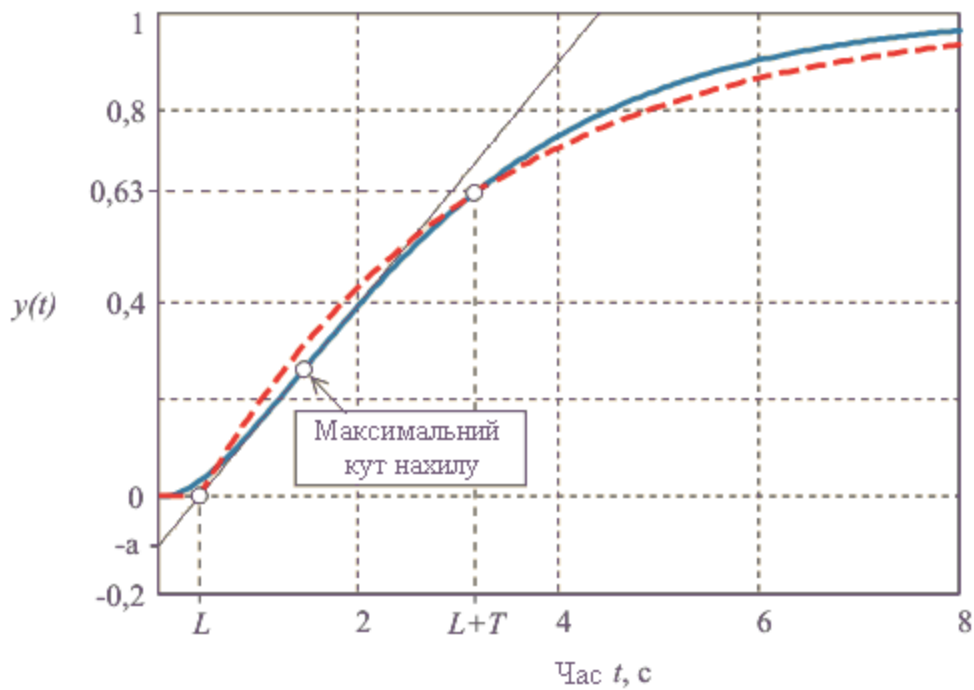


Рисунок 4.13 – Перехідна характеристика об'єкта другого порядку (суцільна лінія) та його апроксимації моделлю (штрихова лінія).

Можна сформулювати один з варіантів критерію, при якому криві об'єкта та моделі першого порядку можна вважати приблизно співпадаючими. Ця умова являє собою перетин перехідних характеристик моделі та об'єкта на рівні $1 - \exp(-1) = 0,63$. Оскільки в точці перетину $(t - L)/T = 1$, то можна отримати, що абсциса точки перетину t рівна $L + T = t$. В цьому рівнянні дві невідомі: L та T .

Для знаходження L проводять дотичну в точці максимального кута нахилу дотичної (на Рисунок 4.13 точка «Максимальний кут нахилу») до вісі абсцис. При цьому затримка L повинна бути визначена як точка перетину дотичної з віссю часу.

Коефіцієнт K_p моделі першого порядку визначається як відношення усталеного значення вихідної величини до амплітуди тестового стрибка (одиничного в нашому випадку).

Оскільки тангенс кута нахилу дотичної рівний $\frac{a}{L}$, то отримуємо, що

$$\frac{K_p}{T} = \frac{a}{L}.$$

Розрахуємо параметри регулятора заданої ПФ.

$$\text{Коефіцієнт передачі моделі } K_p = \frac{y_{уст}}{A_{вх}} = \frac{0,923}{1} = 0,923$$

З перехідного процесу замкненої системи об'єкта знаходимо затримку L .

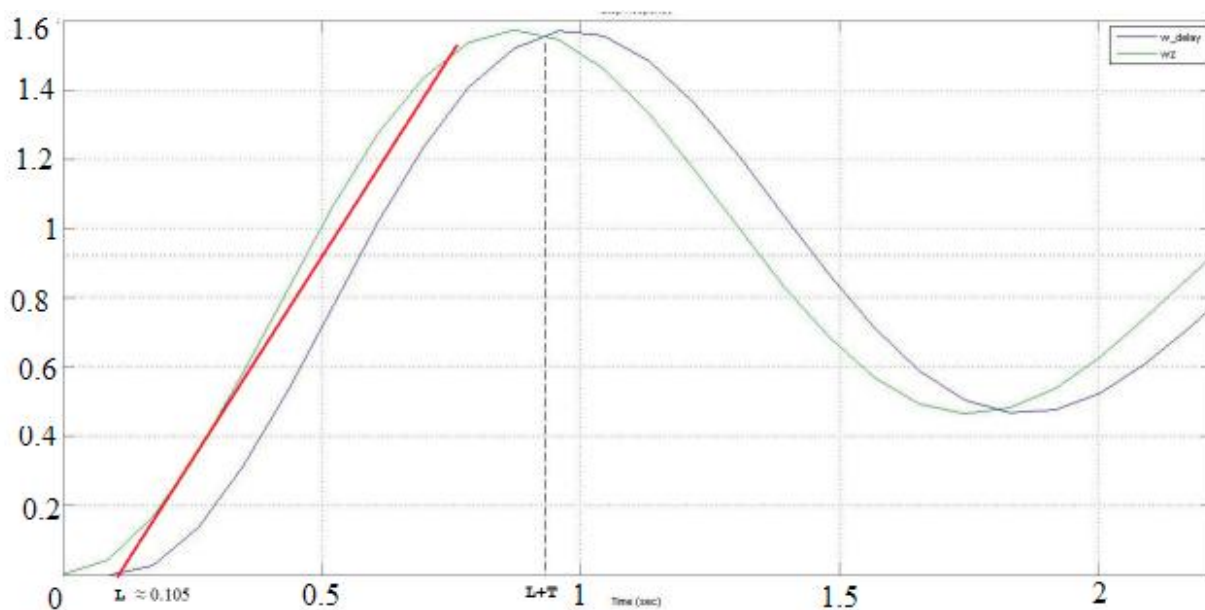


Рисунок 4.14 – Перехідний процес системи з запізненням та без запізнення

$$T = 0.63 - 0.105 = 0.525$$

```
>> w_delay = tf([0.923],[0.525 1],'inputdelay',0.105)
```

Transfer function:

$$\frac{0.923}{\exp(-0.105*s) * (0.525 s + 1)}$$

```
>> wz=tf([12],[1 0.8 13])
```

Transfer function:

$$\frac{12}{s^2 + 0.8 s + 13}$$

Таким чином, t перетину дорівнює приблизно 0.585 с.

$$T = 0.585 - 0.105 = 0.48$$

$$\frac{K_p}{T} = \frac{a}{L}, a = \frac{K_p L}{T} = 0.2019$$

Параметри, отримані ручними розрахунками не є найкращими, їх треба перевіряти та налаштовувати у кожному окремому.

Параметри, розраховані для П регулятора:

$$K = \frac{1}{a} = \frac{1}{0.2019} = 4.9529$$

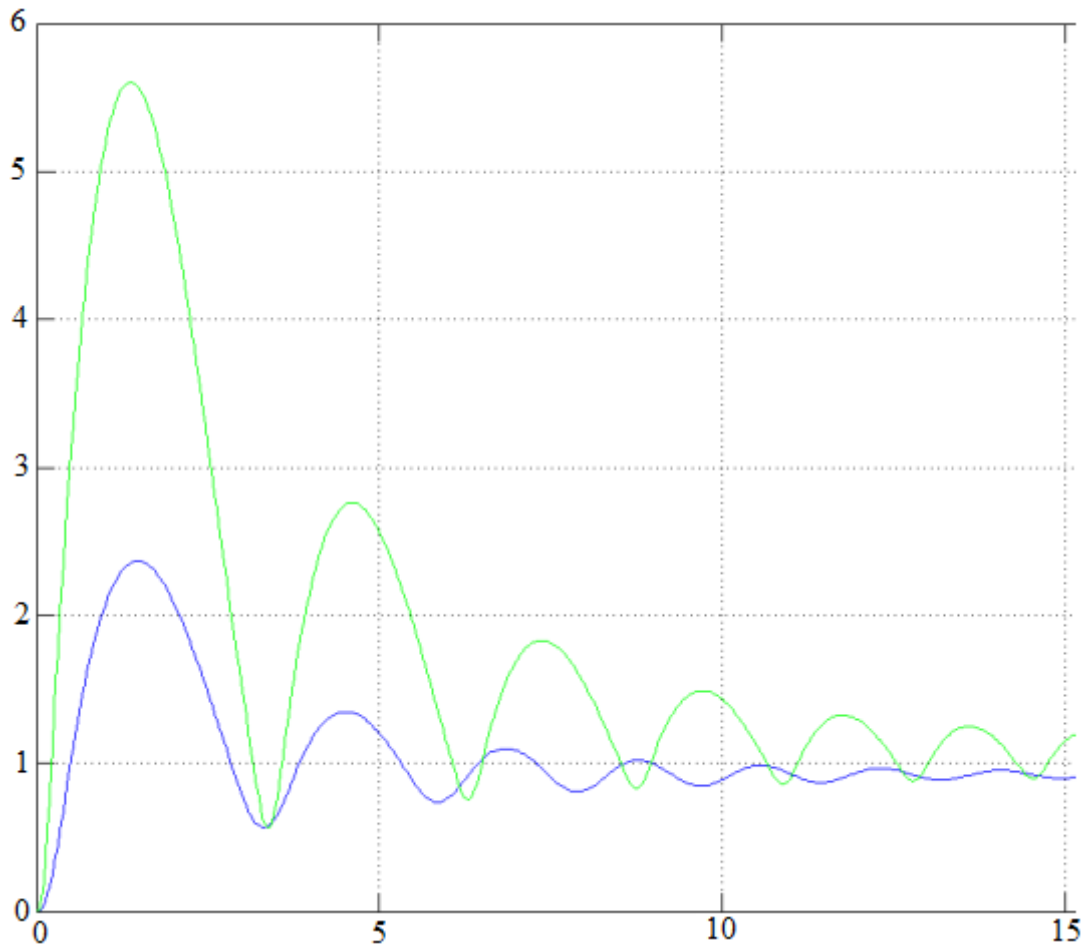


Рисунок 4.15 – Перехідний процес з П-регулятором та без регулятора

Параметри, розраховані для ПІ регулятора:

$$K = \frac{0.9}{a} = \frac{0.9}{0.2019} = 4.4577$$

$$T_i = \frac{3L}{K} = \frac{3 \times 0.105}{4.4577} = 0.0707$$

$$\frac{1}{T_i} = 14.1514$$

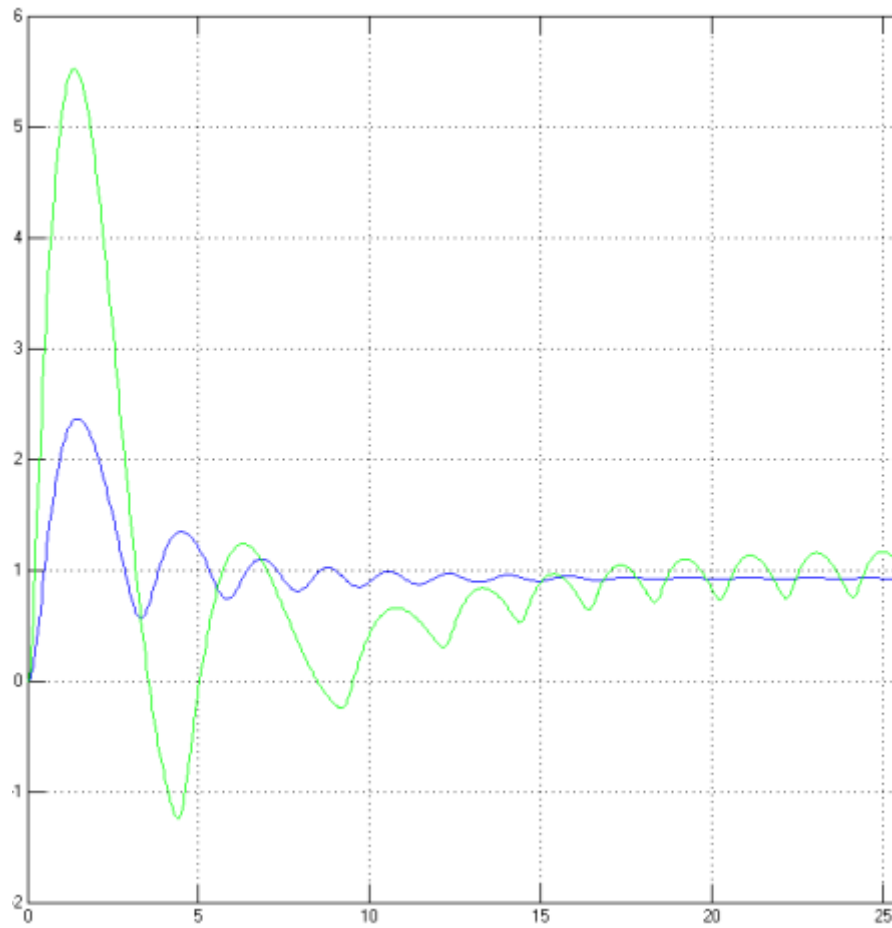


Рисунок 4.16 – Перехідний процес з ПІ-регулятором та без регулятора

Параметри, розраховані для ПІД регулятора:

$$K = \frac{1.2}{a} = \frac{1.2}{0.2019} = 5.9435$$

$$T_i = \frac{0.9L}{K} = \frac{0.9 \times 0.105}{5.9435} = 0.0159$$

$$\frac{1}{T_i} = 62.8942$$

$$T_d = \frac{0.5L}{K} = \frac{0.5 \times 0.105}{5.9435} = 0.0088$$

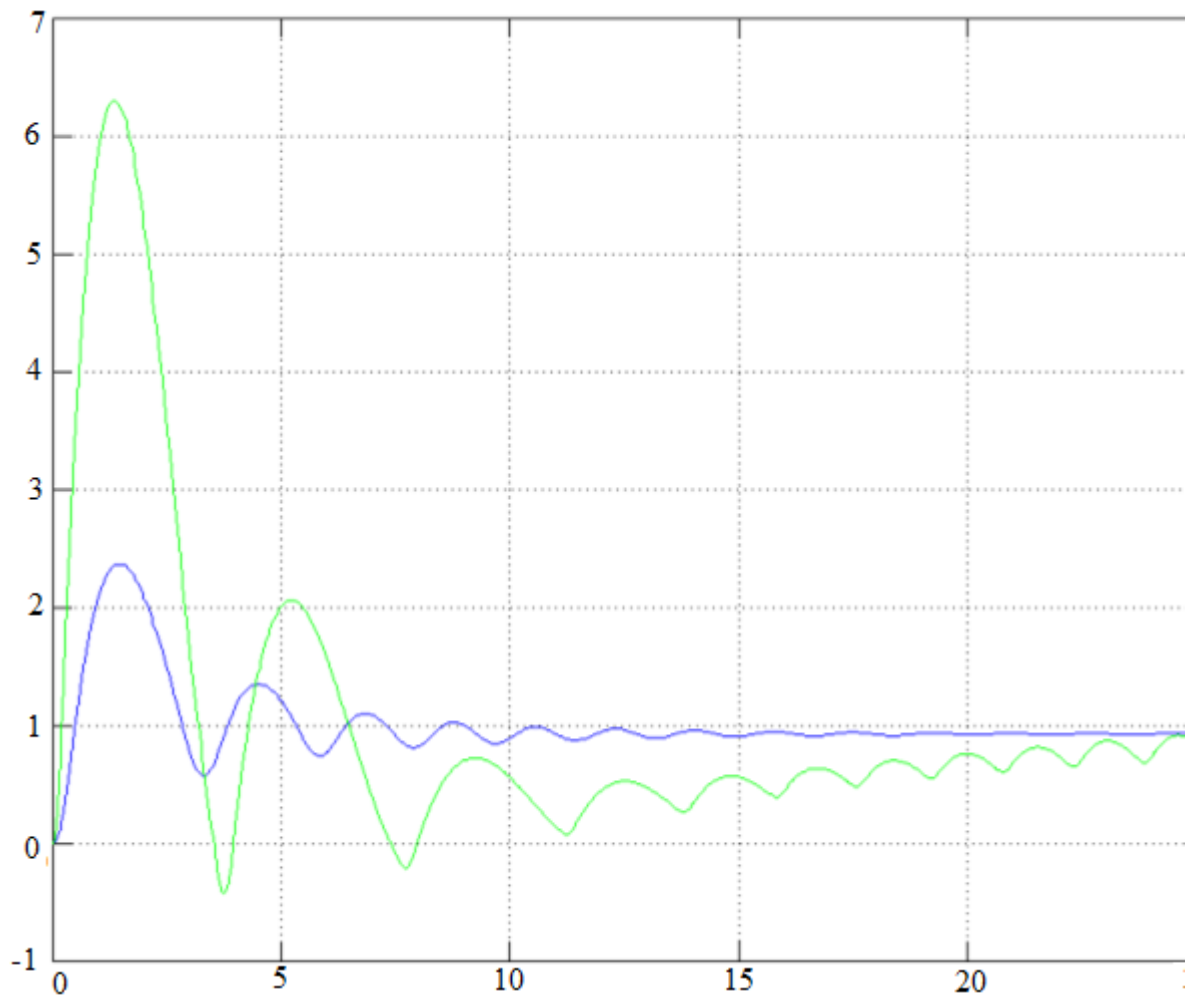


Рисунок 4.17 – Перехідний процес з ПІД-регулятором та без регулятора

Завдання на лабораторну роботу

1. Вибрати варіант завдання на лабораторну роботу з додатка Б за шифром групи та номером студента в списку групи.
2. Побудувати моделі лінійних регуляторів.
3. Розрахувати параметри регуляторів з допомогою Signal Constraint.
4. Розрахувати параметри регуляторів вручну.
5. Оцінити перехідну характеристику об'єкта до та після регулювання засобами MATLAB та ручних розрахунків.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Моделювання систем керування з релейними регуляторами

Мета роботи: Ознайомитись з призначенням, областями застосування та різновидом релейних регуляторів.

Короткі теоретичні відомості

У двопозиційних регуляторах [3-20] вихідна величина приймає лише два значення $\mu_{\max}$ та $\mu_{\min}$ (Рисунок 5.1)

Статична характеристика має вигляд:

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_{\max} & \text{при } \varepsilon(t) \geq a, \\ \mu_{\min} & \text{при } \varepsilon(t) \leq -a, \\ \mu_{\max} & \text{при } -a < \varepsilon(t) < a \text{ ; } \left[\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] < 0, \\ \mu_{\min} & \text{при } -a < \varepsilon(t) < a \text{ ; } \left[\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] > 0, \end{cases}$$

де $[-a; +a]$ – зона неоднозначності регулятора.

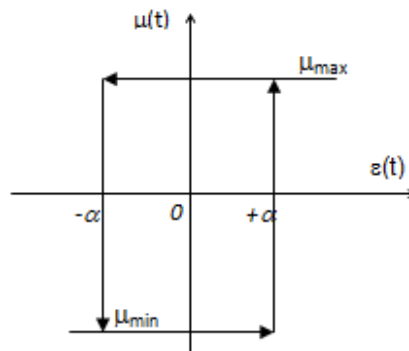


Рисунок 5.1 – Статична характеристика двопозиційного регулятора

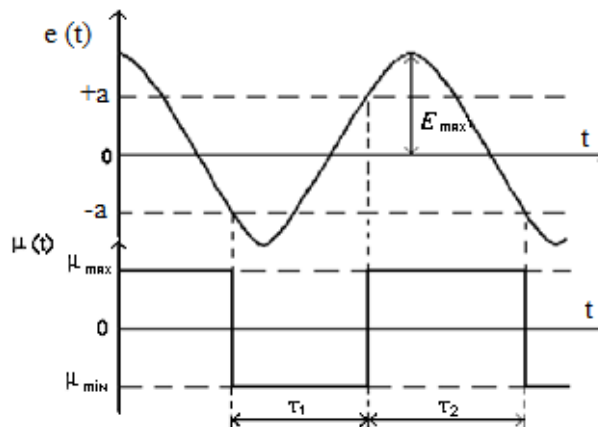


Рисунок 5.2 – Процес формування регулюючого впливу

Процес регулювання вихідної величини двопозиційним регулятором завжди носить коливальний характер. Мінімальна амплітуда коливань відповідає половині зони неоднозначності регулятора.

Характерний вид коливань регульованої величини та відповідний процес формування регулюючого впливу зображений на Рисунок 5.2.

Збільшення зони неоднозначності регулятора приведе до збільшення періоду коливання та зменшенню числа перемикань регулятора. Зменшення числа перемикань регулятора також можливе за рахунок пониження енергії комутованого виконавчого пристрою при μ_{max} . Також збільшенню періоду коливань та зменшенню частоти перемикань регулятора сприяє збільшення постійної часу об'єкту.

Параметрами налаштування регулятора є ширина зони неоднозначності $2a$ та рівень енергії, що відповідає μ_{max} .

Трьохпозиційні регулятори відрізняються від двопозиційних формою статичної характеристики та кількістю рівнів енергії, що підводиться до об'єкту регулювання. Статичні характеристики трьохпозиційних регуляторів завжди мають зону нечутливості, а зона неоднозначності може бути відсутня. Види статичних характеристик зображені на Рисунок 5.3.

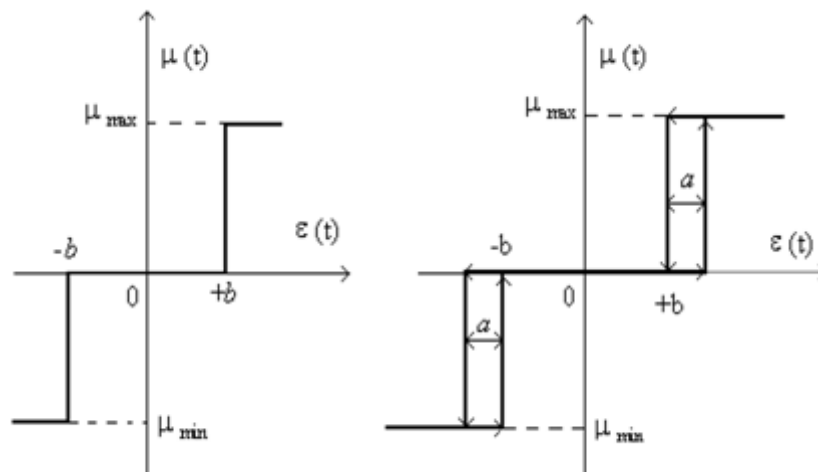


Рисунок 5.3 – Статичні характеристики трьохпозиційних регуляторів

У випадку (а) статична характеристика автоматичного регулятора описується наступним рівнянням:

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_{\max} & \text{при } \varepsilon(t) \geq b ; \\ \mu_{\text{ср}} & \text{при } -b < \varepsilon(t) < b ; \\ \mu_{\min} & \text{при } \varepsilon(t) \leq -b ; \end{cases}$$

А у випадку (б) описується таким рівнянням:

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_{\max} & \text{при } \varepsilon(t) \geq a + b ; \\ \mu_{\text{ср}} & \text{при } -b < \varepsilon(t) < -b ; \\ \mu_{\min} & \text{при } \varepsilon(t) < -(b + a) ; \\ \mu_{\max} & \text{при } b < \varepsilon(t) < (b + a) ; \left[\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] < 0 ; \\ \mu_{\text{ср}} & \text{при } (b + a) > \varepsilon(t) > b ; \left[\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] > 0 ; \\ \mu_{\text{ср}} & \text{при } -(b + a) < \varepsilon(t) < -b ; \left[\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] < 0 ; \\ \mu_{\min} & \text{при } -(b + a) < \varepsilon(t) < -b ; \left[\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] > 0 . \end{cases}$$

Процес формування регулюючого впливу у регуляторі з зоною нечутливості зображено на Рисунок 5.4. Трьохпозиційні регулятори забезпечують менший рівень коливань регульованого параметру, а при виборі проміжного стану регулюючого впливу $m_{\text{ср}}$, близького до номінального значення, для заданого рівня регулювання можна утримувати регульовану величину у проміжку зони нечутливості.

Параметрами налаштування трьохпозиційного регулятора є ширина зони нечутливості, величина проміжного значення регулюючого впливу та рівні $\mu_{\max}$ та $\mu_{\min}$. У тому випадку, коли в якості виконавчого пристрою використовується механізм інтегруючого типу (виконавчий двигун), при значеннях помилки регулювання $\varepsilon(t) < (-b)$ або $\varepsilon(t) > (b)$, двигун з максимальною швидкістю переміщує виконавчий орган у напрямку, що зменшує помилку регулювання. У межах зони нечутливості автоматичний регулятор не реагує на величину та знак помилки. Трьохпозиційні автоматичні регулятори також називають регуляторами постійної швидкості.

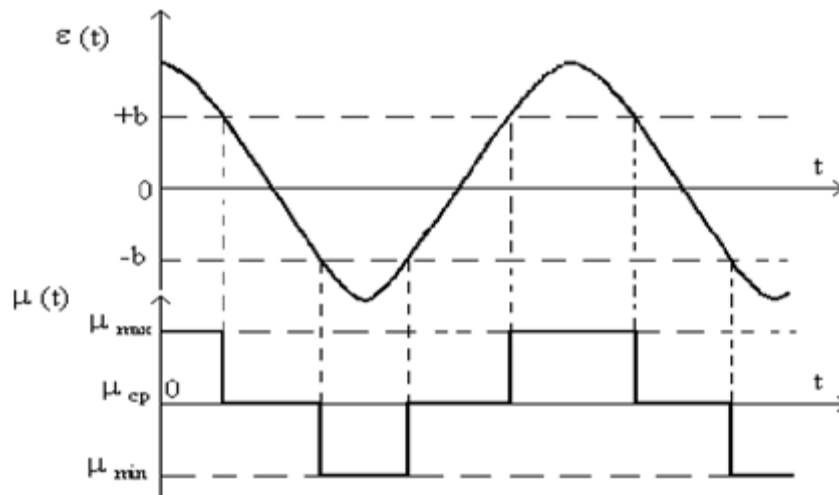


Рисунок 5.4 – Процес формування регулюючого впливу у регуляторі з зоною нечутливості

Порядок виконання роботи

Варіант завдання на дану лабораторну роботу вибираються з додатка А за номером групи та номером студента в списку групи.

Двопозиційний регулятор

Main	Signal Attributes
Switch on point:	
a	
Switch off point:	
-a	
Output when on:	
u	
Output when off:	
-u	

Рисунок 5.5 – Налаштування параметрів блоку Relay

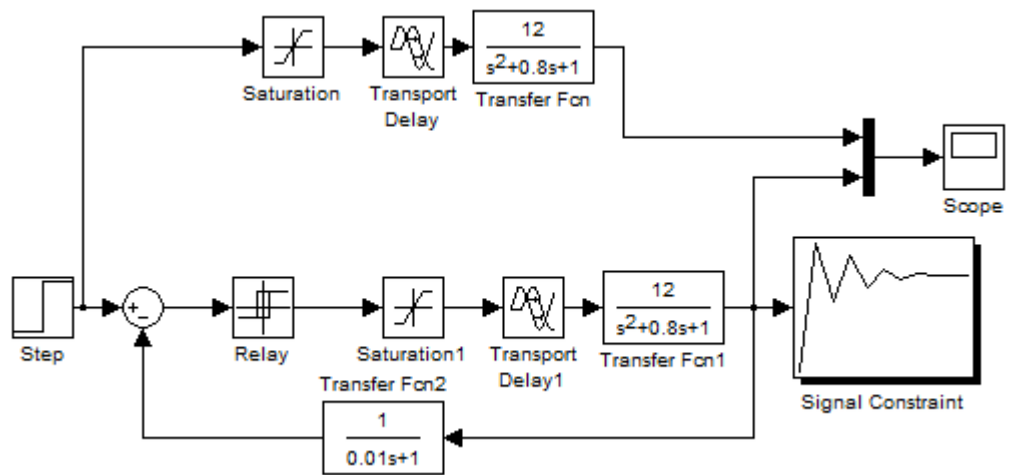


Рисунок 5.6 – Схема дослідження двопозиційного регулятора
Точність 5%

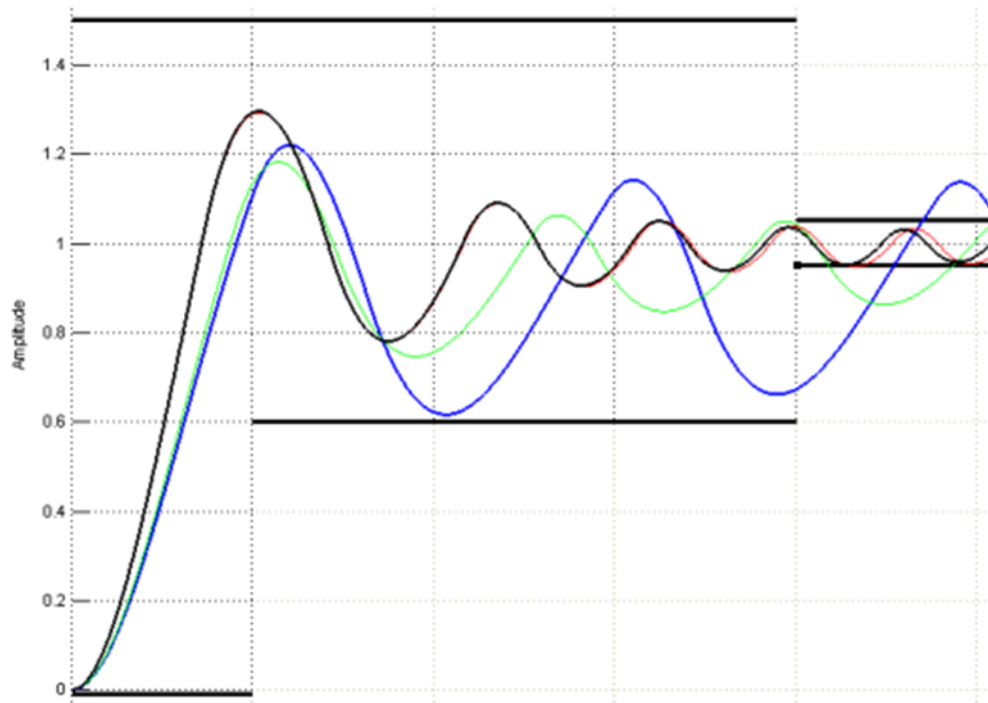


Рисунок 5.7 – Підбір параметрів регулятора за допомогою блоку Signal
Constraint

Були підібрані наступні значення: $a = 0.0022$, $u = 0.1353$

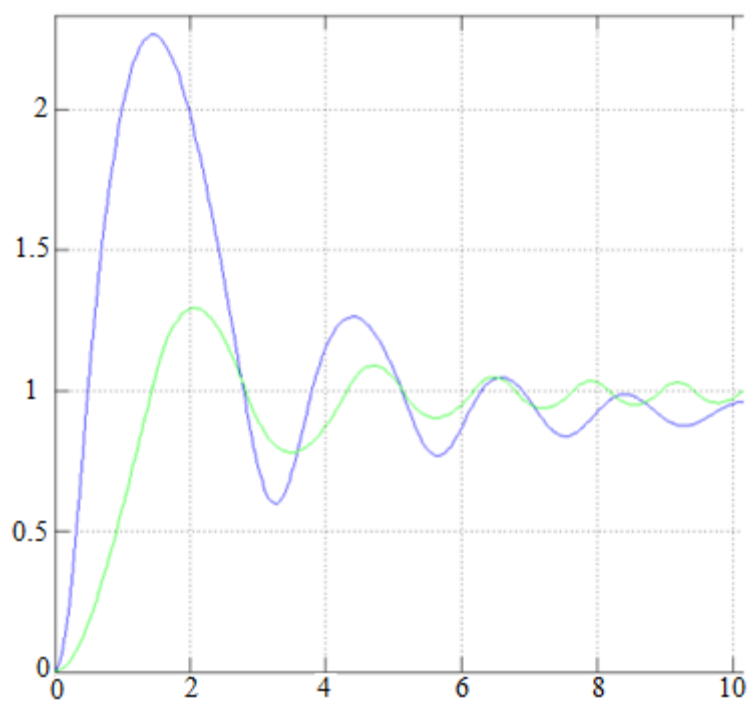


Рисунок 5.8 – Перехідний процес системи з двопозиційним регулятором
точністю 5% та системи без регулятора

Точність 1%

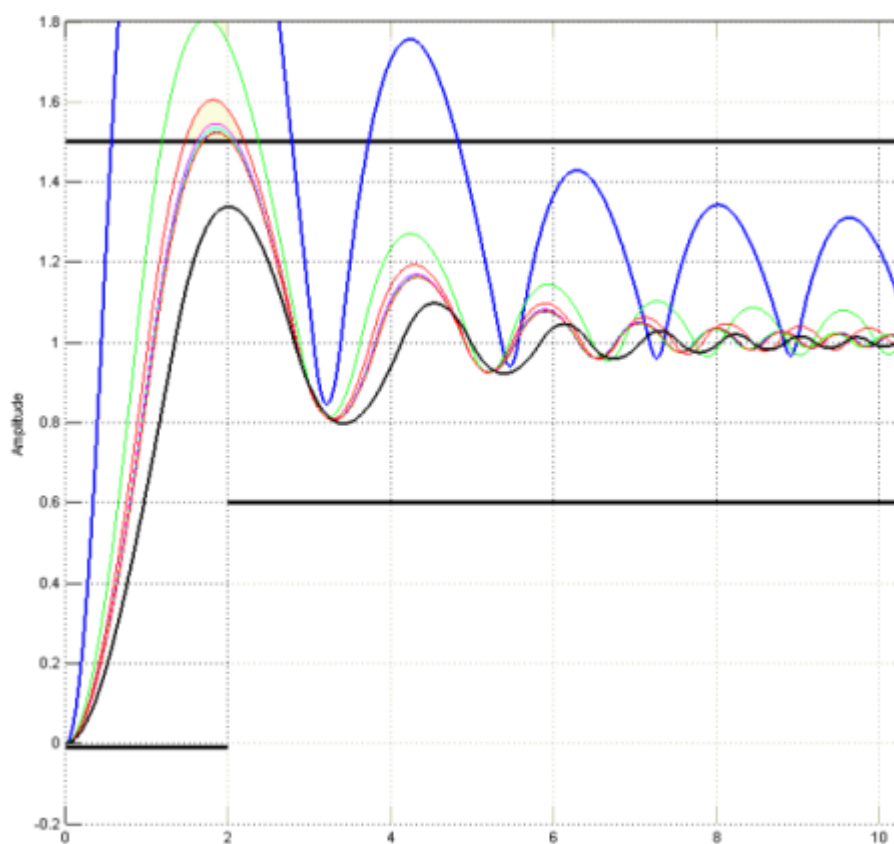


Рисунок 5.9 – Підбір параметрів регулятора за допомогою блоку Signal
Constraint

Були підібрані наступні значення: $a = 1.1168e-007$, $u = 0.1488$

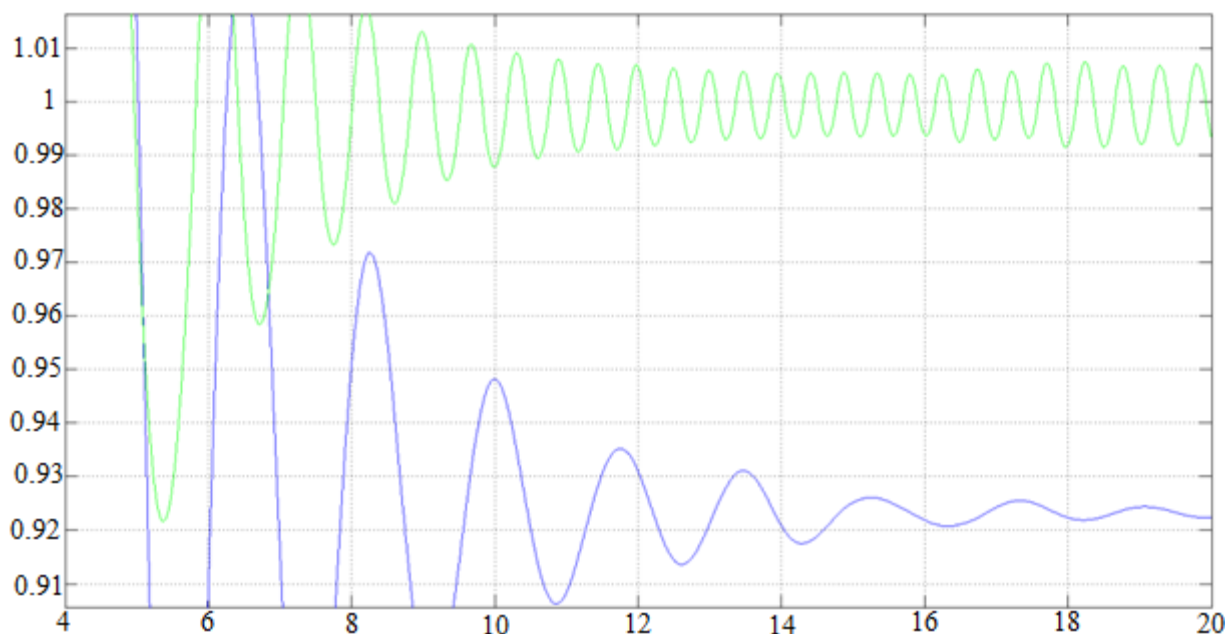


Рисунок 5.10 – Перехідний процес системи з двопозиційним регулятором з точністю 1% та системи без регулятора

Точність 0.1%

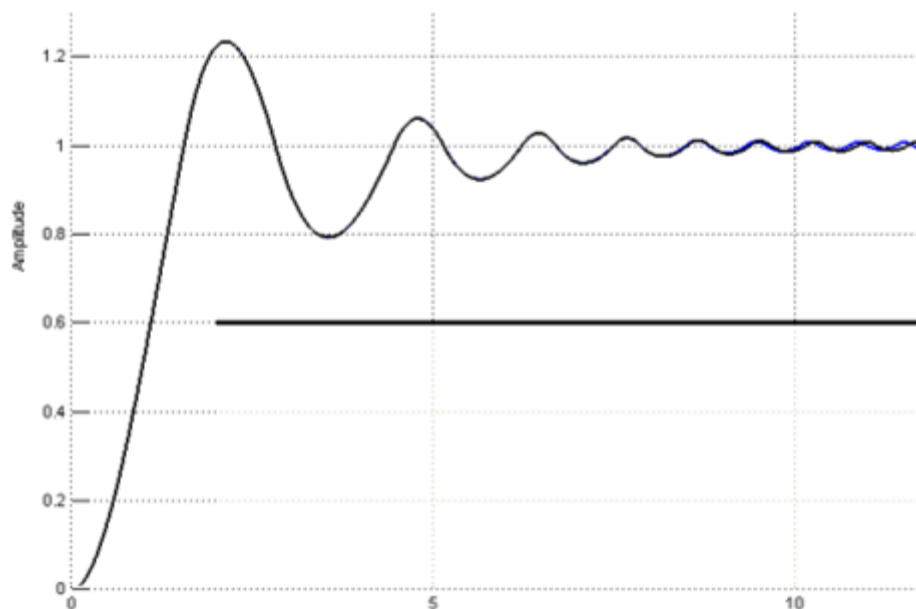


Рисунок 5.11 – Підбір параметрів регулятора за допомогою блоку Signal Constraint

Були підібрані наступні значення: $a = 3.4248e-005$, $u = 0.1215$

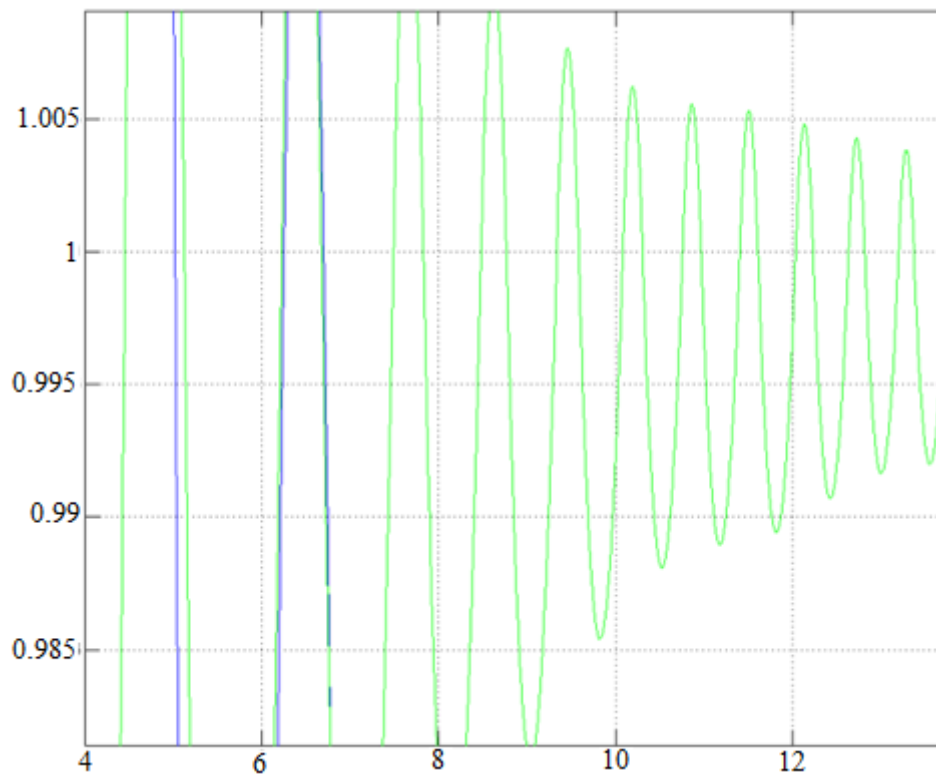


Рисунок 5.12 – Перехідний процес системи з двопозиційним регулятором з точністю 0,1% та системи без регулятора (збільшений фрагмент)

Трьохпозиційний регулятор

Block Parameters: Relay1	Block Parameters: Relay
Main Signal Attributes Switch on point: u+b Switch off point: u Output when on: A Output when off: 0	Main Signal Attributes Switch on point: -u Switch off point: -u-b Output when on: -A Output when off: 0

Рисунок 5.13 – Налаштування параметрів блоків Relay та Relay1

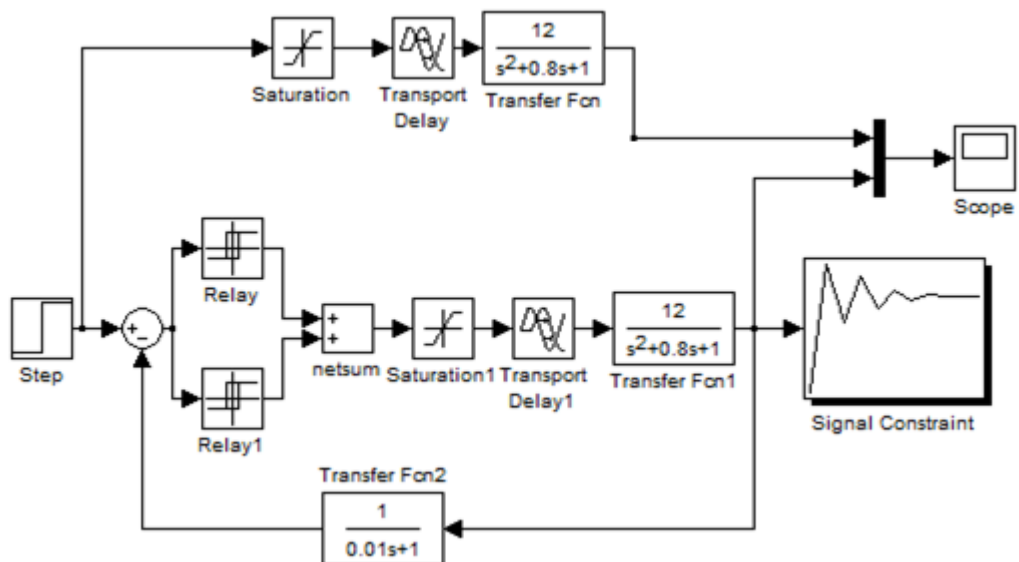


Рисунок 5.14 – Схема дослідження системи з трьохпозиційним регулятором

Точність 5%

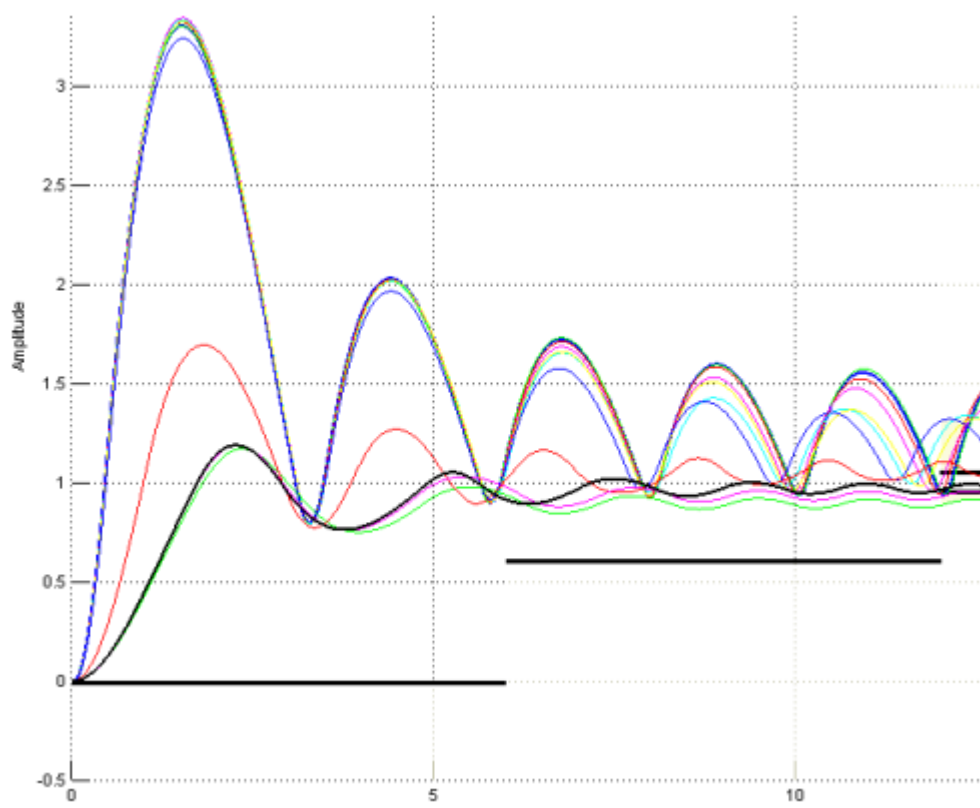


Рисунок 5.15 – Підбір параметрів регулятора за допомогою блоку Signal Constraint

Були підбрані наступні значення: $u = 0.0295$, $b = 4.9033 \times 10^{-4}$, $a = 0.0535$

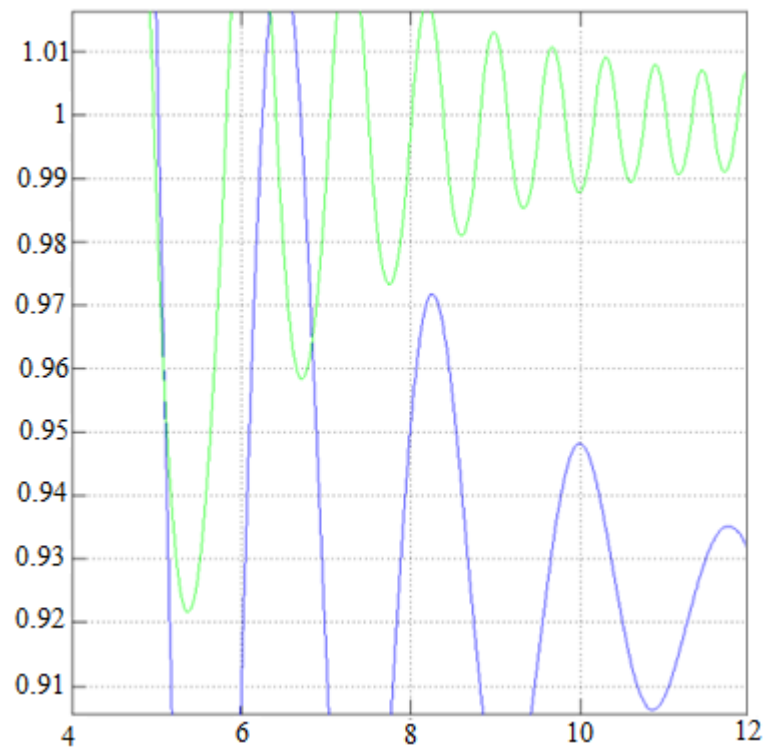


Рисунок 5.16 – Перехідний процес системи з трьохпозиційним регулятором з точністю 5% та системи без регулятора

Точність 1%

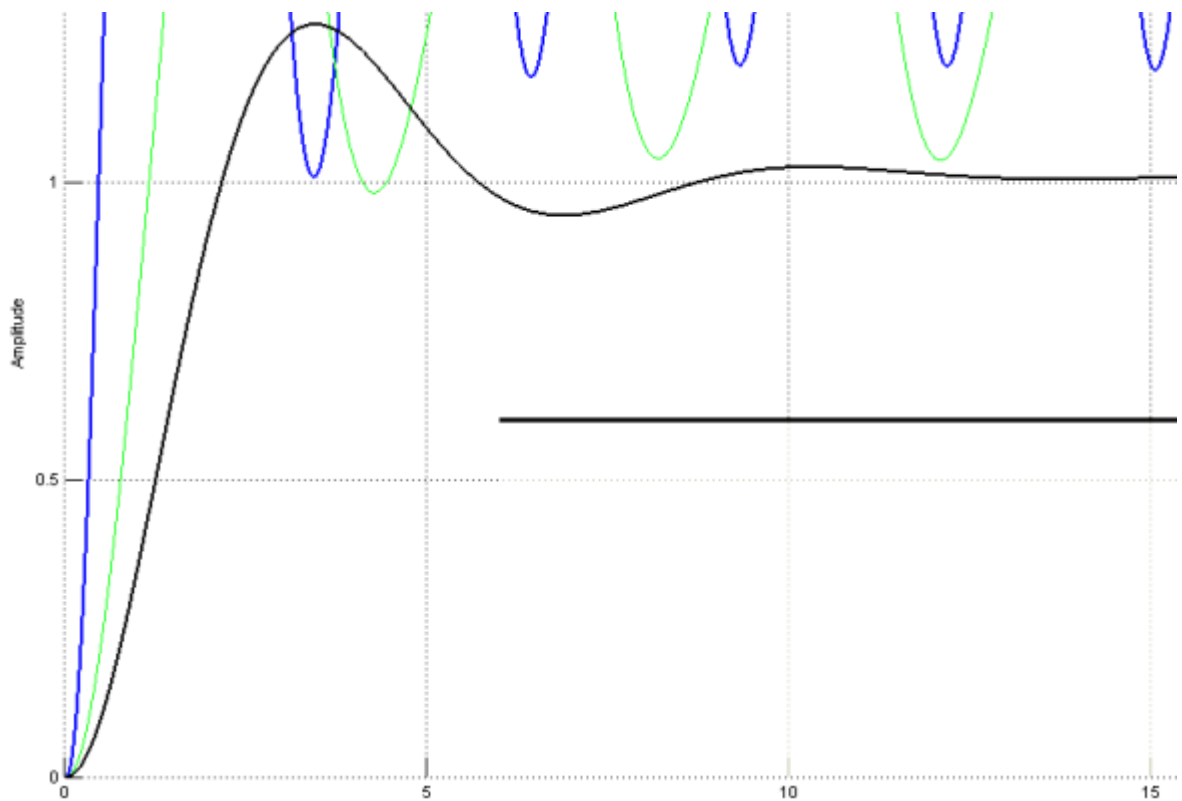


Рисунок 5.17 – Підбір параметрів регулятора за допомогою блоку Signal Constraint

Були підібрані наступні значення: $u = 0.7190$, $b = 0.4077$, $a = 0.0841$

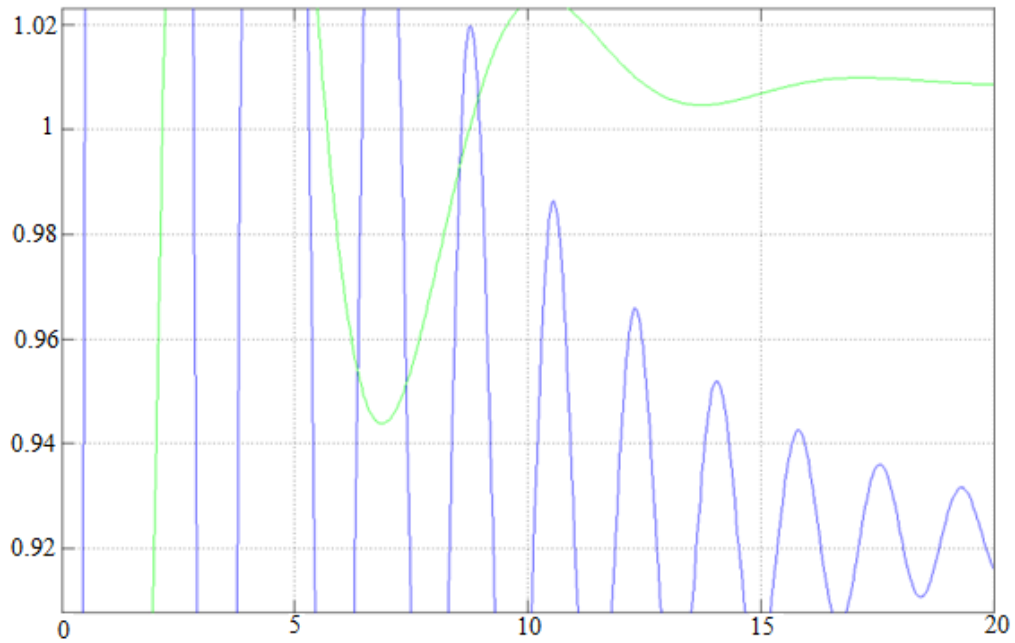


Рисунок 5.18 – Перехідний процес системи з трьохпозиційним регулятором з точністю 1% та системи без регулятора

Точність 0.1%

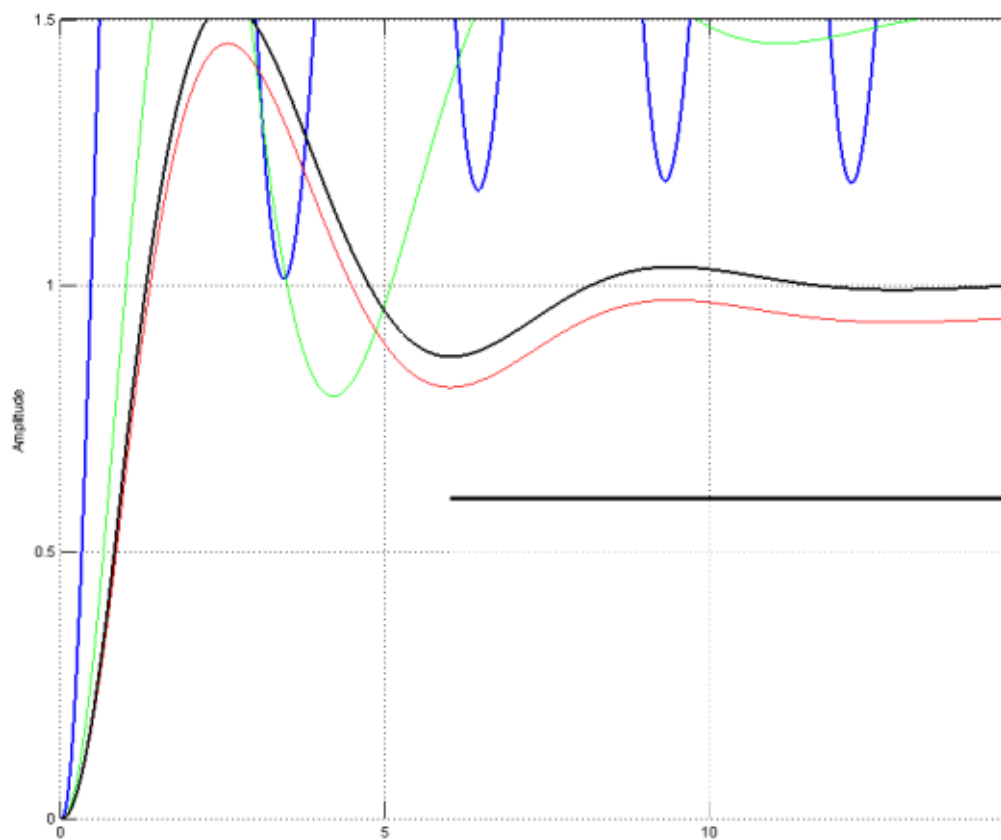


Рисунок 5.19 – Підбір параметрів регулятора за допомогою блоку Signal Constraint

Були підібрані наступні значення: $u=0.4283$, $b=0.4029$, $a=0.0833$

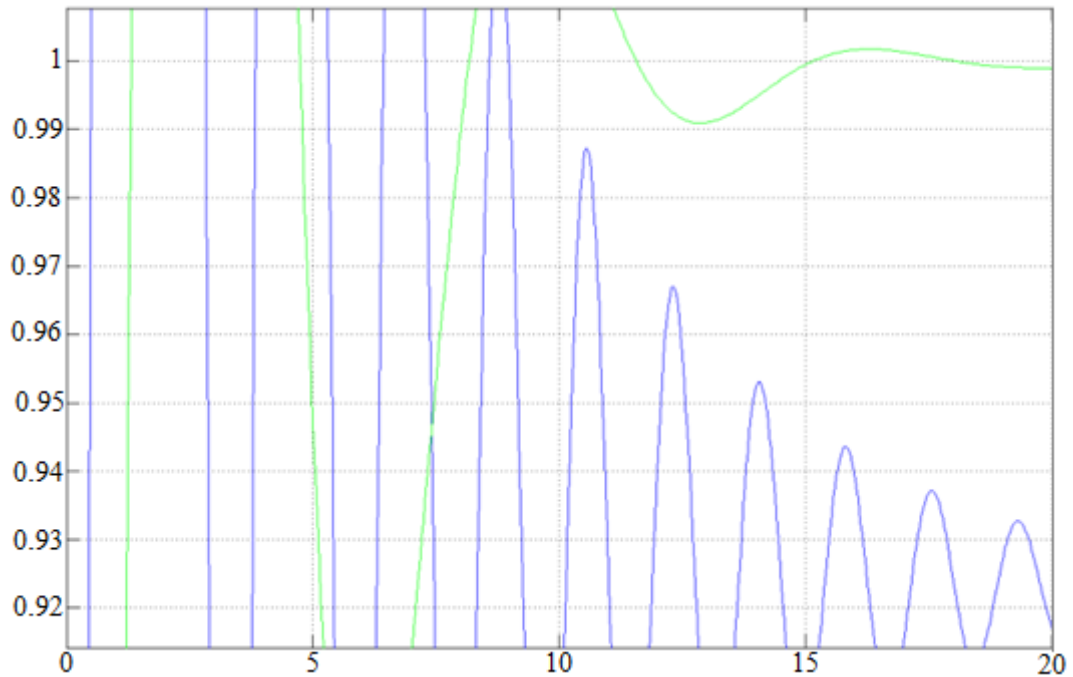


Рисунок 5.20 – Перехідний процес системи з трьохпозиційним регулятором з точністю 0.1% та системи без регулятора

Завдання на лабораторну роботу

1. Вибрати варіант завдання на лабораторну роботу з додатка Б за шифром групи та номером студента в списку групи.
2. Розрахувати двопозиційний і трьохпозиційний регулятор за допомогою Matlab. Побудувати модель в Matlab.
3. Результати проаналізувати і пояснити в висновках.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Моделювання систем керування з імпульсними регуляторами

Мета роботи: вивчити характерні особливості роботи імпульсних регуляторів, їх структурні схеми, приклади технічної реалізації, промислові варіанти імпульсних регуляторів, область їх використання.

Короткі теоретичні відомості

Імпульсними називають регулятори дискретної дії [15-20], в яких вихідний сигнал регулятора представляється одним з параметрів імпульсної послідовності: амплітудою імпульсів. Відповідно до цього регулюючі пристрої РП реалізують такі види модуляції: амплітудно-імпульсну (АІМ), широтно-імпульсну (ШІМ), фазоімпульсний (ФІМ) і частотно-імпульсну (ЧІМ). На рисунках 6.1-6.4 зображені структурні схеми регуляторів, що реалізують розглянуті типи модуляції.

Схема з рисунку 6.1 реалізує регулятор з АІМ. Сигнал помилки $\varepsilon[nT]$ подається на вхід РП в моменти замикання ключа КЕ. Частота замикання ключа задається імпульсами $f[nT]$, що надходять в моменти часу nT . Регулюючий вплив в цьому РП може формуватися по двох- або трьохпозиційним законом або по П-закону. Регулюючий вплив формується в момент замикання ключа. Після розмикання ключа регулюючий вплив зберігається таким, яким він був сформований в момент замикання ключа.

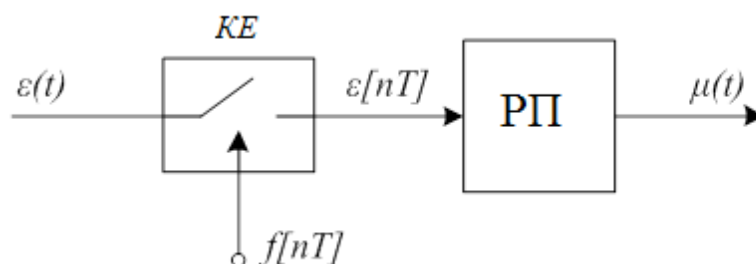


Рисунок 6.1 – Структурна схема регулятора з АІМ

Схема з рисунку 6.2 реалізує регулятор з ШІМ. Сигнал зворотного зв'язку $x_{33}(t)$ в цьому РП інтегрується інтегратором І, порівнюється з

задавальним сигналом $x(t)$. Процес інтегрування сигналу зворотного зв'язку починається в тактові моменти часу nT , при цьому вихідний сигнал регулятора встановлюється рівним μ_{max} . У момент рівності вихідного сигналу інтегратора і задавального сигналу спрацьовує компаратор і встановлює вихідний сигнал регулятора в 0. Обнулення інтегратора здійснюється імпульсами $f[nT]$ в тактові моменти часу nT .

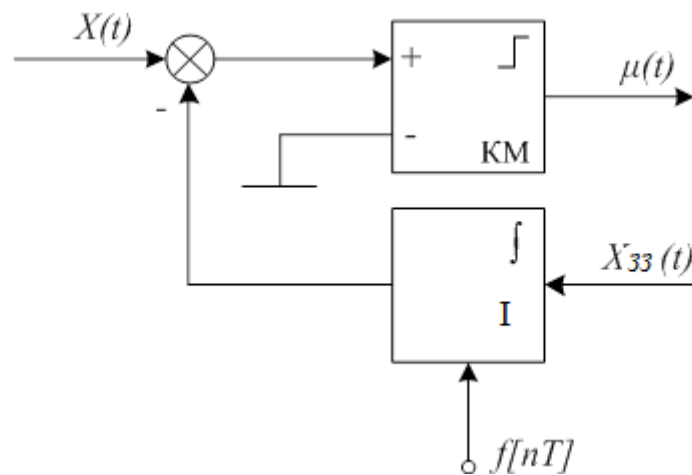


Рисунок 6.2 – Структурна схема регулятора з ШІМ

Схема з рисунку 6.3 реалізує фазоімпульсну регуляцію. Вона відрізняється від попередньої законом формування вихідного сигналу регулятора. У цій схемі в такі моменти nT вихідний сигнал регулятора встановлюється рівним 0, а в момент спрацювання компаратора вихідний сигнал РП до приходу наступного $(n+1)T$ тактового імпульсу дорівнює μ_{max} .

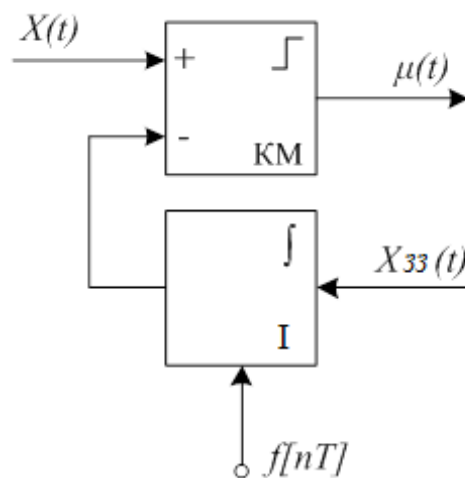


Рисунок 6.3 – Структурна схема регулятора з ФІМ

Схема з рисунком 6.4 реалізує ШІМ. У цій схемі інтегрується задавальний сигнал $x(t)$ і порівнюється компаратором КМ з сигналом $x_{33}(t)$. У момент рівності сигналів інтегратора і зворотного зв'язку компаратор формує імпульс, який обнуляє інтегратор і запускає виконавчий пристрій ВП. ІП, в свою чергу, формує імпульс струму або потужності із заданими параметрами по тривалості і амплітуді.

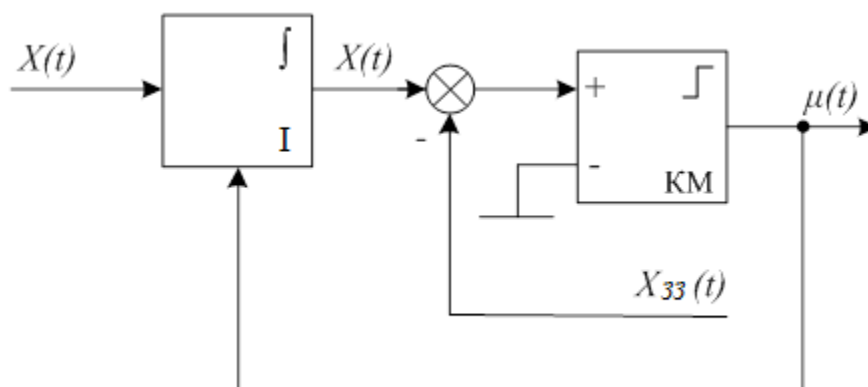


Рисунок 6.4 – Структурна схема регулятора з ЧІМ

Регулюючі пристрої в ШІМ, ФІМ і ЧІМ є пропорційні ланки при виконанні умови $T \ll T_{OP}$.

Імпульсні регулятори в порівнянні з безперервними мають такі переваги: можливість багатоточкового керування, багаторазове використання ліній зв'язку, підвищену завадостійкість. Вони найбільш застосовні для управління багатьма однотипними об'єктами та об'єктами з великими постійними часу, де можна використовувати лише один регулятор, а також для управління об'єктами з великим часом запізнення.

Порядок виконання роботи

Варіант завдання на дану лабораторну роботу вибираються з додатка Б за номером групи та номером студента в списку групи.

- 1) Модель регулятора з АІМ
- а) З релейним регулятором:

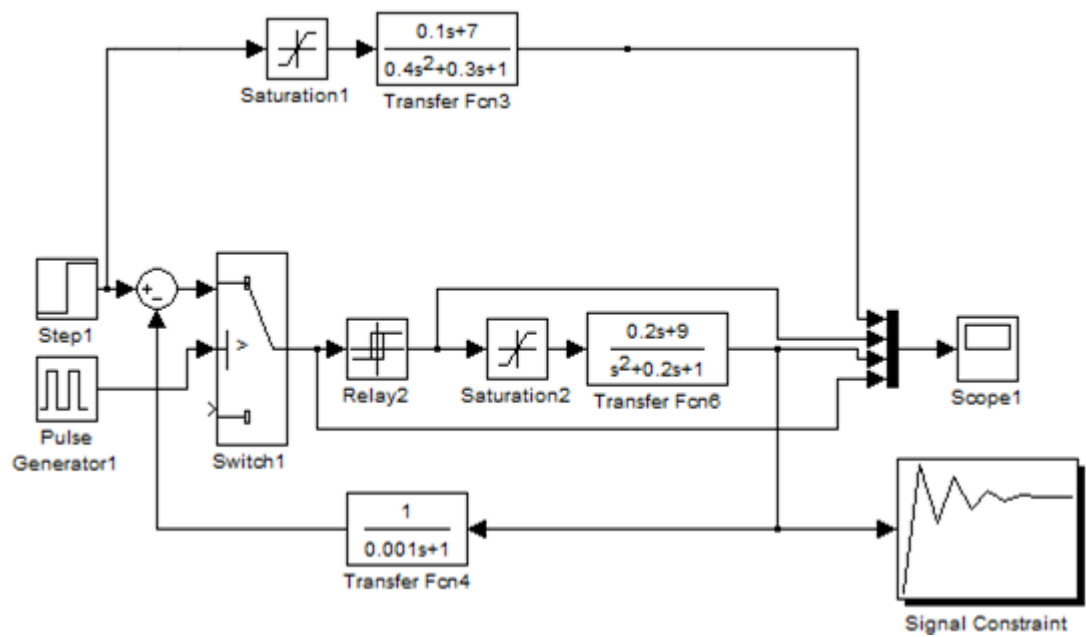


Рисунок 6.5 – Схема дослідження системи з АІМ з релейним регулятором

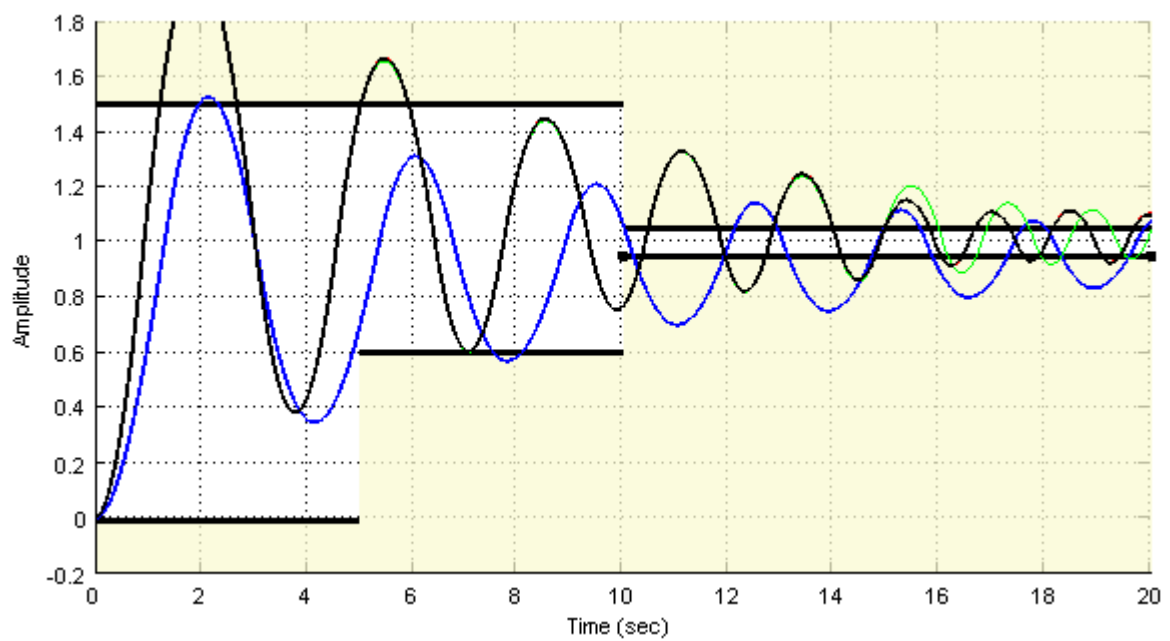


Рисунок 6.6 – Підбір параметрів релейного регулятора за допомогою блоку Signal Constraint

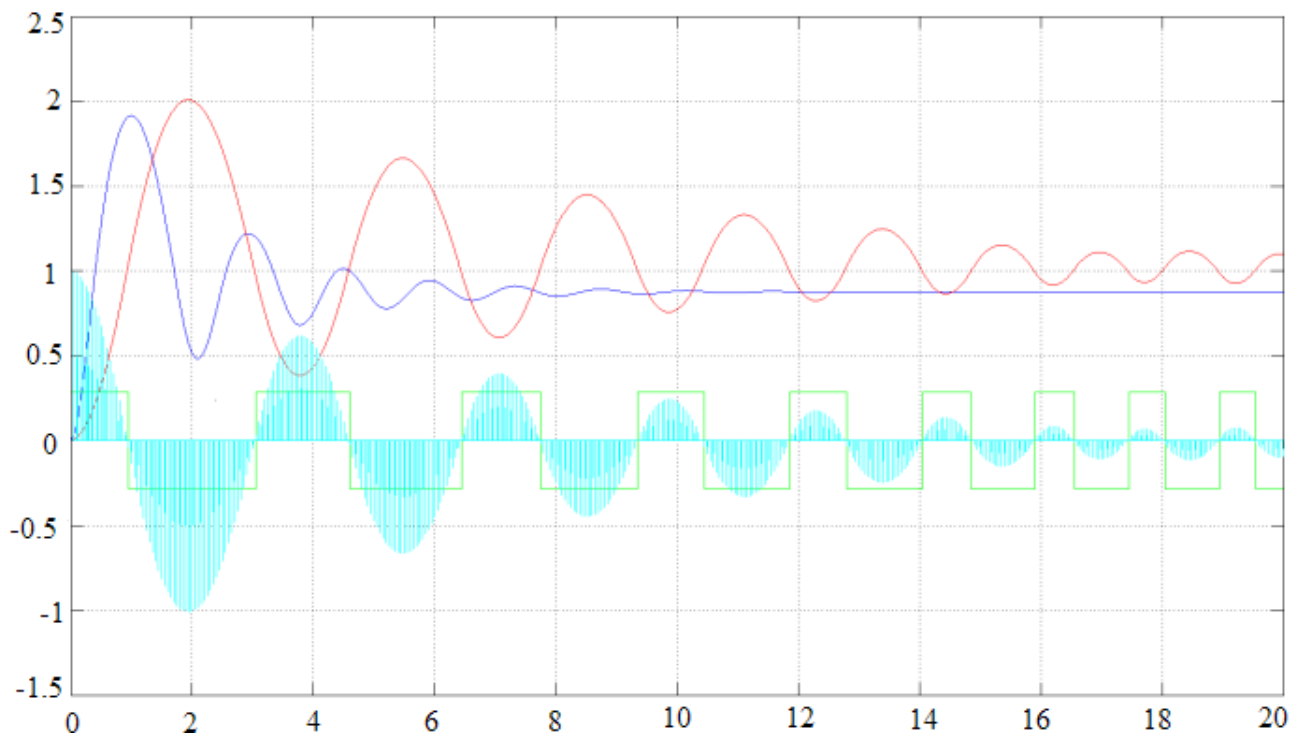


Рисунок 6.7 – Перехідний процес системи з АІМ з релейним регулятором

б) з П-регулятором:

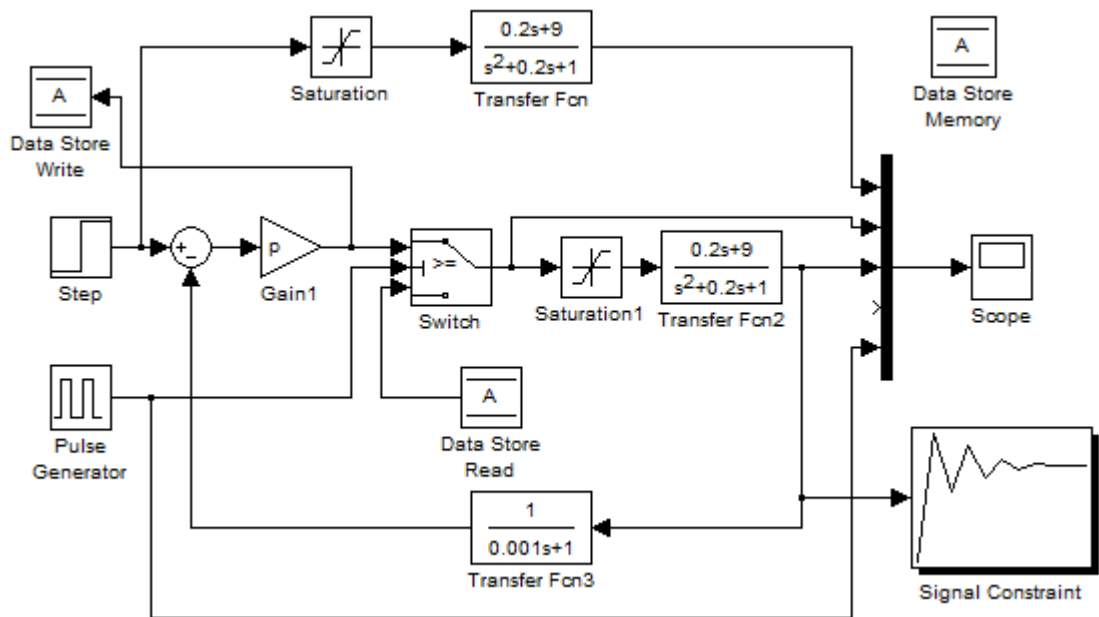


Рисунок 6.8 – Схема дослідження системи з АІМ з П-регулятором

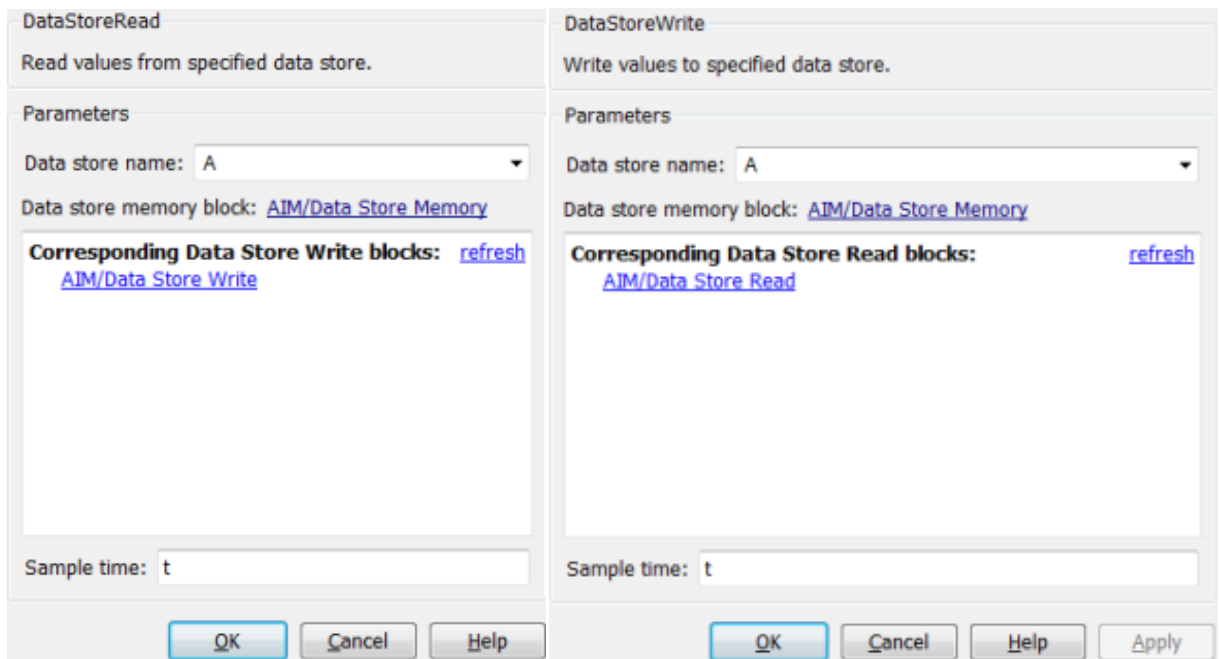


Рисунок 6.9 – Налаштування блоку Data Store Memory

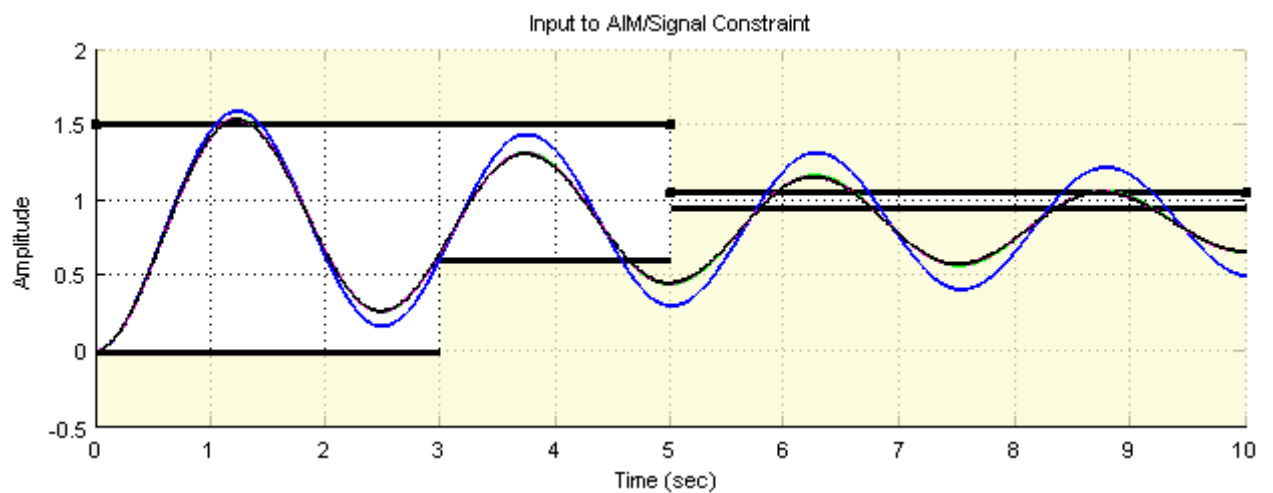


Рисунок 6.10 – Підбір параметрів П-регулятора за допомогою блоку Signal Constraint

Були підбрані наступні значення: $p = 0.5826$, $t = 0.05$

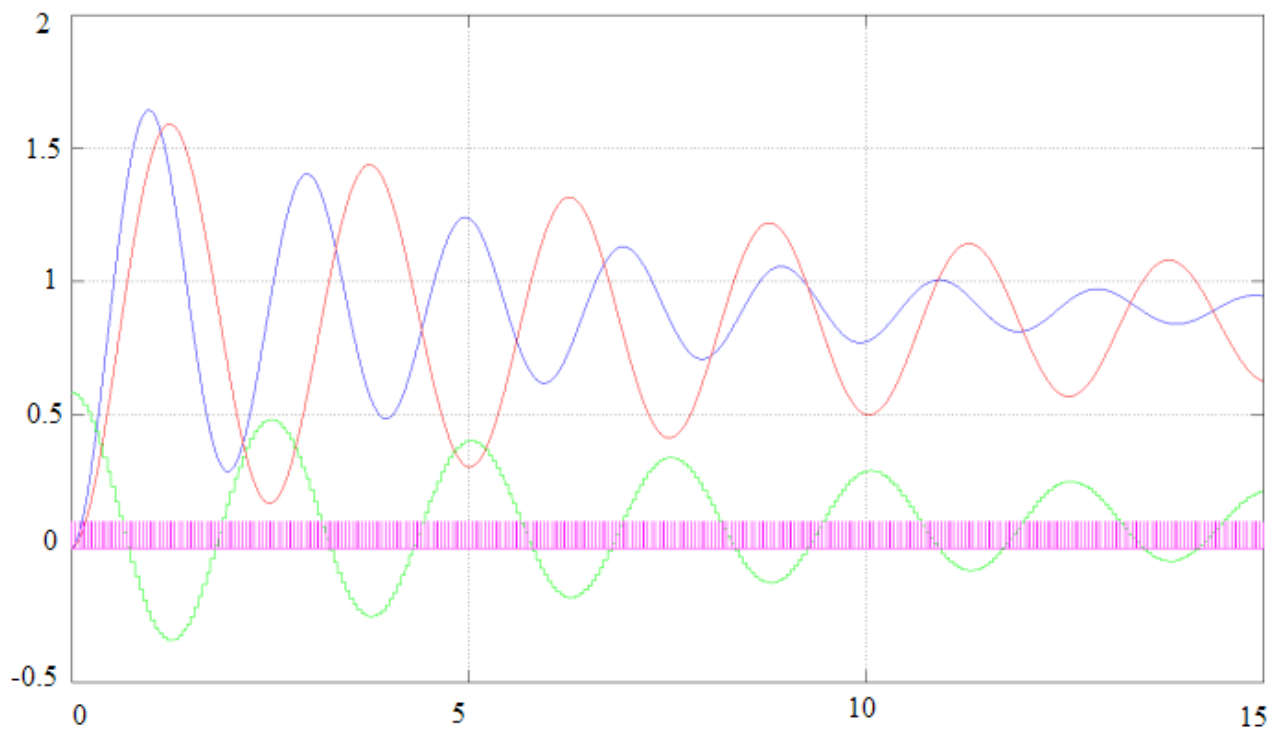


Рисунок 6.11 – Перехідний процес системи з АІМ з ПІ- регулятором

2) Модель регулятора з ШІМ

а) Схема 1:

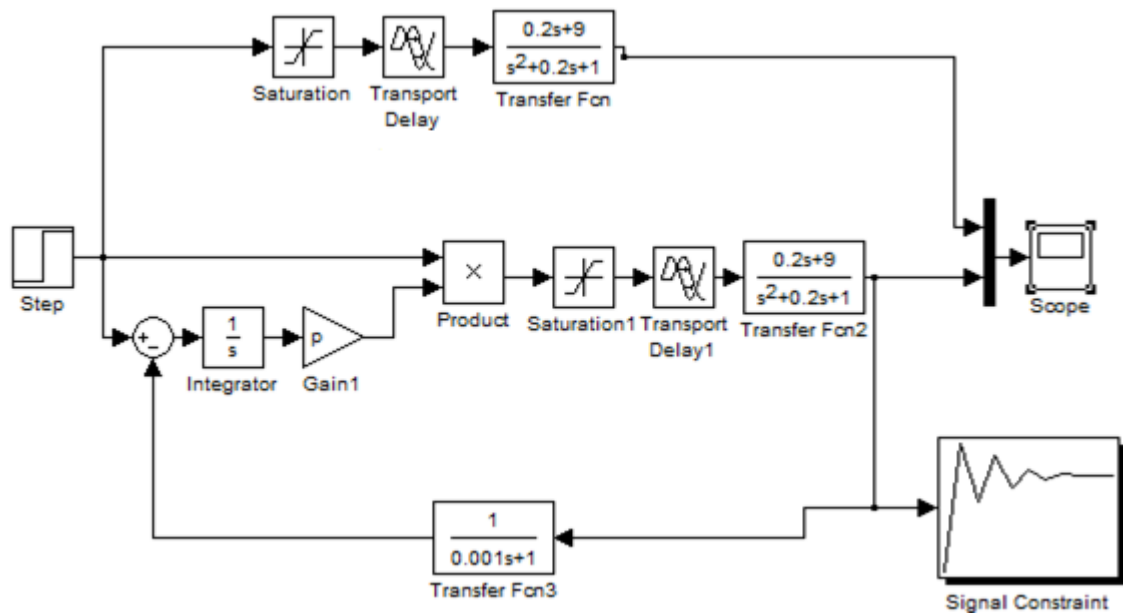


Рисунок 6.12 – Схема дослідження системи з ШІМ-1

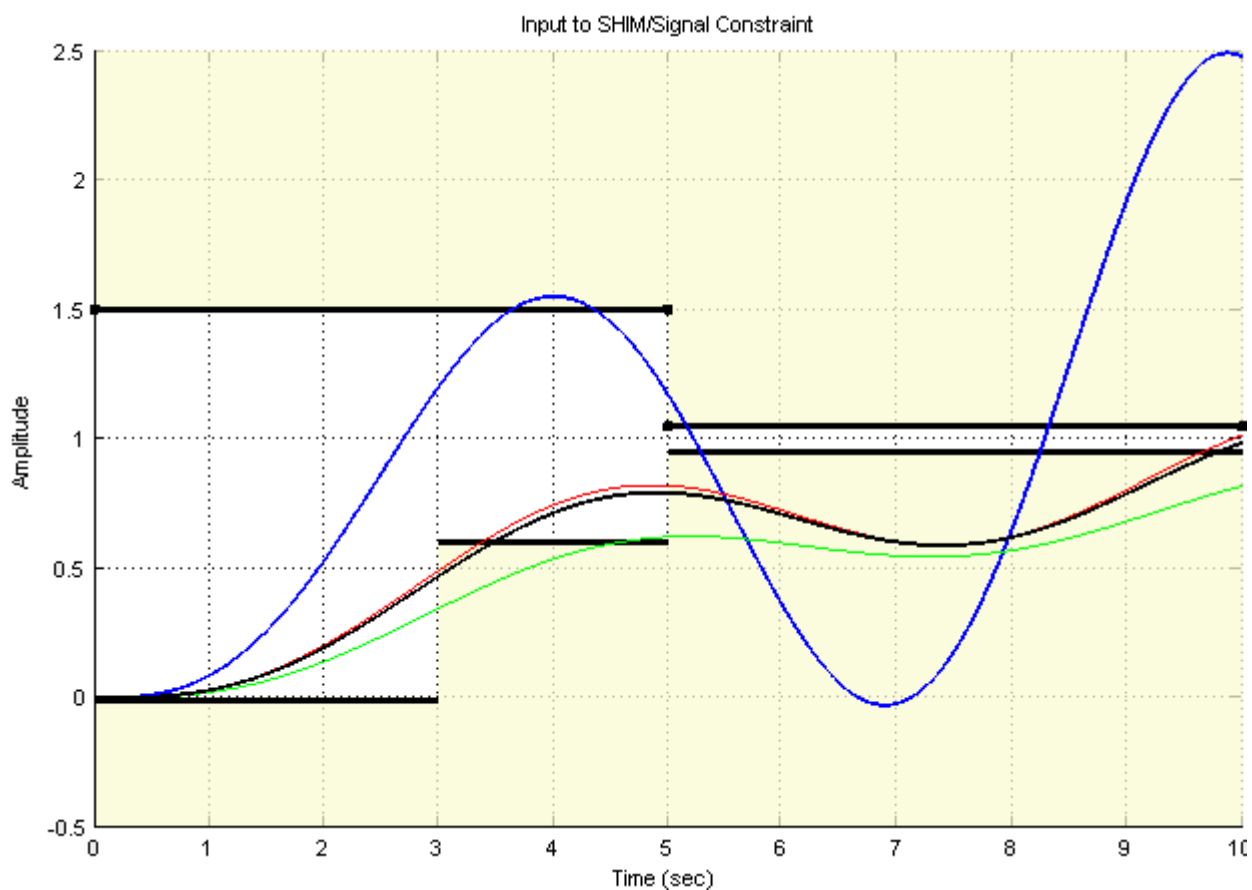


Рисунок 6.13 – Підбір параметрів регулятора з ШІМ-1 за допомогою блоку Signal Constraint

Були підібрані наступні значення: $p = 0.0213$

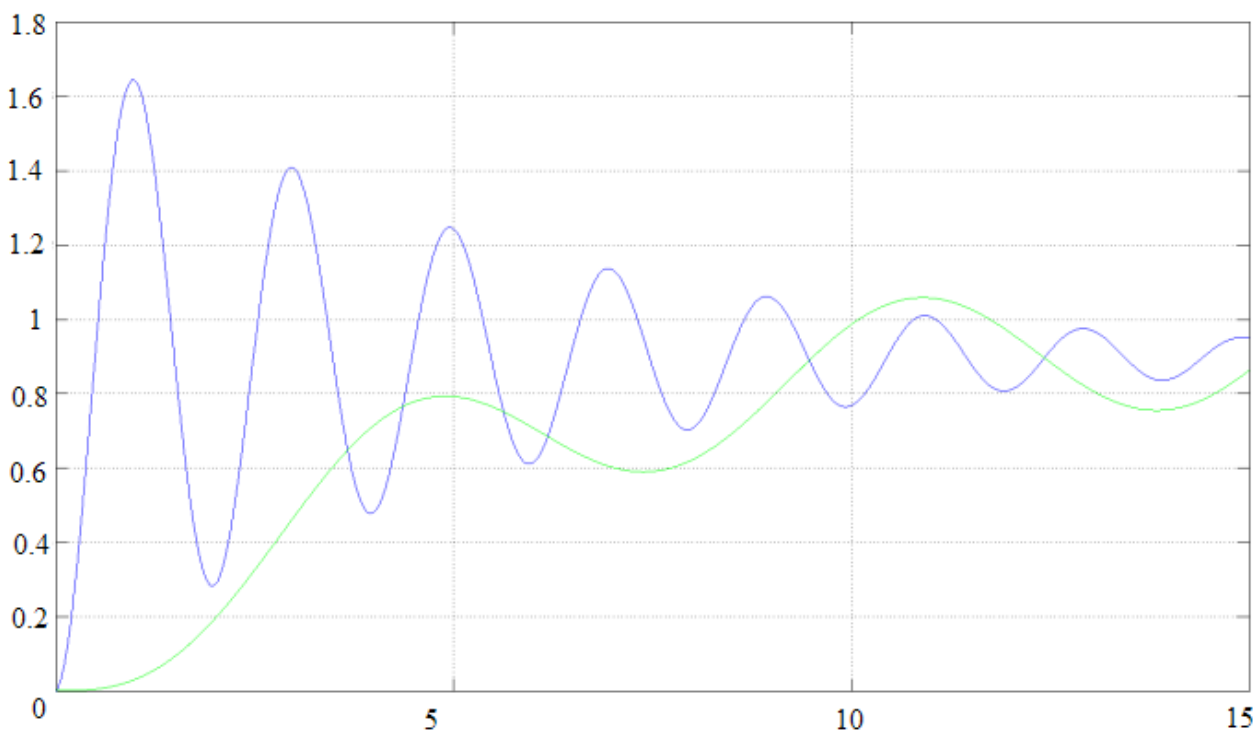


Рисунок 6.14 – Перехідний процес системи з ШІМ-1

б) Схема 2:

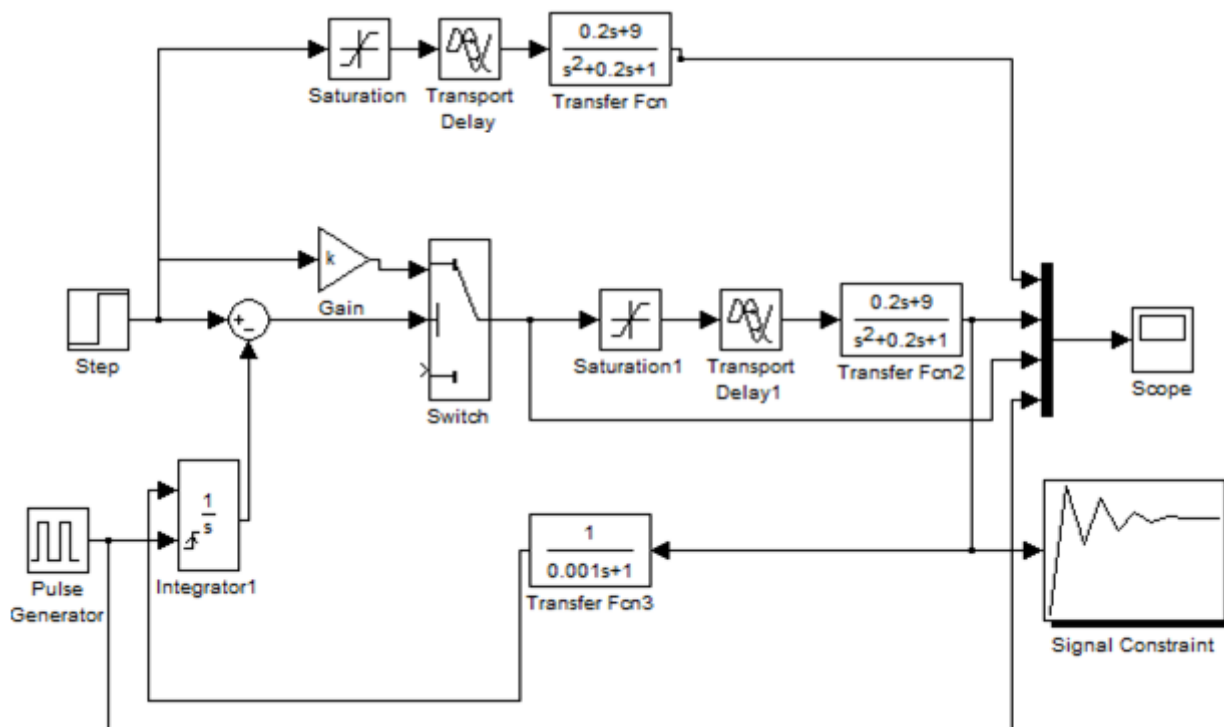


Рисунок 6.15 – Схема дослідження системи з ШІМ-2

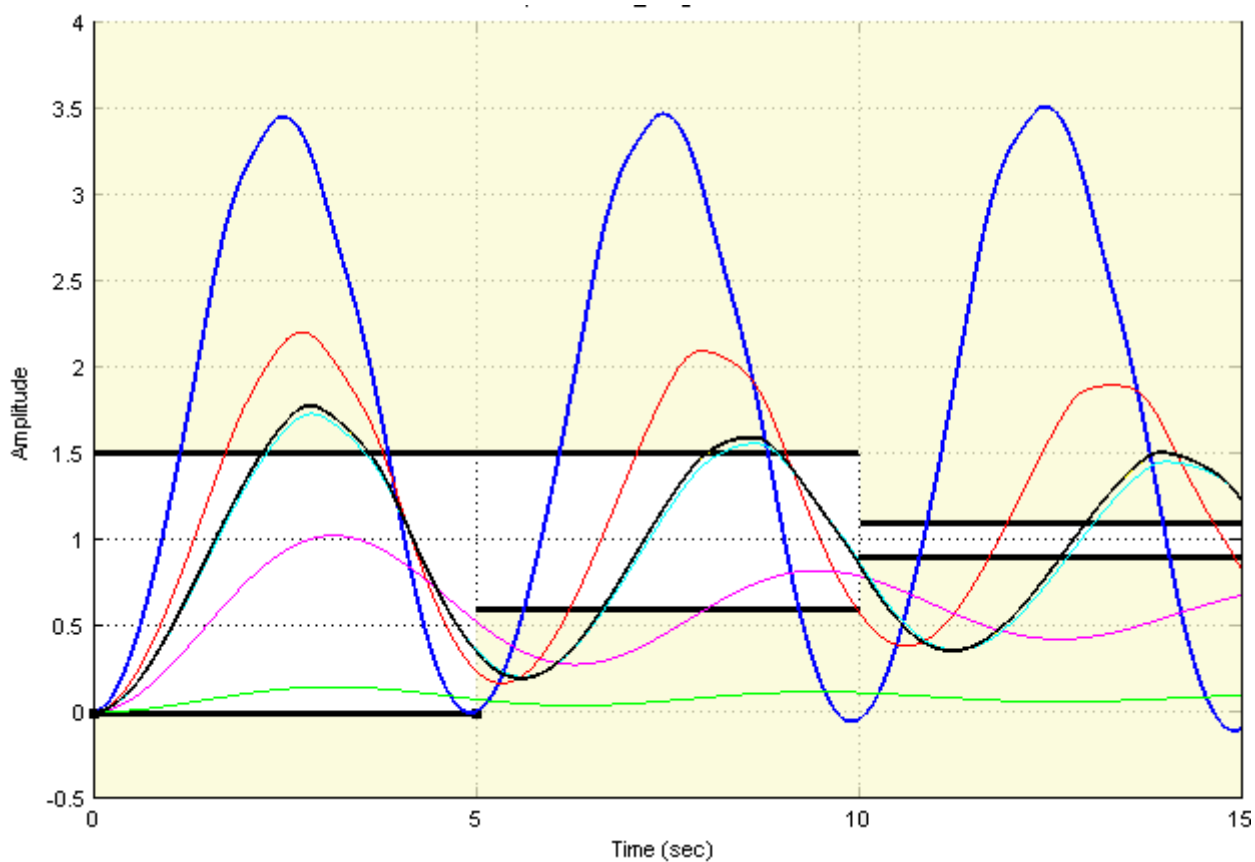


Рисунок 6.16 – Підбір параметрів регулятора з ШІМ-2 за допомогою блоку Signal Constraint

Були підібрані наступні значення: $k = 0.1178$

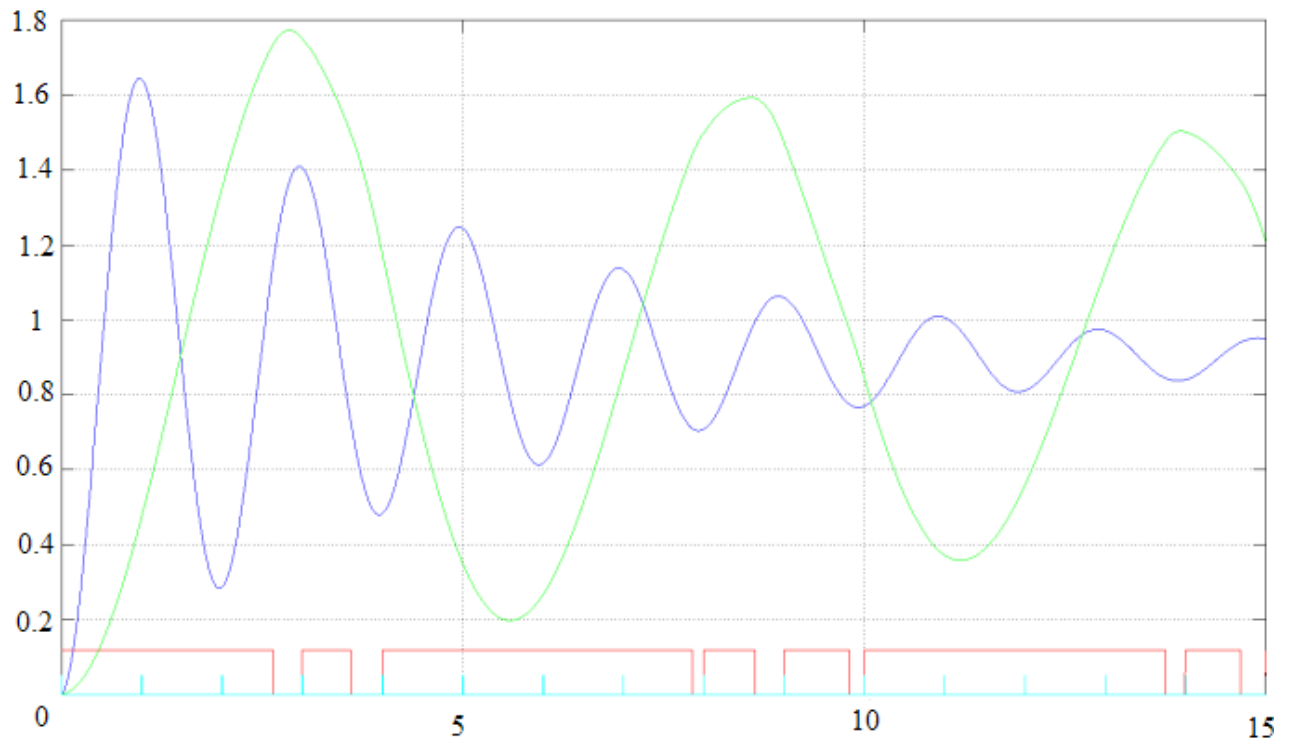


Рисунок 6.17 – Перехідний процес системи з ШІМ-1

3) Модель регулятора з ФІМ:

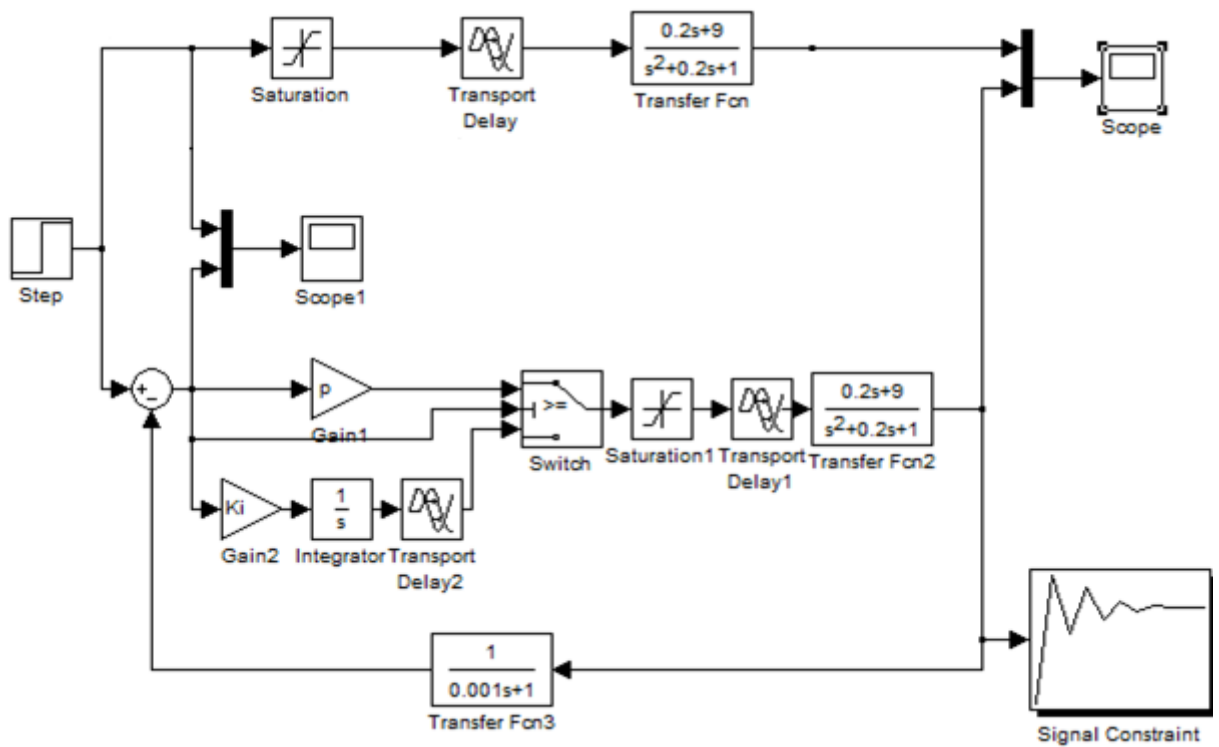


Рисунок 6.18 – Схема дослідження системи з ФІМ

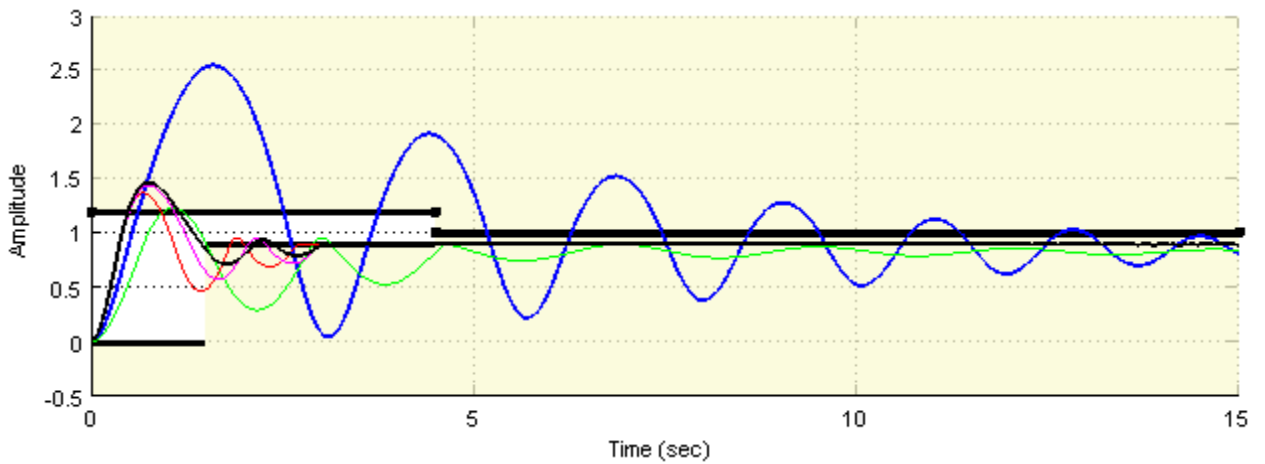


Рисунок 6.19 – Підбір параметрів регулятора з ФІМ за допомогою блоку Signal Constraint

Були підібрані наступні значення: $K_i = -3.8627$, $p = 1.7193$

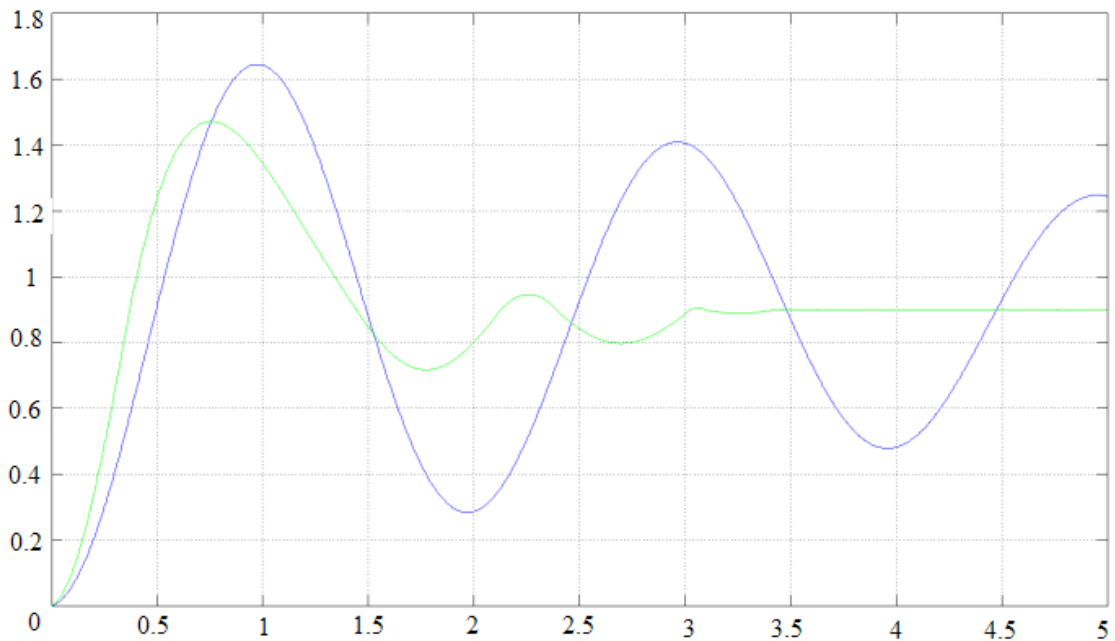


Рисунок 6.20 – Перехідний процес системи з ФІМ

Завдання на лабораторну роботу

1. Вибрати варіант завдання на лабораторну роботу з додатка Б за шифром групи та номером студента в списку групи.
2. Розрахувати регулятор з АІМ з релейним і П-регулятором, регулятор з ШІМ за схемами 1 і 2 та регулятор з ФІМ за допомогою Matlab.
3. Побудувати всі моделі в Matlab.
4. Результати проаналізувати і пояснити в висновках.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

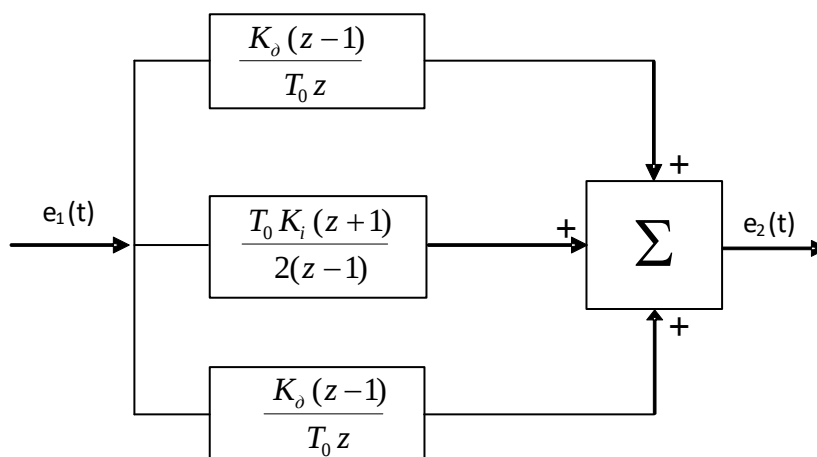
Моделювання систем керування з цифровими регуляторами

Мета роботи: Дослідити різновиди цифрових регуляторів та розрахувати їх коефіцієнти вручну та за допомогою пакета Signal Constraint Matlab.

Короткі теоретичні відомості

Структура цифрового ПІД регулятора [20-25] представлена на рисунку

7.1



Ідеалізоване рівняння роботи має наступний вигляд:

$$W[nt] = K_p \varepsilon[nT] + K_u \sum_{i=1}^n \varepsilon[nT] + K_d \{ \varepsilon[(n-1)T] \}$$

Передавальна функція ПІД регулятора:

$$\begin{aligned} W_{\text{під}}(z) &= K_p + \frac{K_i T_0 (z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_d (z-1)}{T_0 z} = \\ &= \frac{(K_i T_0^2 + 2K_d + 2K_p T_0)z^2 + (K_i T_0^2 - 2K_p T_0 - 4K_d)z + 2K_d}{2T_0 z(z-1)}, \end{aligned}$$

де T_0 – період квантування, K_i , K_d , K_p – параметри інтегральної, диференціальної, пропорційної складових закону регулювання.

Передавальна функція розімкненої системи з коректуючою ланкою має вигляд:

$$W_{ск}(z) = W_{ПД}(z) \cdot W_{ПБЧ}(z) = \\ = \frac{(K_i T_0^2 + 2K_{\partial} + 2K_p T_0)z^2 + (K_i T_0^2 - 2K_p T_0 - 4K_{\partial})z + 2K_{\partial}}{2T_0 z(z-1)} \cdot W_{ПБЧ}(z),$$

де $W_{ПБЧ}(z) = \frac{K(z+A)}{(z-z_1)(z-z_2)}$, K, A, z_1, z_2 – цифрові значення системи.

Для того, щоб синтезувати регулятор, необхідно знайти значення параметрів K_i, K_{∂}, K_p .

Порядок виконання роботи

Варіант завдання на дану лабораторну роботу вибираються з додатка Б за номером групи та номером студента в списку групи.

Розв'язання задачі синтезу цифрової системи вручну
ПД регулятор

1. Необхідно знайти інтегральну складову K_i . Для цього скористаємось виразом для пошуку коефіцієнта похибки за швидкістю:

$$K_v = \frac{1}{T_0} \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)W_{ск}(z) = K_i \cdot W_{ПБЧ}(z \rightarrow 1) \quad (7.1)$$

Для того, щоб вираз (7.1) був справедливим, необхідно, щоб функція, яка входить під знак $\lim$, не мала полюсів на одиничному колі.

K_v - вибираємо самостійно ($K_v = 3 \div 8$).

2. Необхідно знайти коефіцієнти K_{∂} і K_p . Вибирають два нулі таким чином, щоб вони компенсували полюси процесу:

$$z^2 + \frac{K_i T_0^2 - 2K_p T_0 - 4K_{\partial}}{K_i T_0^2 + 2K_{\partial} + 2K_p T_0} z + \frac{2K_{\partial}}{K_i T_0^2 + 2K_{\partial} + 2K_p T_0} = \\ (z-z_1)(z-z_2) = z^2 - z(z_1 + z_2) + z_1 z_2. \quad (7.2)$$

Прирівнюючи коефіцієнти при однакових степенях z , отримаємо систему рівнянь, з якої можна знайти параметри K_{∂} і K_p .

Нехай передавальна функція об'єкта управління має вигляд:

$$W(s) = \frac{40}{5s^2 + 7s + 1}.$$

Передавальна функція ПБЧ $W_{пбч}(z)$ знаходиться за допомогою функції пакету Matlab. Період дискретизації вибираємо, рівний 0.1.

```
>> pbch = c2d((tf([40],[5 7 1])),0.1)
```

Результат: $W_{пбч}(z) = \frac{0.03819z + 0.03645}{z^2 - 1.867z + 0.8694}$.

Знайдемо інтегральну складову K_i :

$$K_v = K_i \cdot W_{пбч}(z \rightarrow 1) = 31.1K_i$$

K_v вибираємо, рівний 5.

Таким чином, $K_i = 0.16$.

Розв'язавши наступну систему рівнянь, знаходимо коефіцієнти K_δ і K_p :

$$\begin{cases} \frac{K_i T_0^2 - 2K_p T_0 - 4K_\delta}{K_i T_0^2 + 2K_\delta + 2K_p T_0} = -1.867 \\ \frac{2K_\delta}{K_i T_0^2 + 2K_\delta + 2K_p T_0} = 0.8694 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{0.0016 - 0.1K_p - 4K_\delta}{0.0016 + 2K_\delta + 0.1K_p} = -1.867 \\ \frac{2K_\delta}{0.0016 + 2K_\delta + 0.1K_p} = 0.8694 \end{cases}$$

Розв'язання задачі синтезу цифрової системи вручну

ПД регулятор

Дивись теорію, що описана вище. Послідовність дій аналогічна, окрім наступного:

Зауваження:

Якщо $K_i = 0$, то відсутня інтегральна складова.

$$\begin{cases} \frac{K_i T_0^2 - 2K_p T_0 - 4K_{\ddot{a}}}{K_i T_0^2 + 2K_{\ddot{a}} + 2K_p T_0} = -1.867 \\ \frac{2K_{\ddot{a}}}{K_i T_0^2 + 2K_{\ddot{a}} + 2K_p T_0} = 0.8694 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{-0.1K_p - 4K_{\ddot{a}}}{2K_{\ddot{a}} + 0.1K_p} = -1.867 \\ \frac{2K_{\ddot{a}}}{2K_{\ddot{a}} + 0.1K_p} = 0.8694 \end{cases}$$

Розв'язання задачі синтезу цифрової системи

ПІ регулятор

Дивись теорію, що описана вище. Послідовність дій аналогічна, окрім наступного:

Зауваження:

Якщо $K_{\ddot{a}}=0$, то відсутня диференціальна ланка. У даному випадку K_i , не вираховується, а знаходиться із системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{K_i T_0^2 - 2K_p T_0}{K_i T_0^2 + 2K_p T_0} = -1.867 \\ \frac{2K_{\ddot{a}}}{K_i T_0^2 + 2K_p T_0} = 0.8694 \end{cases}$$

Розв'язання задачі синтезу цифрової системи П, І регулятори

Для того, щоб розрахувати дані види регуляторів, можна використати різні методи, наприклад, метод Гурвіца. Необхідно задати запас стійкості по фазі, та розрахувати параметри.

Розв'язання задачі синтезу цифрової системи за допомогою Matlab

ПІД регулятор

Загальна структура системи з цифровим ПІД регулятором зображена на рисунку 7.2.

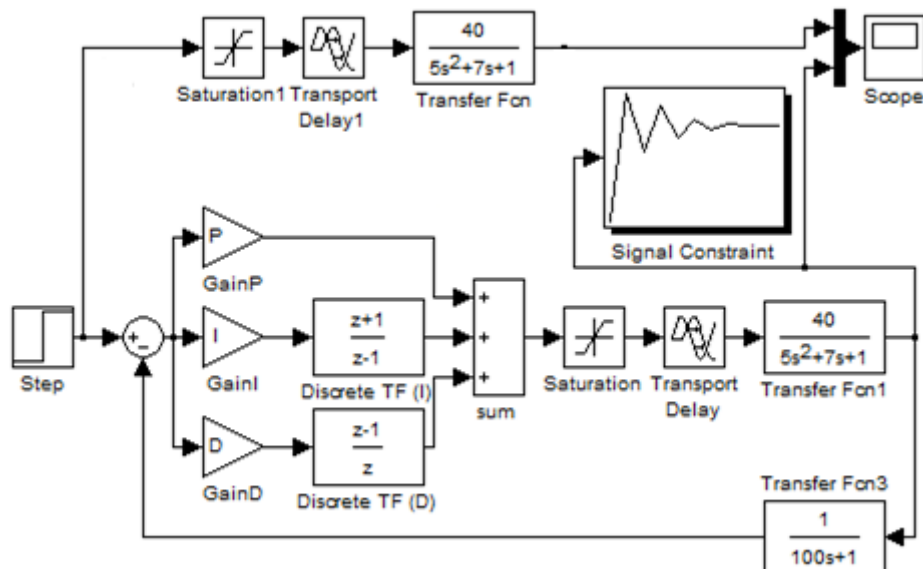


Рисунок 7.2 – Система с цифровим ПІД регулятором

Робота з утилітою Signal Constraint представлена на рисунку 7.3.

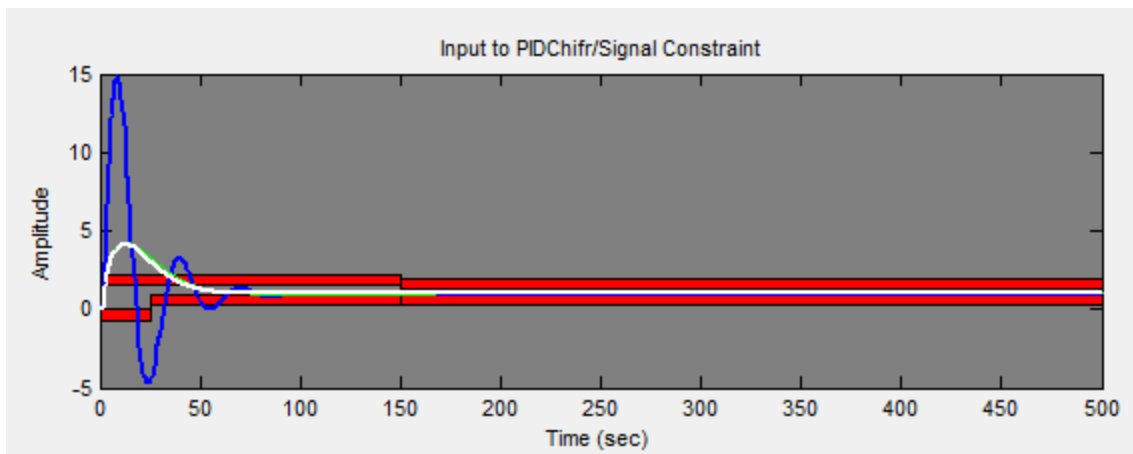


Рисунок 7.3 – Робота блока Signal Constraint

Результати роботи ПД регулятора представлені на рисунку 7.4.

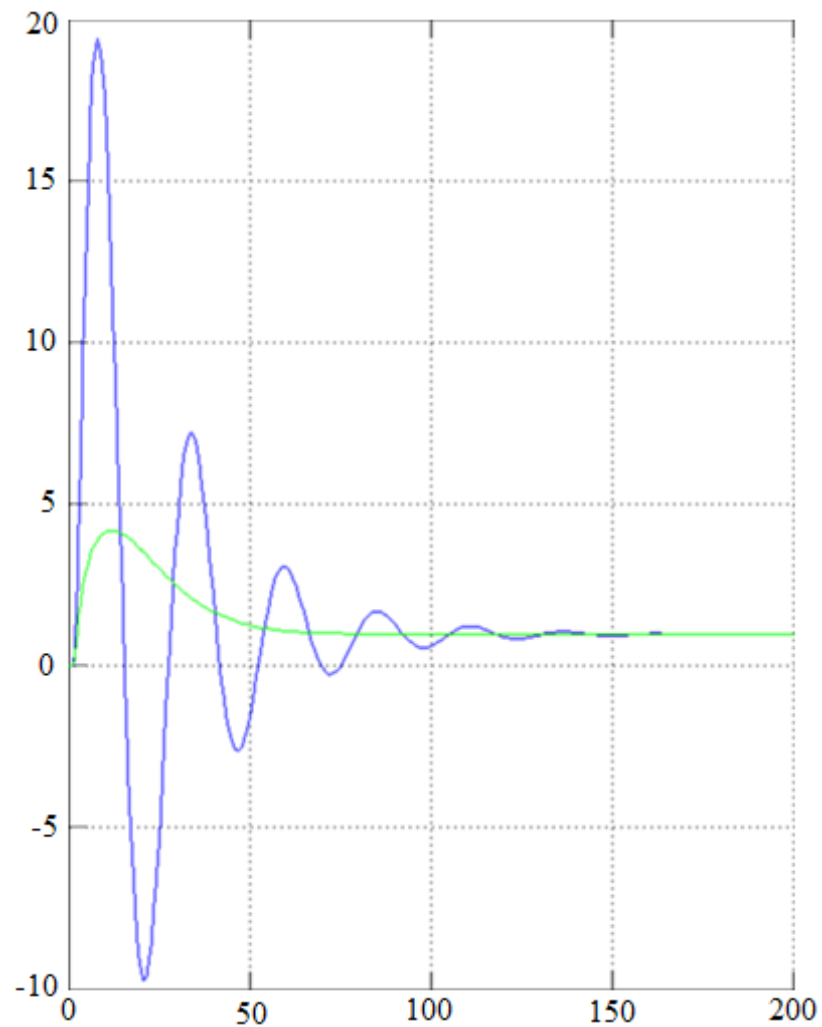


Рисунок 7.4 – Результати роботи ПД регулятори

Результати роботи блока Signal Constraint: $D = 0.0185$, $I = 2.2497 \times 10^{-4}$, $P = 0.0563$

Розв'язання задачі синтезу цифрової системи за допомогою Matlab

ПІ-регулятор

Структурна схема системи з ПІ регулятором зображена на рисунку 7.5.

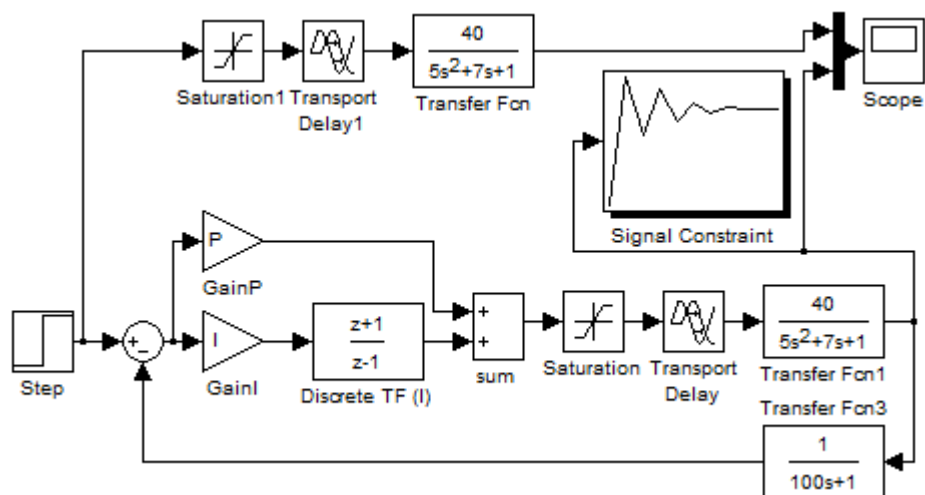


Рисунок 7.5 – Система з ПІ регулятором

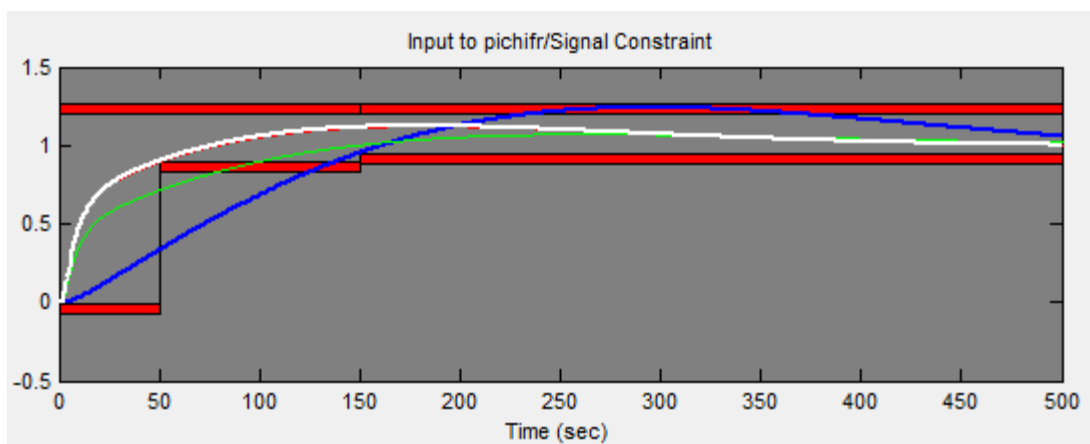


Рисунок 7.6 – Робота блока Signal Constraint

Результати розрахунків: $I = 1.1942 \times 10^{-4}$, $P = 0.0255$

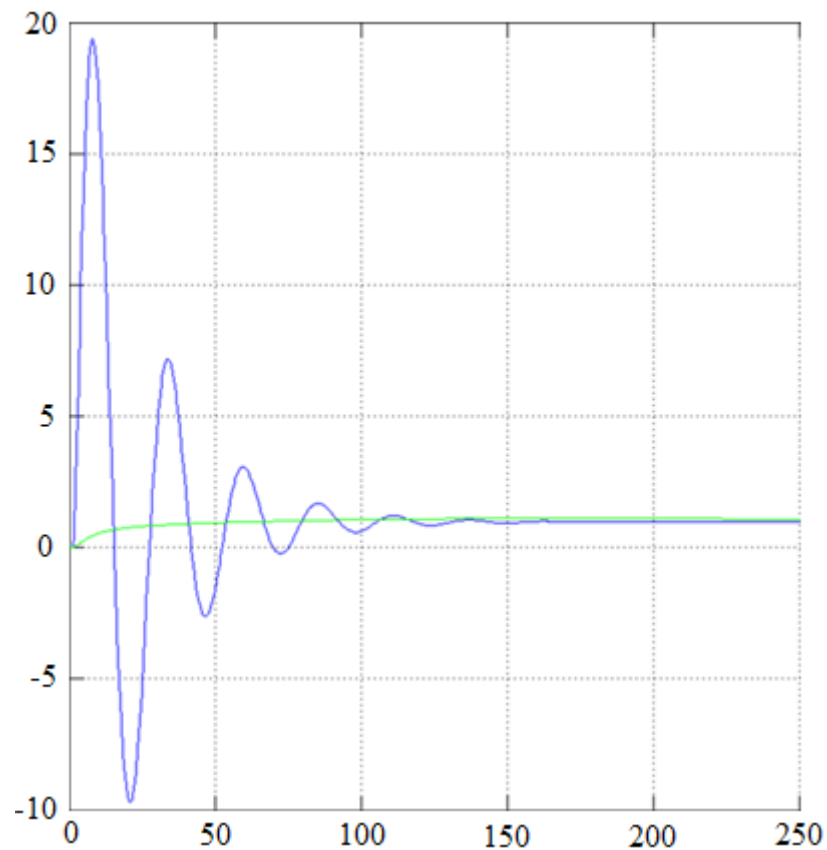


Рисунок 7.7 – Результати роботи ПІ регулятора

Розв'язання задачі синтезу цифрової системи за допомогою Matlab

ПД-регулятор

Структурна схема системи з ПД-регулятором зображена на рисунку 7.8.

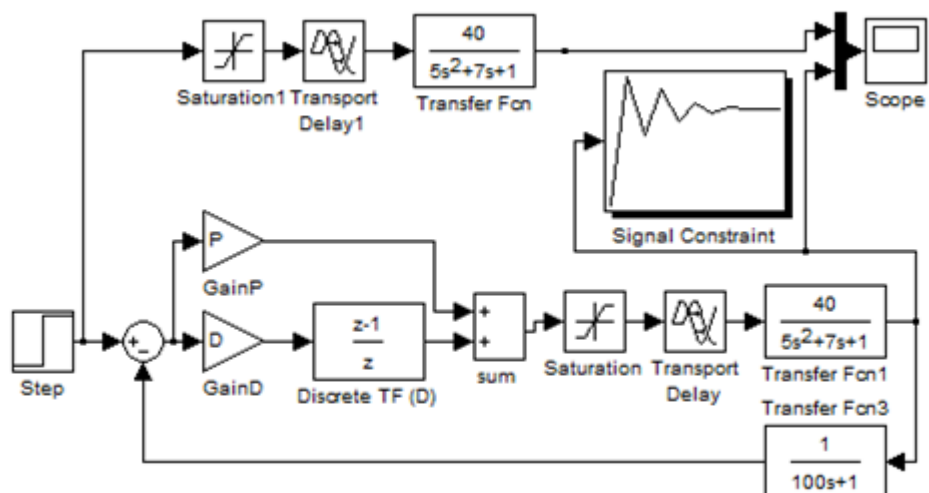


Рисунок 7.8 – Система з ПІ регулятором

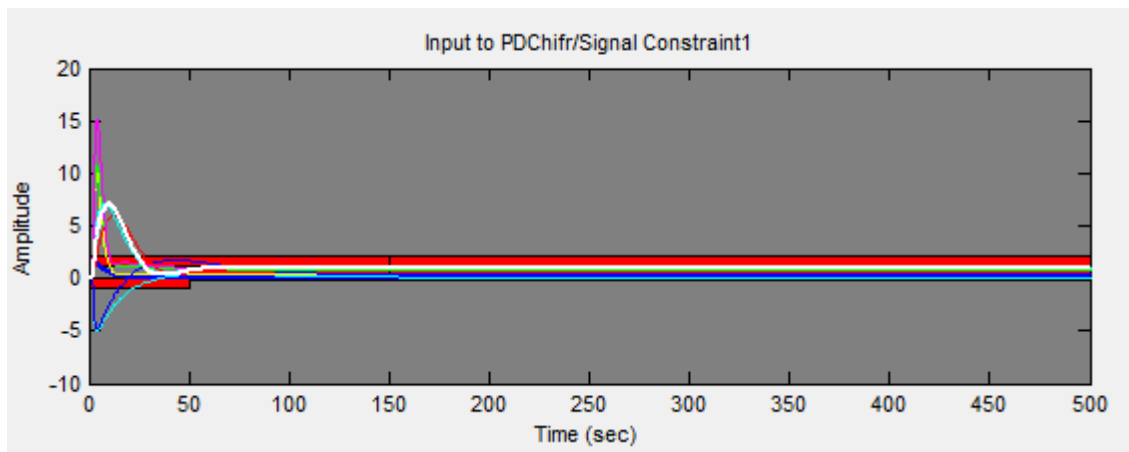


Рисунок 7.9 – Робота блока Signal Constraint

Результати розрахунків: $D = 0.3033$, $P = 0.2843$

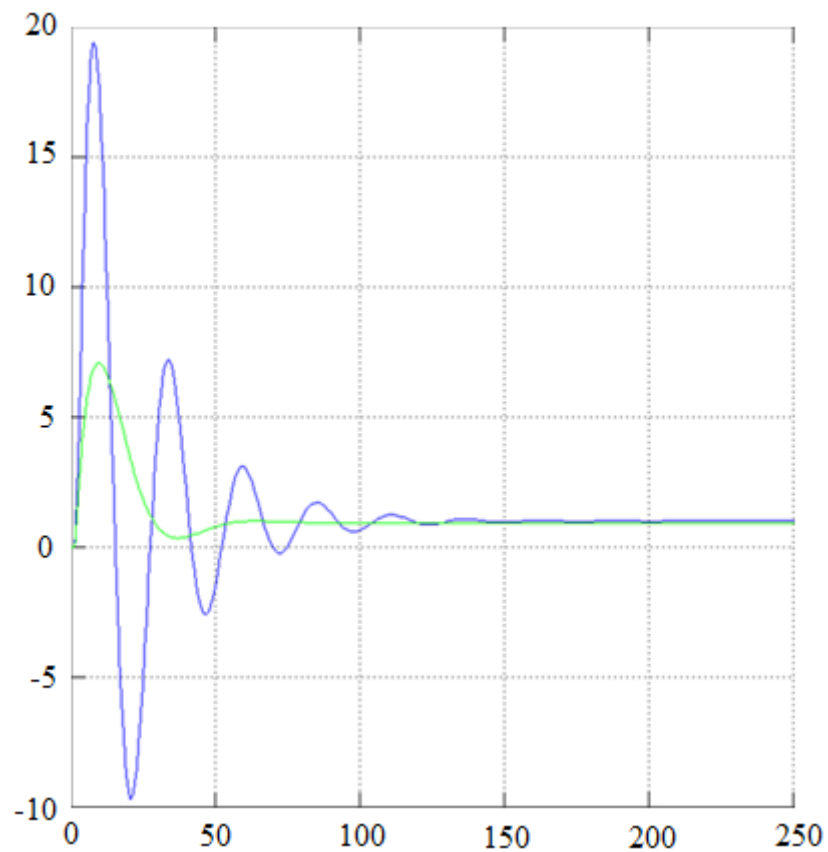


Рисунок 7.10 – Результати роботи ПД регулятора

Розв'язання задачі синтезу цифрової системи за допомогою Matlab

П регулятор

Структурна схема системи з П регулятором зображена на рисунку 7.11.

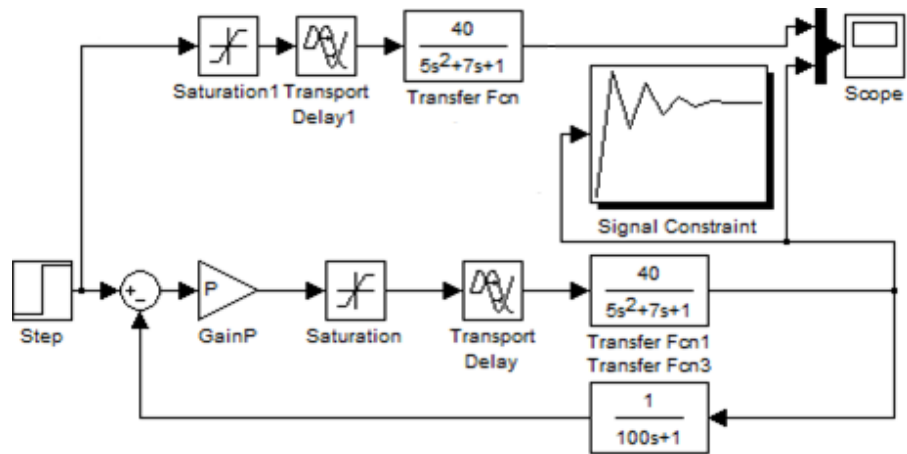


Рисунок 7.11 – Система з П регулятором

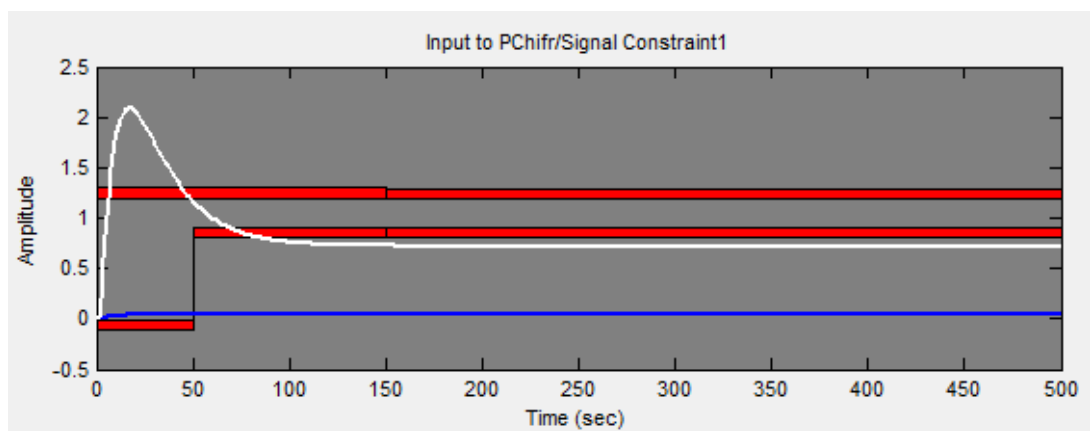


Рисунок 7.12 – Робота блока Signal Constraint

Результат розрахунків: $P = 0.064413$

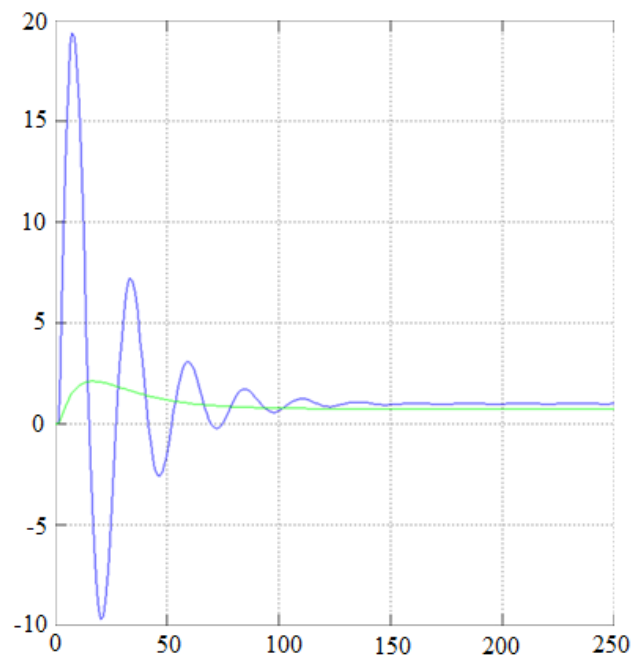


Рисунок 7.13 – Результат роботи П регулятора

Розв'язання задачі синтезу цифрової системи за допомогою Matlab

I регулятор

Структурна схема системи з I регулятором зображена на рисунку 7.14.

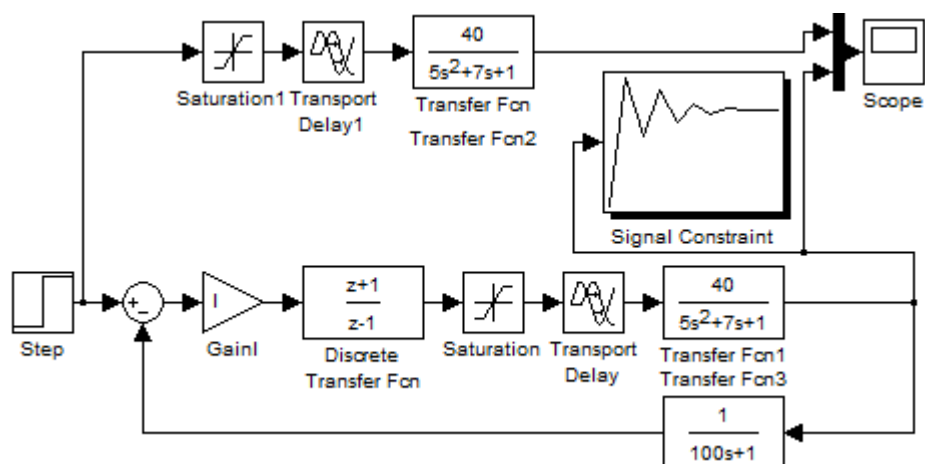


Рисунок 7.14 – Система з I регулятором

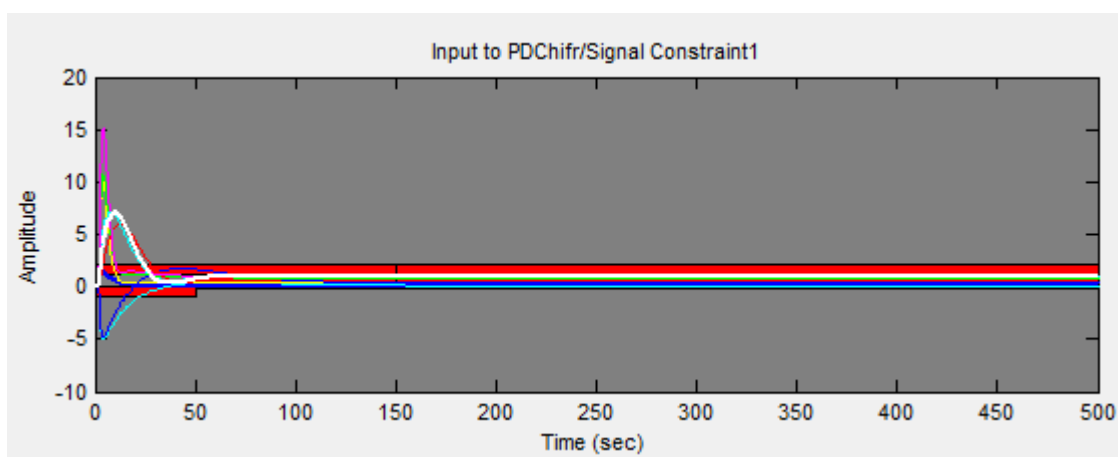


Рисунок 7.15 – Робота блока Signal Constraint

Результат розрахунків: $I = 0.0001$

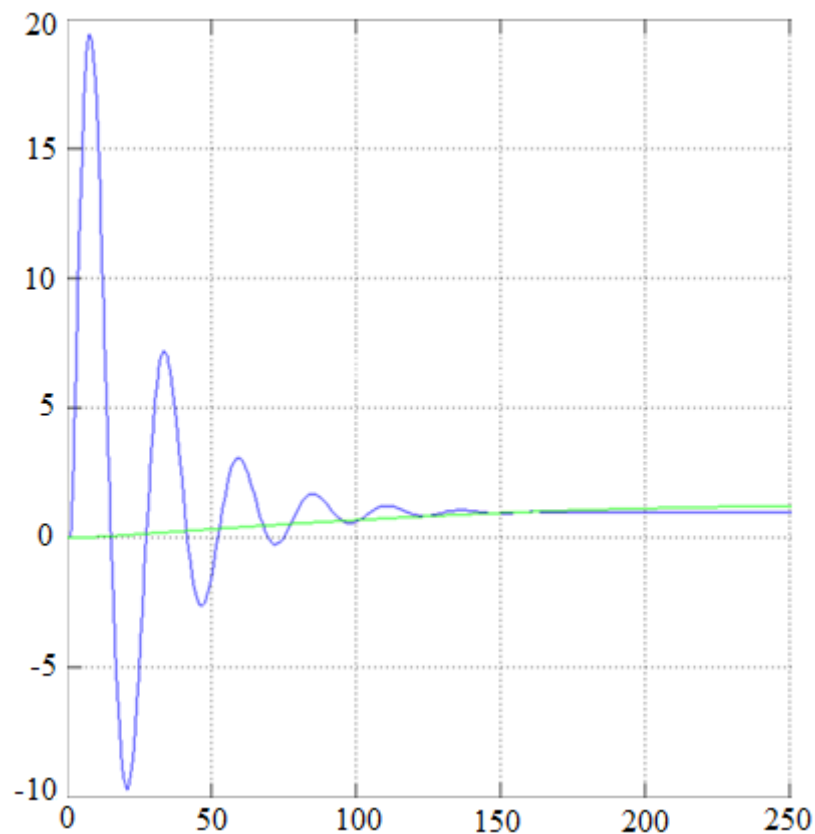


Рисунок 7.16 – Результат роботи І регулятора

Завдання

1. Вибрати варіант завдання на лабораторну роботу з додатка Б за шифром групи та номером студента в списку групи.
2. Розрахувати цифрові ПД, ПІ, ПДІ, І, П регулятори вручну. Побудувати модель зі знайденими коефіцієнтами в пакеті Matlab.
3. Розрахувати цифрові ПД, ПІ, ПДІ, І, П регулятори з допомогою утиліти Signal Constraint пакета Matlab.
4. Проаналізувати різницю в обчисленні різними способами та зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

Моделювання систем керування з регулятором змінної структури

Мета роботи: Ознайомитись з принципами побудови та функціонування регуляторів зі змінною структурою.

Короткі теоретичні відомості

Забезпечення оптимальних режимів роботи сучасного технологічного обладнання при значних дрейфах та змінах власних характеристик об'єкта, що автоматизується досягається головним чином застосуванням систем автоматичного управління і регулювання зі змінною структурою [1-3].

Одними з основних елементів подібного роду систем є регулюючі пристрої, що формують нелінійні закони регулювання.

З точки зору управління принцип змінної структури та алгоритму функціонування РЗС означає, що регулюючий вплив змінюється стрибкоподібно, приймаючи при цьому кінцеве значення в певному інтервалі часу.

Застосування РП з нелінійними законами надає системам регулювання властивість грубості як по відношенню до змін власних характеристик об'єкта, що автоматизується, так і по відношенню до діючих на нього зовнішніх збурень.

За допомогою РП, які формують нелінійні алгоритми, вдається стабілізувати технологічні процеси при таких збуреннях, які недопустимі в разі застосування РП з постійною структурою. Крім того, такі РП значно підвищують стійкість АСР, завдяки чому є можливість автоматизувати структурно нестійкі об'єкти.

Одним з найпоширеніших і досить перспективних способів реалізації нелінійних алгоритмів управління є спільне використання регулюючих пристроїв з типовим лінійним П-, І-, ПІ-, ПД-та ПІД-законами регулювання та різного роду блоків логічних операцій [4].

Необхідно відзначити, що крім РП з нелінійними законами регулювання при автоматизація нестационарних об'єктів і складних у динамічному відношенні об'єктів зі змінною структурою останнім часом почали широко застосовувати регулюючу апаратуру з параметрами, які самооптимізуються і адаптивними властивостями. Як правило, ця апаратура реалізується на базі широко використовуваних засобів обчислювальної та мікропроцесорної техніки, що входять до складу керуючих обчислювальних машин.

В загальному вигляді структуру РЗС (Рисунок 8.1) можна представити схемою, що складається з: формувача функції управління (ФФУ), формувача функції перемикавання (ФФП), вхідного суматора і виконавчого пристрою.

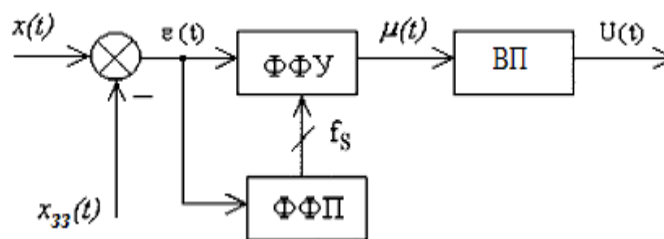


Рисунок 8.1 – Структура РЗС

Блок ФФП формує *функцію перемикавання* f , яку в загальному випадку, можна задати рівнянням:

$$f = C_1 \varepsilon(t) + C_2 d\varepsilon(t)/dt.$$

Для реалізації цієї функції блок ФФП містить диференціатор помилки $\varepsilon(t)$, два узгоджуючих підсилювачі з коефіцієнтами передачі C_1 і C_2 , суматор, компаратори, що перетворюють функцію f в логічний сигнал f_s , і блок логічного керування. Узагальнена структурна схема блоку ФФП наведена нижче (Рисунок 8.2).

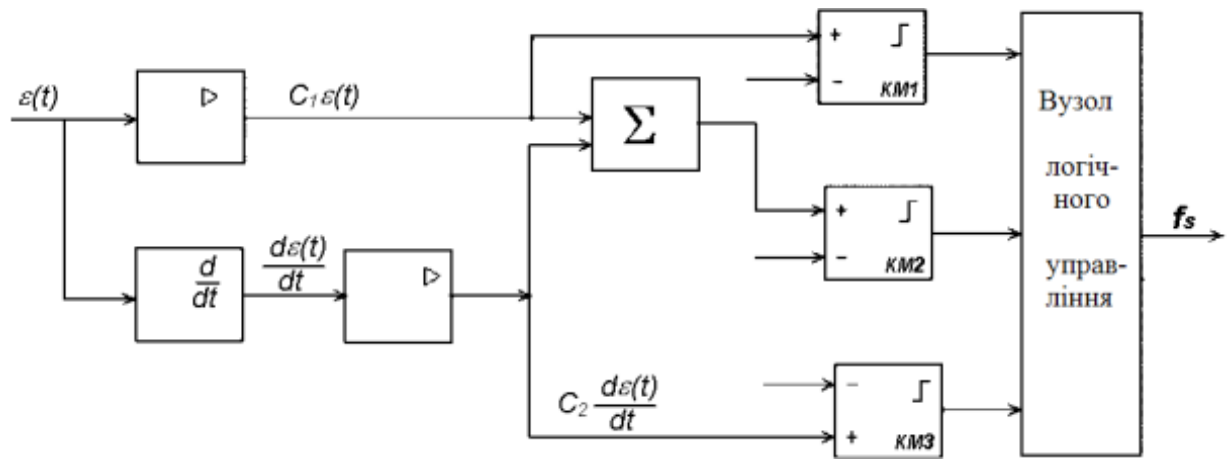


Рисунок 8.2 – Структурна схема блока ФФП

Блок ФФП формує керуючий вплив і реалізує зміни структури регулятора відповідно до прийнятого логічного закону. Цей блок складається з логічних перемикаючих вузлів формування закону регулювання і вузла підсумовування складових закону регулювання.

Пропорційний регулятор зі змінним коефіцієнтом передачі

При автоматизації об'єктів на базі застосування П-регулюючих пристроїв в сталому режимі завжди існує статична помилка, яка принципово необхідна для формування регулюючого впливу. Статичну помилку в подібних АСР можна значно зменшити, якщо під час перехідних процесів в певні моменти часу стрибком змінювати величину коефіцієнта посилення РП.

У цьому типі регуляторів формування регулюючого впливу здійснюється за законом:

$$\mu(t) = \psi \varepsilon(t),$$

де ψ - нелінійний коефіцієнт передачі;

$$\psi = \begin{cases} \alpha & \text{їдє } \varepsilon(t) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \geq 0; \\ \frac{\alpha}{\alpha - 1} = \beta & \text{їдє } \varepsilon(t) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \leq 0 \end{cases}$$

Суть роботи регулятора полягає в тому, що при збільшенні помилки регулювання коефіцієнт передачі K_p збільшується, а при зменшенні – зменшується.

Регулятор дозволяє значно зменшити статичну і динамічну помилки регулювання в порівнянні з лінійним пропорційним РП.

Процес формування регулюючого впливу РП показаний на Рисунку 8.3, і на Рисунку 8.4 зображено одну з можливих схем регулятора, у таблиці 8.1 наведені значення параметрів функції перемикавання.

$$\alpha = \frac{R_2 R_3}{R_1 (R_2 + R_3)}$$

$$\frac{\alpha}{\alpha - 1} = \frac{R_2}{R_1}$$

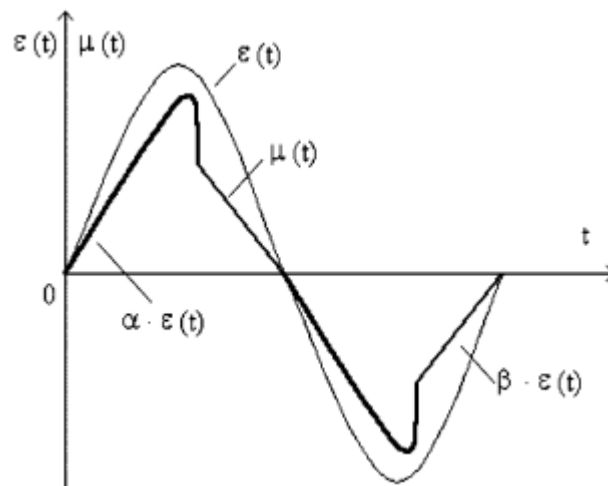


Рисунок 8.3 – Графік процесу формування регулюючого впливу РП

Таблиця 8.1 – Значення параметрів функції перемикавання

$\varepsilon(t)$	$\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$	f_1	f_2	f_s
>0	>0	1	1	1
<0	>0	0	1	0
<0	<0	0	0	1
>0	<0	1	0	0

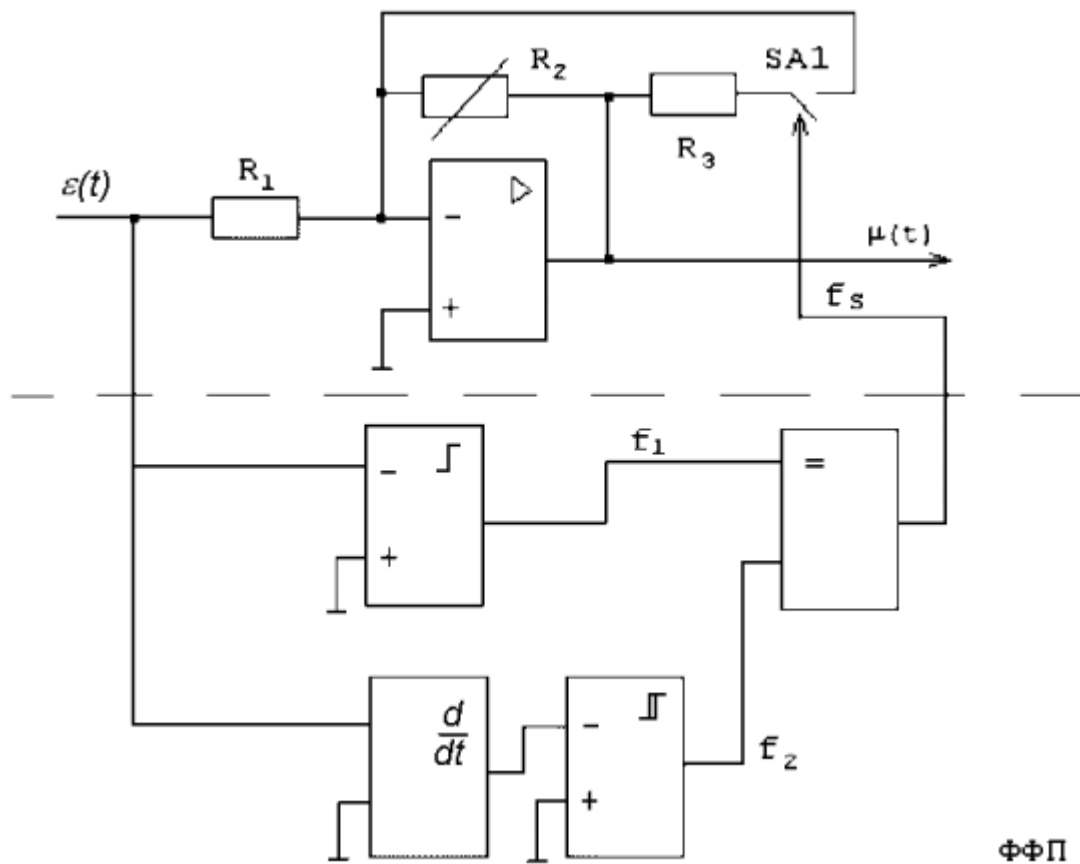


Рисунок 8.4 – Функціональна схема П-регулятора зі змінним коефіцієнтом передачі

Інтегральний регулятор зі змінною величиною часу інтегрування

Регулювання об'єктів без самовирівнювання, тобто нейтральних об'єктів, за допомогою звичайних І регулюючих пристроїв практично неможливо через нестійкий стан систем. Однак, якщо перемикає і змінювати величину постійної часу інтегрування під час перехідного процесу або змінювати вагу інтегральної складової за наведеним нижче алгоритмом, то можна надати системі з нейтральним об'єктом не тільки стійкий стан, але й отримати досить хорошу якість перехідних процесів. Цей алгоритм може бути записаний у вигляді:

$$\mu(t) = \mu_0 + \psi \left(\frac{1}{T_u} \right) \int_0^t \varepsilon(t) dt,$$

де μ_0 – початкове значення вихідного сигналу РП, ψ – нелінійний коефіцієнт підсилення інтегральної складової;

$$\psi = \begin{cases} \alpha, & \text{їдє } \varepsilon(t)f > 0 ; \\ \beta, & \text{їдє } \varepsilon(t)f < 0 , \quad \text{як } \alpha > \beta . \end{cases}$$

Розглянутий РП придатний для регулювання нестійких об'єктів, в яких застосування звичайних РП призводить до нестійкості системи регулювання.

Функціональна схема РП показана на Рисунку 8.5, значення функції f_s відповідають наведеним в таблиці 8.1, а схема блоку ФФП практично відповідає схемі, зображеної на Рисунку 8.2.

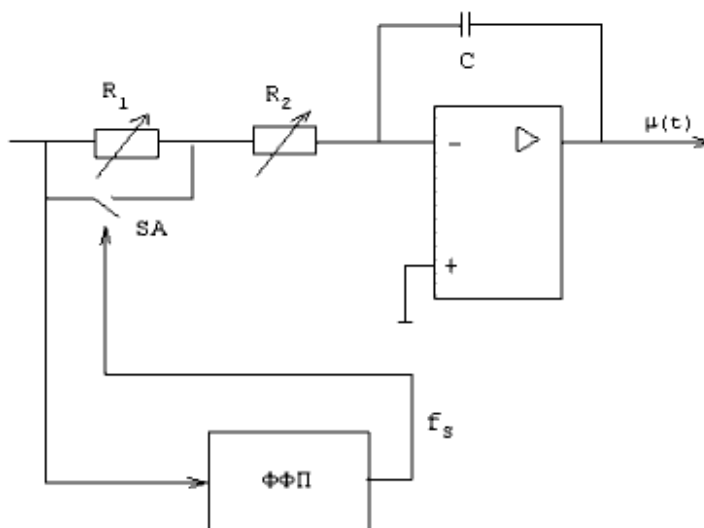


Рисунок 8.5 – Функціональна схема ізодромного РП зі змінним коефіцієнтом передачі

Стабілізувати і забезпечити аперіодичні перехідні процеси в динамічній системі, що описана диференціальним рівнянням другого порядку і містить астатичний РП, можна за рахунок впливу по координаті помилки і використання інформації про знаки лінійної комбінації сигналу помилки $\varepsilon(t)$ і його похідної $d\varepsilon/dt$.

За час протікання перехідного процесу запропоновано тричі змінювати структуру АСР. Спочатку об'єкт охоплений негативним інтегруючим зворотним зв'язком, потім – позитивним, а починаючи з моменту часу,

рівного чистому запізнюванню об'єкта, до закінчення перехідного процесу система розімкнута. Цей алгоритм роботи регулюючого пристрою можна записати у вигляді:

$$\mu(t) = \mu_0 + \int_0^t \psi \varepsilon(t) dt,$$

$$\text{де } \psi = \begin{cases} \alpha & \text{їдè } \varepsilon f_1 > 0, \\ \beta & \text{їдè } f_1 f_2 < 0 \\ 0 & \text{їдè } \varepsilon f_2 < 0. \end{cases}$$

При цьому α і β є постійними коефіцієнтами, до того ж $\alpha > 0$, а $\beta < 0$.
Перемикання нелінійного коефіцієнта ψ відбувається на прямих

$$\begin{aligned} f_1 &= C_1 \varepsilon + C_2 d\varepsilon / dt; \\ f_2 &= C_3 \varepsilon + C_2 d\varepsilon / dt; \end{aligned}$$

де C_1, C_2, C_3 — коефіцієнти налаштування.

ПІ-регулятор з комутованою П-складовою

Алгоритм функціонування цього типу РП описується виразом:

$$\mu(t) = \mu_0 + \psi \varepsilon(t) + \frac{1}{T_N} \int_0^t \varepsilon(t) dt,$$

де нелінійний коефіцієнт ψ перемикається за наступним законом:

$$\psi = \begin{cases} K_1 & \text{при } \varepsilon(t)f > 0; \\ -K_2 & \text{при } \varepsilon(t)f < 0. \end{cases}$$

Рівняння лінії перемикання f відповідає виду :

$$f = C_1 \varepsilon + C_2 (d\varepsilon / dt).$$

РП дозволяє поліпшити, в порівнянні з лінійним РП цього типу, якість перехідних процесів.

Суть роботи РП полягає в тому, що при позитивній помилці, що зменшується, регулюючий вплив дорівнює сумі, що збільшується, І-складової і, що зменшується, П-складової; при негативній помилці, що збільшується, регулюючий вплив дорівнює різниці І-складової і П-складової; при негативній помилці, що зменшується — сумі І-складової і П-складової,

при позитивній помилці, що збільшується – також сумі І-складової і П-складової.

За рахунок введення в алгоритм перемикання інформації про становище пропорційного виконавчого механізму вдалося отримати суттєвий вигравш по ряду показників перехідного процесу в порівнянні з ПІ-регулюючим пристроєм.

Порядок виконання роботи

Варіант завдання на дану лабораторну роботу вибираються з додатка Б за номером групи та номером студента в списку групи.

Пропорційний регулятор зі змінним коефіцієнтом передачі (Рисунок 8.6):

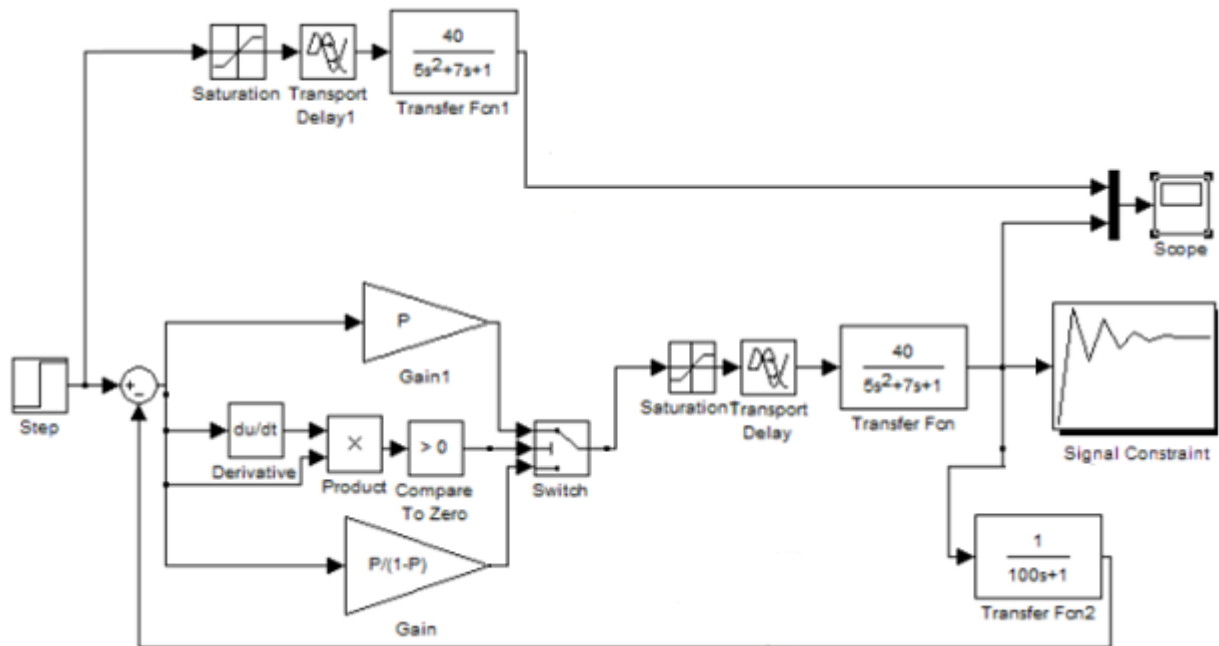


Рисунок 8.6 – Схема дослідження системи з ПІ-регулятором зі змінним коефіцієнтом передачі

Параметри для Switch виставляємо такі, як зображені на рисунку 8.7.

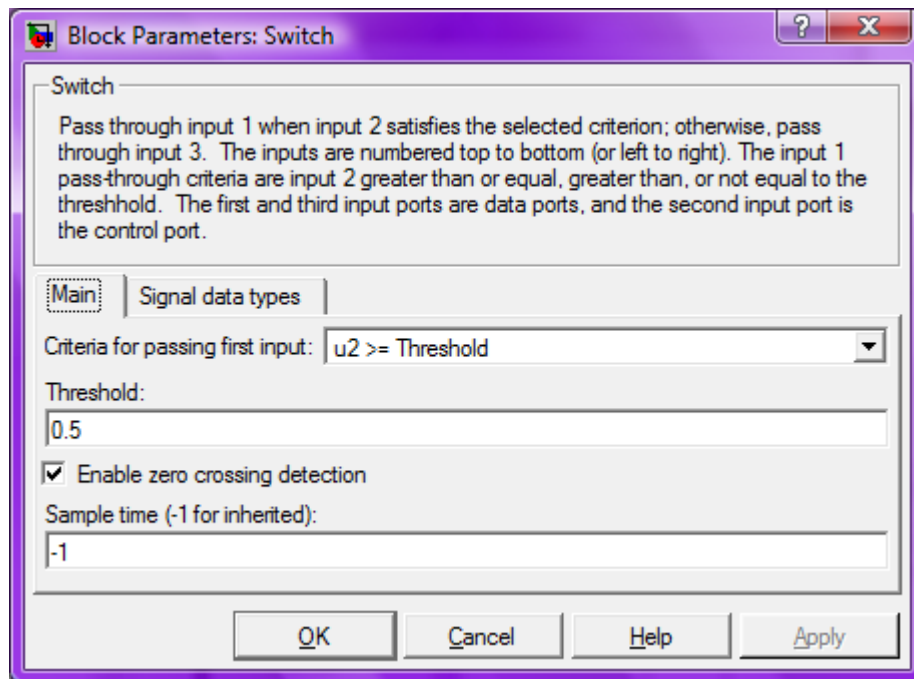


Рисунок 8.7 – Параметри блоку Switch

В командному рядку Matlab, задаємо $P=0.00001$

Параметри всіх інших блоків залишаємо такими, як і в лабораторних роботах минулого семестру.

Нижче наведені скріншоти для полегшення виконання роботи:

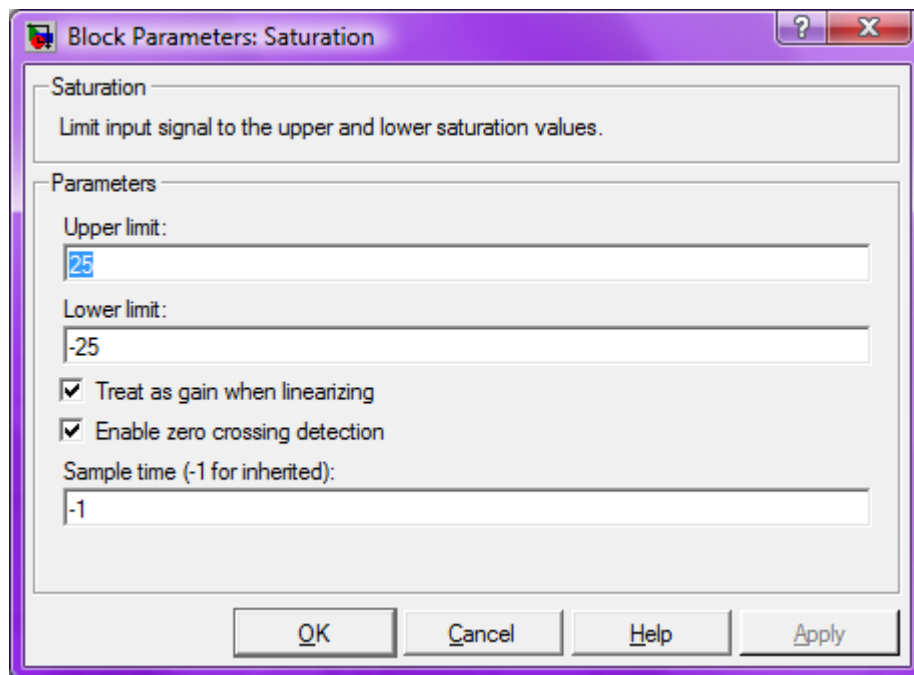


Рисунок 8.8 – Налаштування блоку Saturation

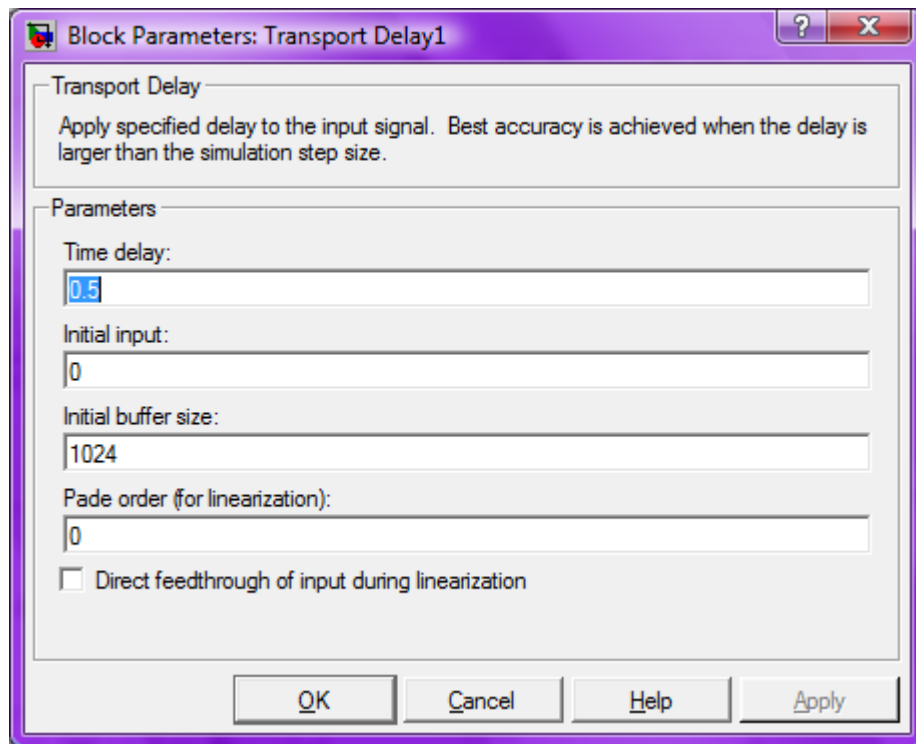


Рисунок 8.9 – Налаштування блоку Transport Delay

Зауваження:

Для роботи Signal Constraint початкові значення змінних, за якими це блок шукатиме оптимум повинні бути маленькими.

Для знаходження параметрів використовуємо як і в попередніх роботах блок Signal Constraint.

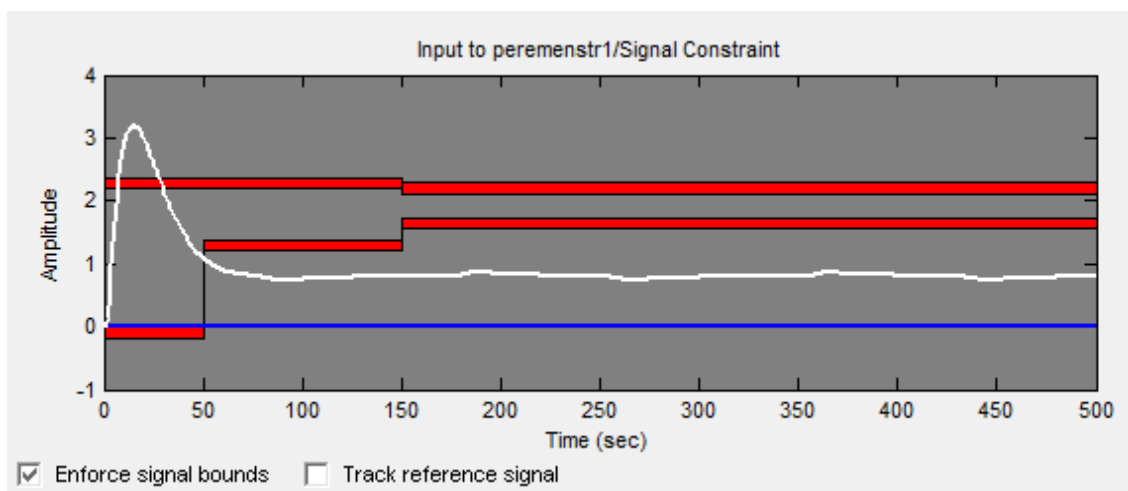


Рисунок 8.10 – Підбір параметрів регулятора за допомогою блоку Signal Constraint

З рисунка 8.11 видно, що хоча в задані за промовчуванням параметри наша перехідна характеристика не вписалась, але перехідний процес покращився.

Підібрані параметри: $P = 0.0951$

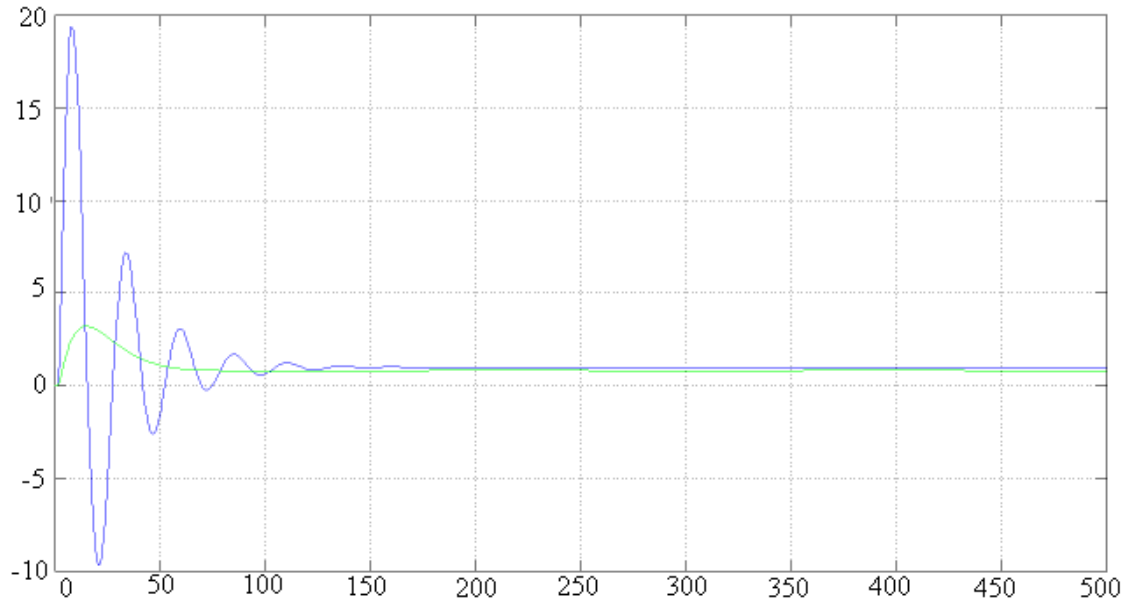


Рисунок 8.11 – Перехідний процес системи з пропорційним регулятором зі змінним коефіцієнтом передачі

Інтегральний регулятора зі змінним часом інтегрування

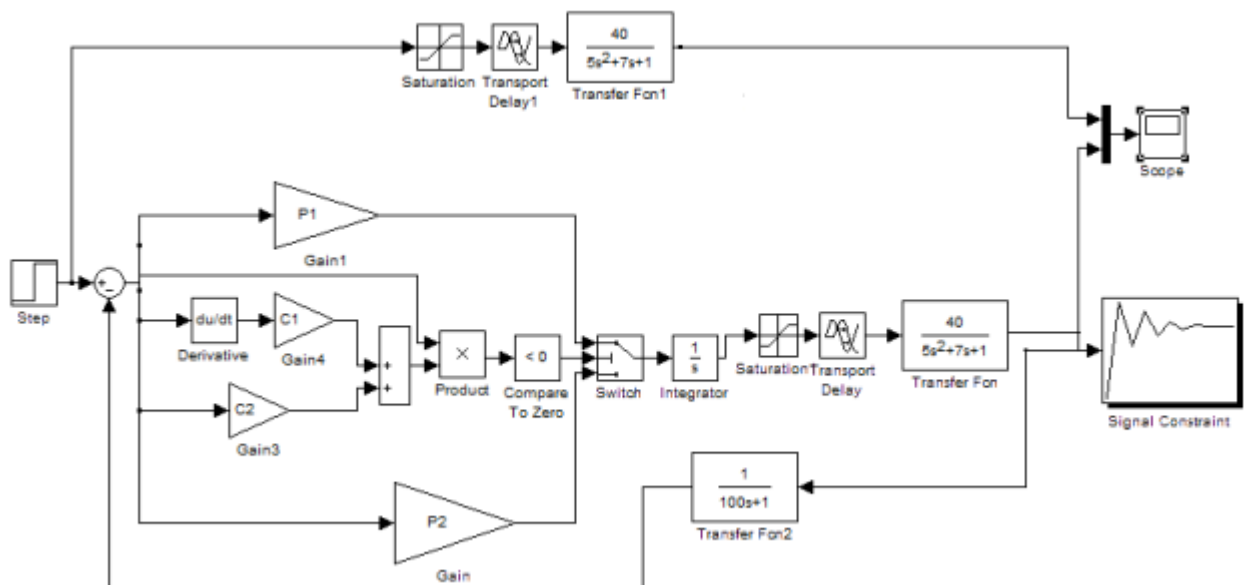


Рисунок 8.12 – Схема дослідження системи з інтегральним регулятором зі змінним часом інтегрування

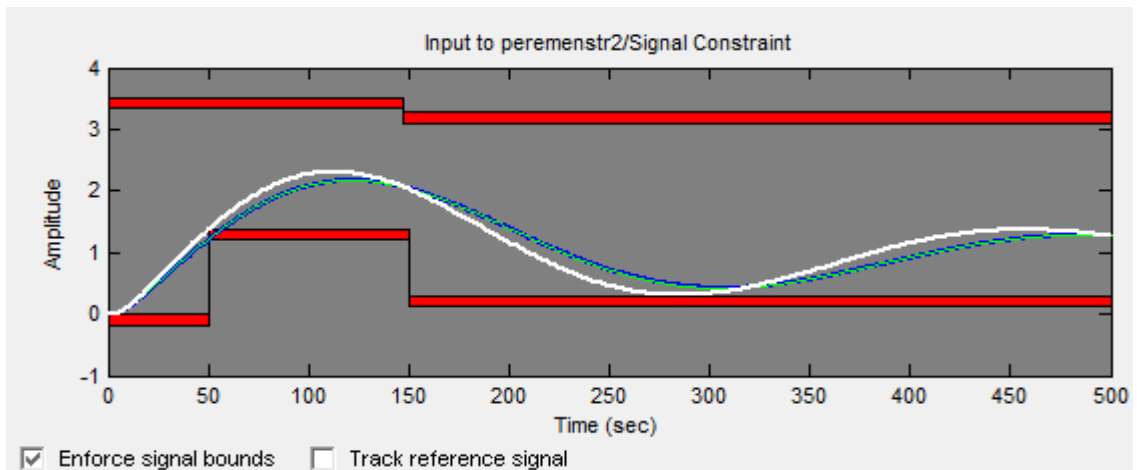


Рисунок 8.13 – Підбір параметрів регулятора за допомогою блоку Signal Constraint

Підібрані параметри: $C1 = 5.7763e-004$, $C2 = 7.5455e-005$
 $P1 = 8.8981e-005$, $P2 = 8.8106e-004$

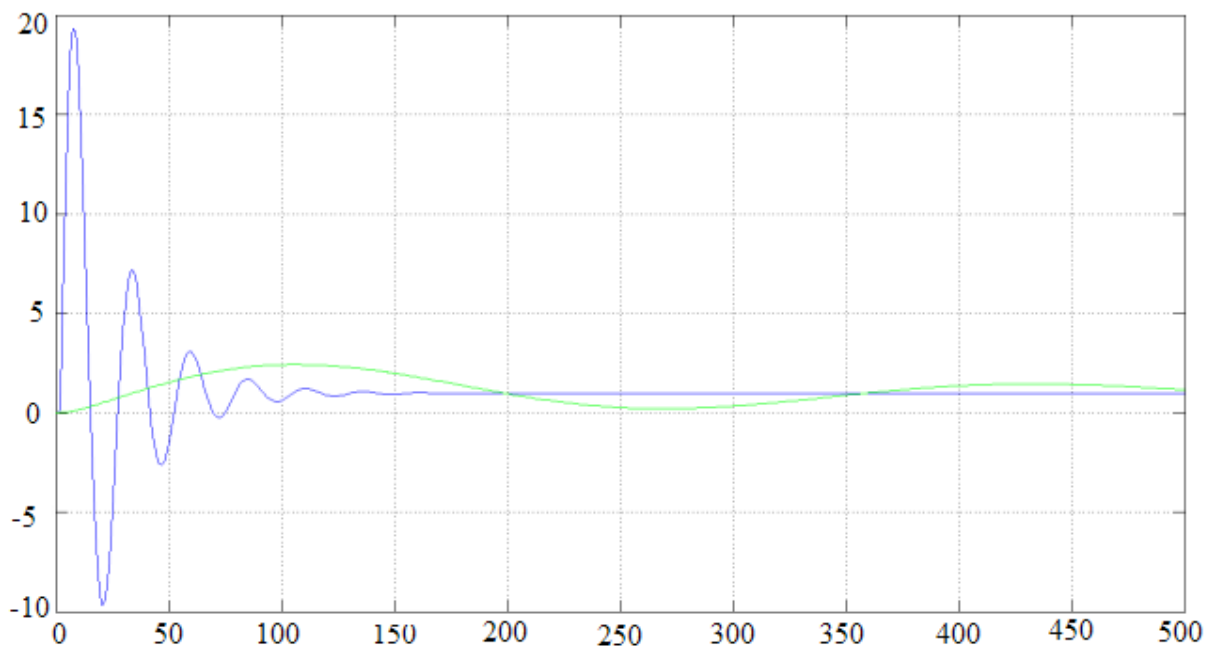


Рисунок 8.14 – Перехідний процес системи з інтегральним регулятором зі змінним часом інтегрування

ПІ-регулятор з комутованою П-складовою

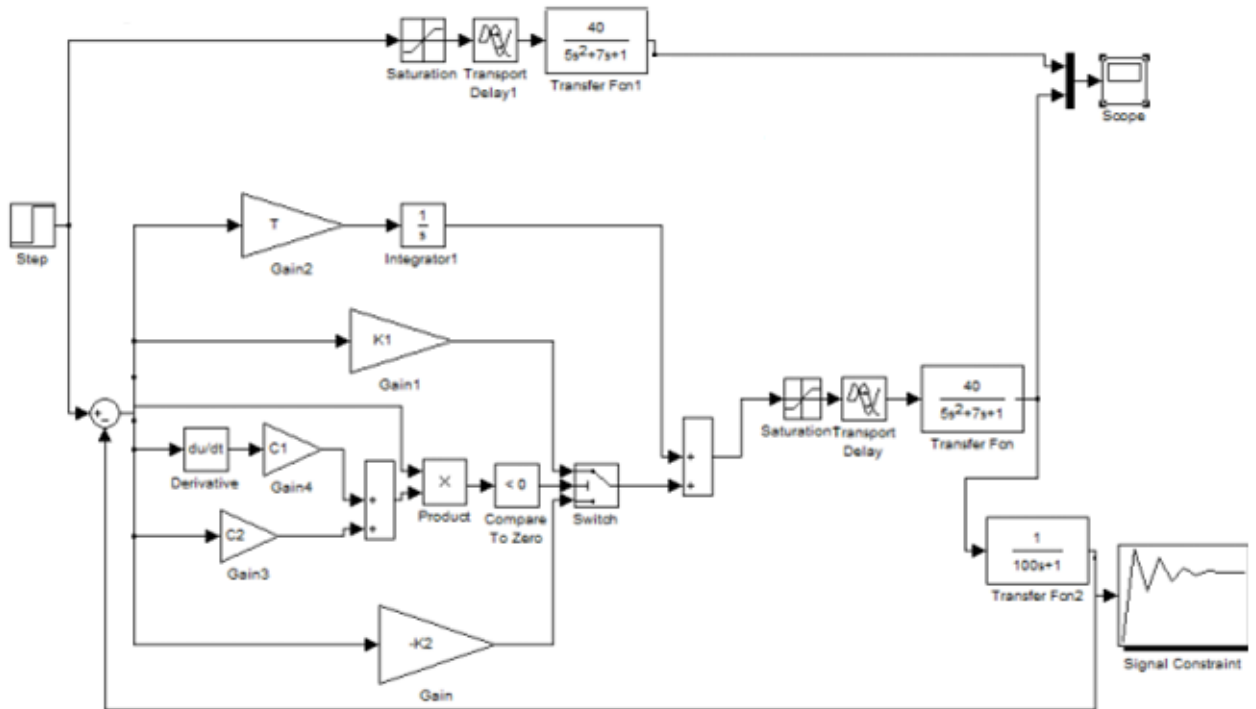


Рисунок 8.15 – Схема дослідження системи з ПІ-регулятором з комутованою П-складовою

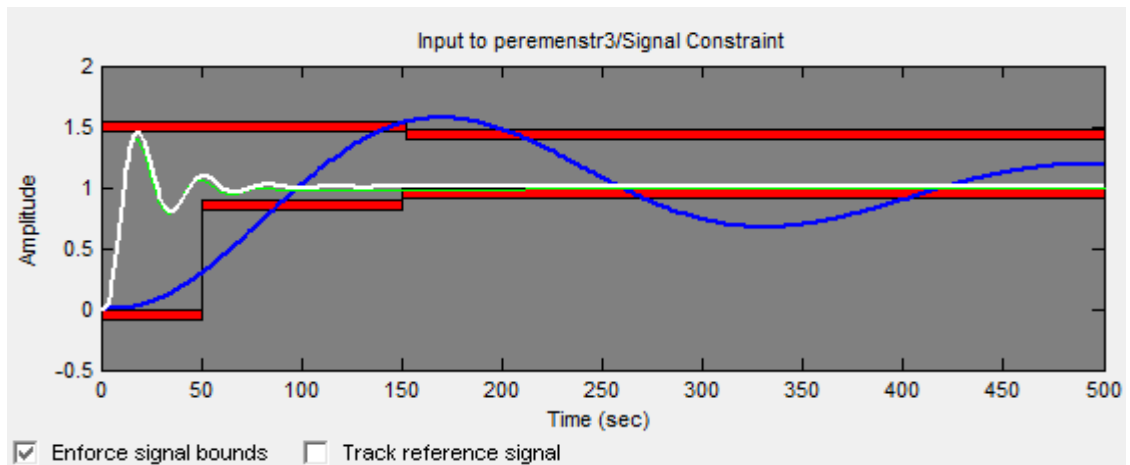


Рисунок 8.16 – Підбір параметрів регулятора за допомогою блоку Signal Constraint

Підібрані параметри: $C1 = 2.3292$, $C2 = -2.3291$

$K1 = 0.6604$, $K2 = -0.0349$, $T = 0.0079$

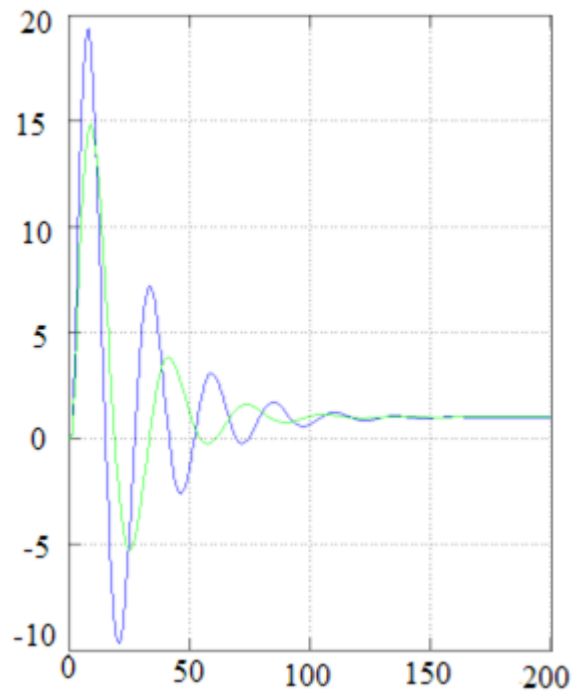


Рисунок 8.17 – Перехідний процес системи з ПІ-регулятором з комутованою П-складовою

Завдання на лабораторну роботу

1. Вибрати варіант завдання на лабораторну роботу з додатка Б за шифром групи та номером студента в списку групи.
2. Про моделювати в Matlab 3 регулятори зі змінною структурою.
3. Проаналізувати результати, зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9

Інваріантні системи автоматичного керування

Мета роботи: Вивчення принципів побудови та властивостей інваріантних систем автоматичного управління.

Короткі теоретичні відомості

Однією з головних задач синтезу автоматичної системи є забезпечення необхідної точності в встановлених і перехідних режимах. Точність систем в встановлених режимах можна підвищити за рахунок збільшення порядку астатизму і коефіцієнта передачі розімкненого контуру. Але цей шлях приводить до зменшення запасу стійкості, збільшення коливань і зниження точності системи в перехідних режимах. Ефективним способом вирішення завдання забезпечення точності в встановлених і перехідних режимах є компенсація зовнішніх впливів шляхом реалізації принципу інваріантності.

«Інваріантність» означає незалежність однієї фізичної величини від іншої. В теорії автоматичного управління розглядають незалежність в основному двох вихідних величин – вихідної величини і сигналу помилки від вхідних впливів. В системах стабілізації необхідно домагатися незалежності вихідної величини від збурювального впливу, а в слідкуючих системах – незалежності сигналу помилки від задавального впливу.

Інваріантність в САУ досягається компенсацією збурювального впливу, коли керуючий вплив формується в залежності від змін збурювального впливу. Цей принцип управління застосовуємо, якщо збурюючий вплив може бути вимірний. Зазвичай принцип управління по збуренню застосовують у поєднанні з принципом управління за відхиленням (комбінована система).

Розглянемо алгоритмічну структуру комбінованої системи стабілізації з компенсуючим зв'язком по збуренню Ξ , представлену на рис. 1. Компенсуючий зв'язок діє на вихідну величину зі знаком, який завжди протилежний знаку безпосереднього впливу збурення на вихід.

Передавальна функція системи по обуренню:

де $W_o(s)$ і $W_{oz}(s)$ – передавальні функції об'єкта відповідно по керуючому і збурюючому впливу; $W_y(s)$ – передатна функція керуючого пристрою; – передатна функція компенсуючого пристрою.

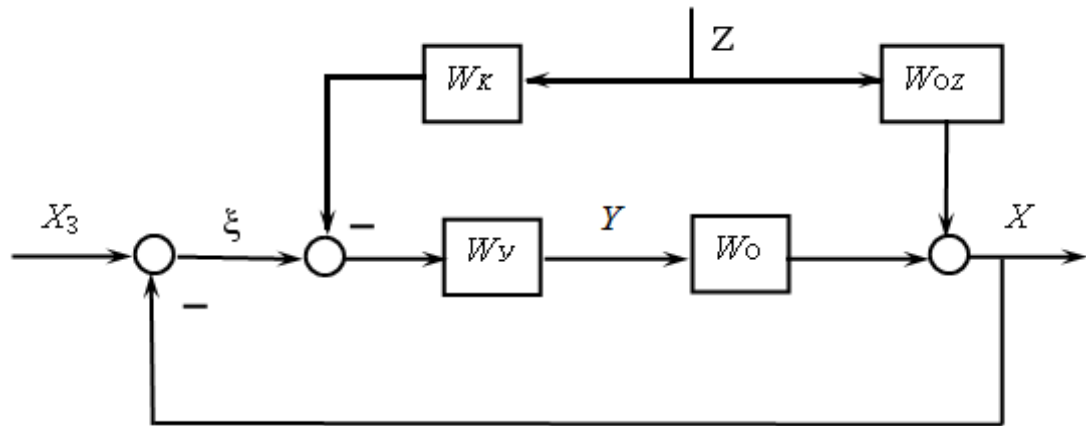


Рисунок 9.1 – Структурна схема комбінованої САУ з компенсуючим зв'язком по збуренню

Керована величина $x(t)$ не залежить від збурення, якщо передавальна функція (9.1) рівна нулю:

Ця умова виконується, якщо чисельник передавальної функції дорівнює нулю. Прирівнявши нулю вираз (11.1), визначимо умову інваріантності сабілізуючої величини по відношенню до збурення

$$W_{oz}(s) - W_k(s)W_o(s) = 0, \quad (9.3)$$

З (9.3) випливає, що для досягнення незалежності величини $x(t)$ від збурення $z(t)$ необхідно, щоб динамічні властивості двох паралельних каналів, по яких збурення впливає на $x(t)$, були однаковими.

Відповідно до (9.3) передатна функція компенсуючого пристрою:

$$W_k(s) = \frac{W_{oz}(s)}{W_y(s)W_o(s)}, \quad (9.4)$$

Передавальна функція компенсуючого пристрою відповідає динамічній ланці, властивості якої визначаються властивостями каналів збурення $W_{oz}(s)$ та управління $W_y(s)W_o(s)$. Якщо інерційність каналу управління більша, ніж інерційність каналу збурення, то компенсуючий пристрій повинен мати властивості диференціюючої ланки. Причому, чим більше різниця цих інерційностей, тим вище повинен бути порядок диференціюючої ланки. Такі ланки технічно важко реалізувати.

У стежать системах необхідна інваріантність сигналу помилки від задає впливу. Для схеми, наведеної на рисунку 9.2, передавальна функція між точкою докладання задає впливу $x(t)$ і точкою виходу сигналу похибки

Прирівнюючи функцію (9.5) до нуля, визначимо умову інваріантності помилки стеження стосовно задаючому впливу

$$1 - W_k(s)W_y(s)W_o(s) = 0, \quad (9.6)$$

звідки визначається необхідна передавальна функція компенсуючого пристрою як

$$W_k(s) = \frac{1}{W_y(s)W_o(s)}, \quad (9.7)$$

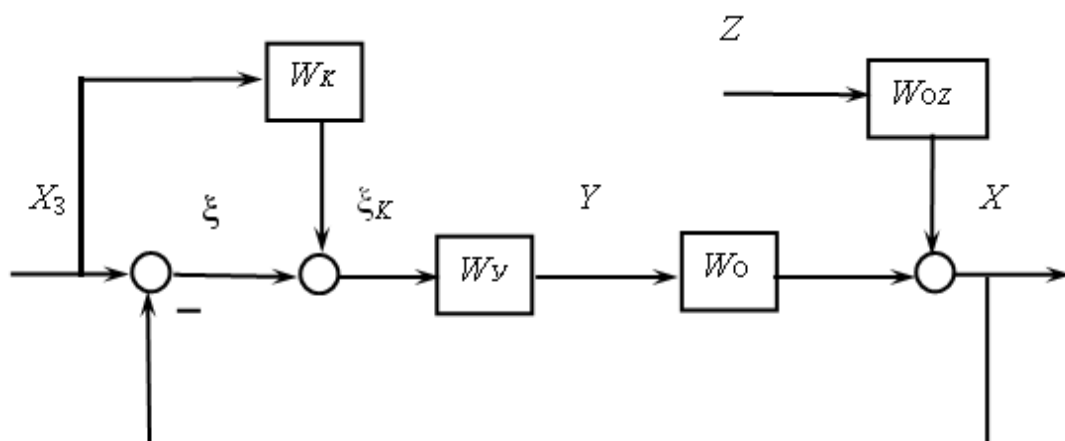


Рисунок 9.2 – Структурна схема комбінованої САУ з компенсує зв'язком по задаючому впливу

З передавальних функцій (10.1) і (10.5) випливає, що компенсують зв'язк не змінюють характеристичний поліном системи, тому не впливають на її стійкість.

Теоретично в системі можна досягти *абсолютної інваріантності*. В цьому випадку передавальна функція замкнутої системи повинна дорівнювати одиниці. Це означає, що така система автоматичного управління повинна мати смугу пропускання по частоті без амплітудних і фазових спотворень, рівну нескінченності. У реальних системах забезпечити нескінченну смугу пропускання неможливо, тому реалізація повної інваріантності по керуючому впливу пов'язана з принциповими труднощами, пов'язаними з реалізованою передавальною функцією коригувального пристрою, що зменшує помилку системи.

Якщо реалізувати приблизно, то в системі здійснення часткова інваріантність. Часткова інваріантність може значно підвищити точнісні характеристики замкнутих САУ.

В якості об'єкта дослідження розглянемо слідкуючу систему. У слідкуючих системах алгоритм функціонування заздалегідь невідомий. Зазвичай регульована координата в таких системах повинна відтворювати зміни деякого зовнішнього фактора, стежити за ним. Так, антена радіолокатора повинна стежити за положенням літака. Слідкуюча система може бути виконана у відповідності з будь-яким фундаментальним принципом управління і буде відрізнятися від відповідної системи програмного керування тим, що замість датчика програми в ній буде мати місце пристрій стеження за зміною зовнішнього фактора.

На рисунку 14.3 приведена спрощена схема слідкуючої системи на базі ЕМУ та електродвигуна. Регульованою величиною є кут повороту управляемого об'єкту 2. Привідний двигун 3 живиться від ЕМУ 1. Вхідний вплив подається на сельсин-датчик 5 у вигляді кута повороту його ротора. Сполучені трансформаторною схемою сельсин-датчик і сельсин-приймач 4,

механічно пов'язаний з об'єктом управління, виробляють напругу, пропорційну неузгодженості $\xi = \theta_{\text{вх}} - \theta_{\text{вих}}$.

Напруга помилки посилюється підсилювачем U і ЕМУ 1 (АМР) і надходить на якір виконавчого двигуна 3, що обертає одночасно об'єкт 2 і ротор сельсина-приймача до тих пір, поки неузгодженість не стане рівним нулю.

Структурна схема стежить системи наведена на рис. 4.

Спрощені передавальні функції ланок структурної схеми при нехтуванні індуктивністю якірного ланцюга ЕМУ і двигуна з урахуванням паспортних даних наведено нижче.

Коефіцієнт передачі k_y підсилювача U задати будь-яким в діапазоні від 0.06 до 0.15.

Передавальну функцію ЕМУ задати:

- передатна функція двигуна з управління щодо частоти обертання;
- передатна функція двигуна по обуренню щодо частоти обертання;

$W(s) = \frac{1}{s}$ – передавальна функція вихідної ланки.

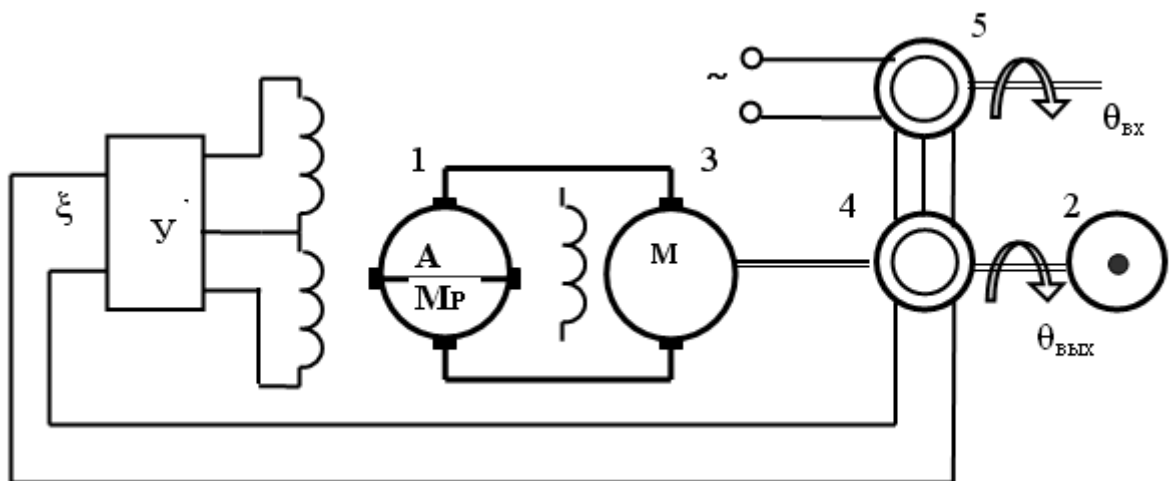


Рисунок 11.3 – Слідкуюча система

Ланка K служить для завдання величини обурення (моменту навантаження двигуна).

Стосовно до структурної схеми САУ (рисунок 11.3) при заданих і незмінних передавальних функціях ЕМУ і двигуна і значенням коефіцієнта передачі k_y підсилювача виконати наступну роботу:

1. За вихідною структурною схемою слідкуючої системи (рисунок 11.3) зняти статичну характеристику при зміні збурювального впливу Z в межах $0 \div 2$.

2. Визначити передавальну функцію коригувальної ланки W_{korr} , що забезпечує інваріантність керованої величини і збурювального впливу Z в статичному режимі роботи системи. При визначенні передавальної функції коригувальної ланки керуватися структурною схемою, представленою на рисунку 11.5.

3. Зняти статичну характеристику скоригованої системи при зміні збурювального впливу Z в межах $0 \div 2$.

4. Зняти статичну залежність помилки управління від задавального впливу у вихідній системі (рисунок 11.4).

5. Визначити передавальну функцію коригувальної ланки W_{korr} , що забезпечує інваріантність статичної помилки управління ξ і задавального впливу. При визначенні передавальної функції коригувальної ланки керуватися структурною схемою системи, представленою на рисунку 11.6.

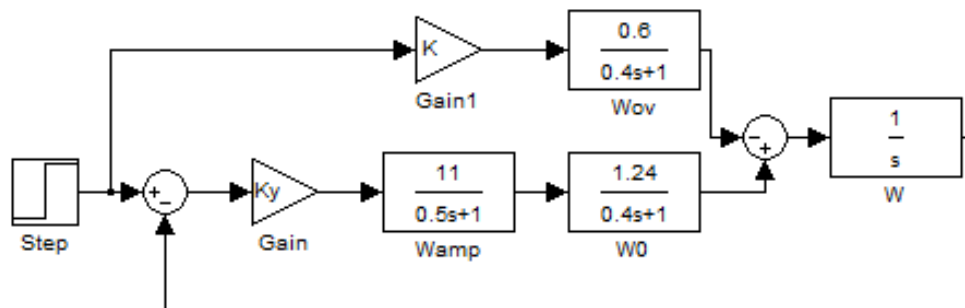


Рисунок 9.4 – Структурна схема слідкуючої системи

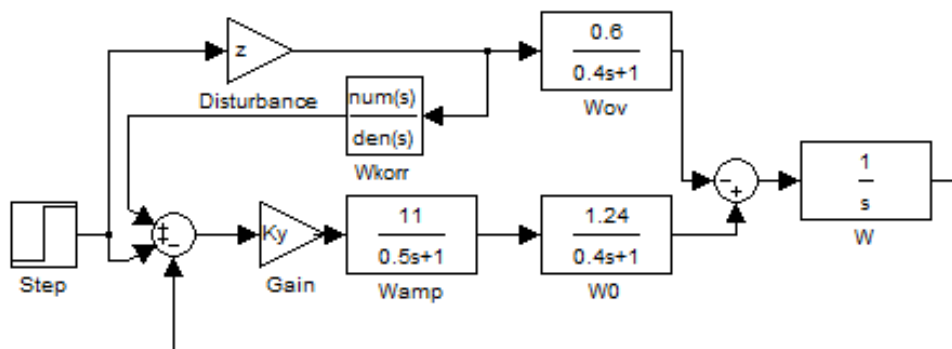


Рисунок 9.5 – Структурна схема слідкуючої системи с компенсацією збурення

6. Зняти статичну залежність помилки управління від задає впливу в системі з компенсуючим зв'язком по задавальному впливу (рисунок 11.6)
7. Порівняти характеристики вихідної системи та системи з різними видами корекції. Зробити висновки.

Порядок виконання роботи

1. Коефіцієнт k_y встановити як описано вище, передавальна функція двигуна згідно індивідуального варіанту завдання. Варіант завдання на дану лабораторну роботу вибираються з додатка Б за номером групи та номером студента в списку групи.
2. Встановлюючи коефіцієнт передачі k_y згідно таблиці 1 і вимірюючи стале значення управляючої величини, заповнити таблицю 1.

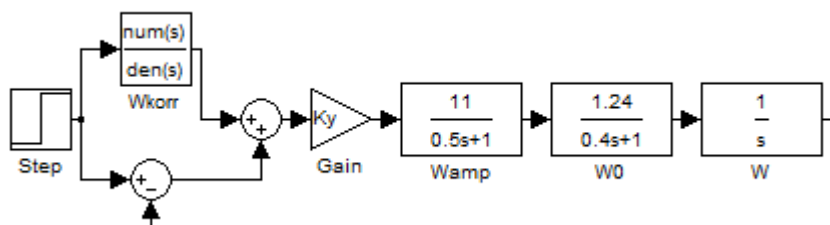


Рисунок 9.6 – Структурна схема слідкуючої системи з компенсуючим зв'язком по задавальному впливу

Таблиця 1

Z	0	0.5	1.0	1.5	2
$X_{вых}$					

4. Побудувати статичну характеристику .
5. Зберегти окремим файлом структурну схему вихідної системи.
6. Набрати структурну схему інваріантної системи з рисунка 11.5, розрахувати передавальну функцію коригувальної ланки і відредагувати його.
7. Виконати п.2 цього розділу для інваріантної системи, заповнити таблицю, аналогічну табл. 1 і побудувати статичну характеристику в тих же координатних осях.
8. Завантажити файл з вихідної структурної схемою, призначити вихідним ланкою ланка порівняння на вході системи.
9. Встановлюючи коефіцієнт передачі вхідної ланки в режимі редагування згідно табл. 2 і вимірюючи сталі значення помилки керування ξ , заповнити таблицю 2.

Таблиця 2

$X_{зад}$	1	2	5	10	20
ξ					

8. За результатами експерименту побудувати статичну залежність .
9. Набрати структурну схему інваріантної по задаючому впливу слідкуючої системи згідно рисунку 9.6.
10. Визначити передавальну функцію ланки корекції і відредагувати її.
11. Виконати п.8 данного розділу для інваріантної системи.
12. За результатами експерименту побудувати статичну залежність .

Контрольні запитання

1. У яких режимах оцінюється якість стаціонарних САУ? Що входить в це поняття і від чого залежать методи його оцінки?
2. Якими бувають оцінки якості перехідних процесів з точки зору їх класифікації?
3. У чому суть локальних та інтегральних критеріїв якості?
4. У чому суть прямого методу аналізу перехідних процесів?
5. Як визначаються прямі оцінки якості перехідних процесів?
6. Які показники відносяться до кореневих оцінками якості?
7. Які властивості речових частотних характеристик дозволяють побічно судити про якість перехідного процесу?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.
2. Барласов Б.З., Ильин В.И. Наладка приборов и средств автоматизации. – М.: Высш. шк., 1975. – 350 с.
3. Беляев Б.И. Современные методы проектирования следящих систем и регуляторов: Учеб. пособие. – Л.: СЗПИ, 1985. – 80 с.
4. Васильев Д.В., Чуич В.Г. САУ /примеры расчета/. – М.: Высш. шк., 1967. – 418 с.
5. Дубровный В.А., Забокрицкий Е.И., Трегуб В.Г. и др. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования. – В 2-х ч. – Ч. 2. – 2-е изд. – Киев: Наук, думка, 1981. – 940 с.
6. Ильин Б.В., Лейкин С.И. Интеративно-частотный метод настройки промышленных систем регулирования с ПИ-регуляторами // Автоматизация производственных процессов. – Л.: Стройиздат, 1970. – С.5-32.
7. Кампе-Немм А.А. Автоматическое двухпозиционное регулирование. – М.: Наука, 1967. – 160 с.
8. Ключев А.С. Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка. – М.: Энергия, 1967.
9. Ключев А.С., Товарное А.Г. Наладка систем автоматических регуляторов котлоагрегатов. – М.: Энергия, 1970. – 280 с.
10. Кон Л.И., Семых В.В. Об одном классе регуляторов с переменной структурой // Автоматика и телемеханика. 1969 № 5. – С.87-95.
11. Конев Г.П., Трегуб В.Г. О выборе закона регулирования и оптимальных настроек при гармонических возмущающих воздействиях // Монтаж и наладка средств автоматизации и связи. «Науч.-техн.реф. сб./ЦБНТИ». – М., 1979. – Вып. 10. – С.16-19.

12. Конев Г.П., Трегуб В.Г. Определение параметров настройки ПИ-регулятора с учетом динамики объекта по каналу основного возмущения // Монтаж и наладка средств автоматизации и связи. – Науч.-техн. реф. сб./ЦБНТИ. – М., 1976. – Вып.12. – С.12-15.

13. Копелович А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов. – М.: Металлургия, 1960. – 120 с.

14. Кравец П.И., Скаржепа В.А. Об одном алгоритме квазиоптимального управления статическими объектами. – Киев: КПИ, 1980. – 13 с. – Деп. в УкрНИИНТИ, № 2345.

15. Круг Е.К., Александрии Т.И., Дипиченский С.Н. Цифровые регуляторы. – М.: Энергия, 1966. – 504 с.

16. Круг Е.К., Минина О.М. Электрические регуляторы промышленной автоматики. – М.: Госэнергоиздат, 1962.

17. Левицкий Ю.Е., Петров В.А., Дубровский В.А. Уточненные методы расчета систем двухпозиционного регулирования // Изв. вузов: Технология легкой промышленности. 1974. – № 1. – С.142-147; № 2. – С.126-132.

18. Лейкин С.И., Пушкин С.Ф., Герасимов Л.Ф. Инженерный метод настройки оптимальных параметров настройки ПИ-регуляторов с учетом соотношения между пароходным и транспортным запаздыванием объекта // Автоматизация производственных процессов. – М.: ЦБНТИ, 1967. – С.5-26.

19. Микропроцессорные регулирующие устройства. Обзор, информ. ЦНИИТЭИ приборостроения. – М., 1984. – ТС-6. – Вып. I. – С.76.

20. Певзнер В.В. Прецизионные регуляторы температуры. – М.: Энергия, 1973. – 192 с.

21. Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 344 с.

22. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.

23. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регулятора теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.

24. Современные общепромышленные электрические регулирующие устройства: Обзорная информация. – М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1902. – Вып. 2. – 78 с.
25. Теория систем с переменной структурой / Под ред. С.В.Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 529 с.
26. Технические средства автоматики / В.В. Кишнев, В.А.Иванов, А.А. Афанасьев. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
27. Фатеев А.В. Расчет автоматических систем. – М.: Высш. шк., 1973. – 336 с.
28. Шгрокий Д.К., Куриленко О.Д. Расчет параметров промышленных систем регулирования. - Киев: Техніка, 1972. – 232 с.
29. Электроизмерительные приборы. Номенклатурный каталог. – М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1982. – 120 с.
30. Ялышев А.У., Розеронов О.И. Многофункциональные аналоговые регулирующие устройства автоматики. – М.: Машиностроение, 1981. – 399 с.

Додаток А – Таблиця варіантів для лабораторної роботи №1 згідно з шифром навчальної групи та номером студента за списком навчальної групи

		Набір варіацій змінної x														
	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Варіант для ІА-Х1	X1	2,31	2,89	3,52	3,96	4,68	5,35	5,72	6,35	6,74	7,45	7,90	8,42	8,99	9,59	10,11
	X2	2,83	3,96	4,30	4,30	4,73	5,39	7,31	6,52	7,20	8,66	9,17	8,57	10,43	10,37	11,04
	X3	2,43	3,25	3,68	4,63	5,88	5,51	6,48	6,57	7,83	7,88	9,12	9,03	9,60	10,58	10,15
	X4	4,09	4,28	4,21	5,87	5,63	6,18	6,29	7,82	7,74	8,90	8,11	10,38	9,48	11,54	12,01
	X5	3,61	4,33	5,54	5,71	6,59	8,15	7,73	8,44	8,86	9,41	9,12	9,81	10,83	11,51	11,86
	X6	2,42	2,97	3,91	3,54	4,31	5,13	5,97	6,60	6,94	7,16	7,78	8,12	8,74	9,49	10,33
	X7	5,12	6,07	5,92	7,09	8,55	8,43	8,66	9,45	10,63	10,28	11,36	11,13	12,23	13,32	12,48
	X8	2,52	3,34	2,41	3,04	4,14	5,14	5,34	5,98	6,10	6,72	7,00	7,60	9,23	9,53	10,25
	X9	6,89	6,34	8,40	7,73	7,07	7,00	10,52	10,90	10,45	11,76	12,43	12,89	13,91	13,89	14,72
	X10	2,08	2,14	2,40	3,80	4,42	4,82	5,71	6,13	6,69	6,90	7,24	6,80	7,52	8,02	9,87
	X11	2,32	3,61	3,40	3,83	5,86	6,38	7,31	7,18	7,48	8,36	7,65	7,10	9,17	8,05	10,89
	X12	3,48	3,53	4,31	5,42	5,17	5,45	6,82	7,91	6,98	7,65	8,97	9,25	10,49	10,10	10,93
	X13	2,31	2,89	3,52	3,96	4,68	5,35	5,72	6,35	6,74	7,45	7,90	8,42	8,99	9,59	10,11
	X14	2,83	3,96	4,30	4,30	4,73	5,39	7,31	6,52	7,20	8,66	9,17	8,57	10,43	10,37	11,04
	X15	2,43	3,25	3,68	4,63	5,88	5,51	6,48	6,57	7,83	7,88	9,12	9,03	9,60	10,58	10,15
	X16	4,09	4,28	4,21	5,87	5,63	6,18	6,29	7,82	7,74	8,90	8,11	10,38	9,48	11,54	12,01
	X17	3,61	4,33	5,54	5,71	6,59	8,15	7,73	8,44	8,86	9,41	9,12	9,81	10,83	11,51	11,86
	X18	2,42	2,97	3,91	3,54	4,31	5,13	5,97	6,60	6,94	7,16	7,78	8,12	8,74	9,49	10,33
	X19	5,12	6,07	5,92	7,09	8,55	8,43	8,66	9,45	10,63	10,28	11,36	11,13	12,23	13,32	12,48
	X20	2,52	3,34	2,41	3,04	4,14	5,14	5,34	5,98	6,10	6,72	7,00	7,60	9,23	9,53	10,25
	X21	6,89	6,34	8,40	7,73	7,07	7,00	10,52	10,90	10,45	11,76	12,43	12,89	13,91	13,89	14,72
	X22	2,08	2,14	2,40	3,80	4,42	4,82	5,71	6,13	6,69	6,90	7,24	6,80	7,52	8,02	9,87
	X23	2,32	3,61	3,40	3,83	5,86	6,38	7,31	7,18	7,48	8,36	7,65	7,10	9,17	8,05	10,89
	X24	3,48	3,53	4,31	5,42	5,17	5,45	6,82	7,91	6,98	7,65	8,97	9,25	10,49	10,10	10,93
	X25	0,53	0,66	0,81	0,91	1,08	1,23	1,32	1,46	1,55	1,71	1,82	1,94	2,07	2,21	2,33
	X26	0,65	0,91	0,99	0,99	1,09	1,24	1,68	1,50	1,66	1,99	2,11	1,97	2,40	2,39	2,54
	X27	0,56	0,75	0,85	1,06	1,35	1,27	1,49	1,51	1,80	1,81	2,10	2,08	2,21	2,43	2,33
	X28	0,94	0,98	0,97	1,35	1,30	1,42	1,45	1,80	1,78	2,05	1,87	2,39	2,18	2,65	2,76
	X29	0,83	1,00	1,28	1,31	1,51	1,88	1,78	1,94	2,04	2,16	2,10	2,26	2,49	2,65	2,73
	X30	0,56	0,68	0,90	0,81	0,99	1,18	1,37	1,52	1,60	1,65	1,79	1,87	2,01	2,18	2,38
	X31	1,18	1,40	1,36	1,63	1,97	1,94	1,99	2,17	2,44	2,36	2,61	2,56	2,81	3,06	2,87
	X32	0,58	0,77	0,55	0,70	0,95	1,18	1,23	1,38	1,40	1,55	1,61	1,75	2,12	2,19	2,36
	X33	1,58	1,46	1,93	1,78	1,63	1,61	2,42	2,51	2,40	2,70	2,86	2,96	3,20	3,19	3,38
	X34	0,48	0,49	0,55	0,87	1,02	1,11	1,31	1,41	1,54	1,59	1,66	1,56	1,73	1,84	2,27
	X35	0,53	0,83	0,78	0,88	1,35	1,47	1,68	1,65	1,72	1,92	1,76	1,63	2,11	1,85	2,50
	X36	0,80	0,81	0,99	1,25	1,19	1,25	1,57	1,82	1,60	1,76	2,06	2,13	2,41	2,32	2,51
	X37	0,12	0,15	0,19	0,21	0,25	0,28	0,30	0,34	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54
	X38	0,15	0,21	0,23	0,23	0,25	0,28	0,39	0,34	0,38	0,46	0,49	0,45	0,55	0,55	0,58
	X39	0,13	0,17	0,19	0,24	0,31	0,29	0,34	0,35	0,41	0,42	0,48	0,48	0,51	0,56	0,54

	X40	0,22	0,23	0,22	0,31	0,30	0,33	0,33	0,41	0,41	0,47	0,43	0,55	0,50	0,61	0,64
		Набір варіацій змінної x														
	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Варіант для ІА-Х2	X1	2,37	3,02	4,83	5,02	5,12	5,25	5,30	5,62	5,63	5,72	5,79	6,07	6,78	7,42	7,91
	X2	2,16	2,86	4,74	4,95	5,11	5,30	5,25	5,68	5,52	5,76	5,81	5,94	6,89	7,46	7,95
	X3	1,95	2,71	4,65	4,87	5,10	5,34	5,20	5,75	5,42	5,80	5,83	5,82	7,00	7,49	7,98
	X4	1,74	2,55	4,55	4,79	5,09	5,38	5,14	5,81	5,31	5,84	5,86	5,69	7,12	7,52	8,01
	X5	1,53	2,40	4,46	4,72	5,08	5,42	5,09	5,88	5,21	5,88	5,88	5,57	7,23	7,55	8,04
	X6	1,32	2,24	4,37	4,64	5,07	5,46	5,04	5,94	5,10	5,92	5,90	5,45	7,34	7,58	8,07
	X7	1,11	2,09	4,27	4,56	5,06	5,50	4,99	6,00	5,00	5,96	5,93	5,32	7,45	7,62	8,11
	X8	0,90	1,93	4,18	4,49	5,05	5,55	4,94	6,07	4,89	6,00	5,95	5,20	7,57	7,65	8,14
	X9	0,69	1,78	4,08	4,41	5,04	5,59	4,88	6,13	4,79	6,04	5,97	5,07	7,68	7,68	8,17
	X10	0,48	1,63	3,99	4,33	5,03	5,63	4,83	6,20	4,69	6,08	5,99	4,95	7,79	7,71	8,20
	X11	0,27	1,47	3,90	4,26	5,02	5,67	4,78	6,26	4,58	6,11	6,02	4,83	7,90	7,75	8,24
	X12	0,06	1,32	3,80	4,18	5,01	5,71	4,73	6,33	4,48	6,15	6,04	4,70	8,02	7,78	8,27
	X13	-6,34	-8,05	-12,91	-13,41	-13,66	-14,03	-14,15	-15,00	-15,02	-15,28	-15,46	-16,19	-18,09	-19,82	-21,13
	X14	-5,78	-7,64	-12,66	-13,21	-13,64	-14,14	-14,01	-15,17	-14,74	-15,39	-15,52	-15,86	-18,40	-19,91	-21,21
	X15	-5,22	-7,23	-12,41	-13,00	-13,61	-14,25	-13,87	-15,34	-14,46	-15,49	-15,58	-15,53	-18,70	-19,99	-21,30
	X16	-4,66	-6,81	-12,16	-12,80	-13,58	-14,36	-13,74	-15,51	-14,18	-15,59	-15,64	-15,20	-19,00	-20,08	-21,39
	X17	-4,09	-6,40	-11,91	-12,59	-13,56	-14,47	-13,60	-15,69	-13,91	-15,70	-15,70	-14,87	-19,30	-20,17	-21,47
	X18	-3,53	-5,99	-11,66	-12,39	-13,53	-14,58	-13,46	-15,86	-13,63	-15,80	-15,76	-14,54	-19,60	-20,25	-21,56
	X19	-2,97	-5,58	-11,41	-12,18	-13,50	-14,70	-13,32	-16,03	-13,35	-15,91	-15,82	-14,21	-19,90	-20,34	-21,64
	X20	-2,41	-5,17	-11,16	-11,98	-13,48	-14,81	-13,18	-16,20	-13,07	-16,01	-15,88	-13,88	-20,20	-20,42	-21,73
	X21	-1,85	-4,75	-10,91	-11,77	-13,45	-14,92	-13,04	-16,37	-12,79	-16,12	-15,94	-13,55	-20,50	-20,51	-21,82
	X22	-1,29	-4,34	-10,66	-11,57	-13,42	-15,03	-12,90	-16,55	-12,51	-16,22	-16,00	-13,22	-20,80	-20,60	-21,90
	X23	-0,73	-3,93	-10,41	-11,36	-13,39	-15,14	-12,76	-16,72	-12,23	-16,33	-16,07	-12,89	-21,10	-20,68	-21,99
	X24	-0,17	-3,52	-10,16	-11,16	-13,37	-15,25	-12,62	-16,89	-11,95	-16,43	-16,13	-12,56	-21,41	-20,77	-22,07
	X25	16,93	21,49	34,47	35,82	36,48	37,46	37,79	40,05	40,11	40,80	41,27	43,24	48,31	52,93	56,41
	X26	15,43	20,39	33,80	35,27	36,41	37,76	37,42	40,50	39,36	41,08	41,43	42,36	49,12	53,16	56,64
	X27	13,93	19,29	33,13	34,72	36,34	38,05	37,05	40,96	38,62	41,36	41,59	41,47	49,92	53,38	56,87
	X28	12,43	18,19	32,46	34,17	36,27	38,35	36,67	41,42	37,87	41,64	41,75	40,59	50,72	53,61	57,10
	X29	10,93	17,09	31,79	33,63	36,20	38,65	36,30	41,88	37,13	41,91	41,92	39,71	51,53	53,84	57,33
	X30	9,43	15,99	31,12	33,08	36,12	38,94	35,93	42,34	36,38	42,19	42,08	38,83	52,33	54,07	57,56
	X31	7,94	14,89	30,46	32,53	36,05	39,24	35,56	42,80	35,64	42,47	42,24	37,94	53,13	54,30	57,79
	X32	6,44	13,79	29,79	31,98	35,98	39,53	35,19	43,26	34,89	42,75	42,41	37,06	53,94	54,53	58,02
	X33	4,94	12,69	29,12	31,43	35,91	39,83	34,82	43,72	34,15	43,03	42,57	36,18	54,74	54,76	58,25
	X34	3,44	11,59	28,45	30,89	35,83	40,12	34,45	44,18	33,40	43,31	42,73	35,29	55,55	54,99	58,48
	X35	1,94	10,49	27,78	30,34	35,76	40,42	34,08	44,64	32,66	43,59	42,89	34,41	56,35	55,22	58,71
	X36	0,44	9,39	27,11	29,79	35,69	40,72	33,70	45,10	31,91	43,87	43,06	33,53	57,15	55,45	58,94
	X37	-45,19	-57,39	-92,02	-95,63	-97,41	-100,02	-100,90	-106,92	-107,09	-108,93	-110,18	-115,45	-128,99	-141,31	-150,62
	X38	-41,19	-54,45	-90,24	-94,17	-97,22	-100,81	-99,90	-108,15	-105,10	-109,68	-110,61	-113,09	-131,14	-141,93	-151,23
	X39	-37,19	-51,51	-88,45	-92,71	-97,03	-101,60	-98,91	-109,37	-103,11	-110,42	-111,05	-110,73	-133,29	-142,54	-151,84
	X40	-33,19	-48,57	-86,67	-91,24	-96,83	-102,39	-97,92	-110,60	-101,12	-111,17	-111,48	-108,38	-135,43	-143,15	-152,46
		Набір варіацій змінної x														

	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Варіант для ІА-ХЗ	X1	11,29	8,20	6,91	7,29	6,70	4,71	8,71	9,20	3,22	1,95	1,09	-3,16	1,45	-6,03	1,11
	X2	11,40	8,26	6,96	7,33	6,73	4,70	8,74	9,23	3,17	1,87	0,99	-3,31	1,34	-6,24	0,99
	X3	11,51	8,32	7,00	7,37	6,75	4,69	8,77	9,27	3,11	1,80	0,90	-3,47	1,24	-6,45	0,86
	X4	11,63	8,39	7,04	7,41	6,77	4,68	8,81	9,30	3,06	1,72	0,80	-3,62	1,13	-6,66	0,74
	X5	11,74	8,45	7,08	7,44	6,79	4,67	8,84	9,33	3,01	1,64	0,71	-3,78	1,03	-6,87	0,62
	X6	11,85	8,52	7,12	7,48	6,82	4,66	8,87	9,36	2,96	1,57	0,62	-3,93	0,92	-7,08	0,49
	X7	-7,29	-4,08	0,37	0,52	0,82	1,49	2,90	4,65	6,84	7,16	7,52	8,58	8,90	9,39	11,96
	X8	-7,50	-4,24	0,24	0,43	0,71	1,41	2,85	4,64	6,86	7,20	7,56	8,65	8,93	9,43	12,08
	X9	-7,71	-4,39	0,12	0,34	0,61	1,33	2,80	4,63	6,89	7,25	7,60	8,71	8,97	9,46	12,19
	X10	-7,92	-4,55	0,00	0,24	0,51	1,26	2,75	4,62	6,91	7,29	7,64	8,78	9,00	9,49	12,30
	X11	-8,13	-4,70	-0,13	0,15	0,40	1,18	2,70	4,61	6,93	7,33	7,68	8,84	9,03	9,52	12,41
	X12	-8,34	-4,86	-0,25	0,05	0,30	1,10	2,64	4,60	6,95	7,37	7,72	8,90	9,06	9,56	12,53
	X13	-8,55	-5,01	-0,37	-0,04	0,19	1,03	2,59	4,59	6,98	7,41	7,76	8,97	9,10	9,59	12,64
	X14	-8,76	-5,17	-0,50	-0,13	0,09	0,95	2,54	4,58	7,00	7,45	7,80	9,03	9,13	9,62	12,75
	X15	-8,97	-5,32	-0,62	-0,23	-0,02	0,87	2,49	4,57	7,02	7,50	7,84	9,10	9,16	9,65	12,87
	X16	-9,18	-5,47	-0,75	-0,32	-0,12	0,80	2,44	4,56	7,05	7,54	7,87	9,16	9,19	9,68	12,98
	X17	-9,39	-5,63	-0,87	-0,41	-0,23	0,72	2,38	4,55	7,07	7,58	7,91	9,23	9,22	9,72	13,09
	X18	-9,61	-5,78	-0,99	-0,51	-0,33	0,64	2,33	4,54	7,09	7,62	7,95	9,29	9,26	9,75	13,20
	X19	-9,82	-5,94	-1,12	-0,60	-0,44	0,57	2,28	4,53	7,11	7,66	7,99	9,36	9,29	9,78	13,32
	X20	-10,03	-6,09	-1,24	-0,70	-0,54	0,49	2,23	4,52	7,14	7,70	8,03	9,42	9,32	9,81	13,43
	X21	-10,24	-6,25	-1,37	-0,79	-0,64	0,41	2,18	4,51	7,16	7,74	8,07	9,48	9,35	9,84	13,54
	X22	-10,45	-6,40	-1,49	-0,88	-0,75	0,34	2,12	4,50	7,18	7,79	8,11	9,55	9,38	9,88	13,65
	X23	-10,66	-6,55	-1,61	-0,98	-0,85	0,26	2,07	4,49	7,21	7,83	8,15	9,61	9,42	9,91	13,77
	X24	-10,87	-6,71	-1,74	-1,07	-0,96	0,18	2,02	4,48	7,23	7,87	8,19	9,68	9,45	9,94	13,88
	X25	-11,08	-6,86	-1,86	-1,16	-1,06	0,10	1,97	4,47	7,25	7,91	8,23	9,74	9,48	9,97	13,99
	X26	-11,29	-7,02	-1,98	-1,26	-1,17	0,03	1,92	4,46	7,27	7,95	8,27	9,81	9,51	10,01	14,11
	X27	-11,50	-7,17	-2,11	-1,35	-1,27	-0,05	1,86	4,45	7,30	7,99	8,31	9,87	9,55	10,04	14,22
	X28	-11,71	-7,33	-2,23	-1,45	-1,38	-0,13	1,81	4,44	7,32	8,03	8,34	9,94	9,58	10,07	14,33
	X29	-11,92	-7,48	-2,36	-1,54	-1,48	-0,20	1,76	4,43	7,34	8,08	8,38	10,00	9,61	10,10	14,44
	X30	-12,13	-7,63	-2,48	-1,63	-1,58	-0,28	1,71	4,42	7,37	8,12	8,42	10,06	9,64	10,13	14,56
	X31	-12,34	-7,79	-2,60	-1,73	-1,69	-0,36	1,65	4,41	7,39	8,16	8,46	10,13	9,67	10,17	14,67
	X32	-12,55	-7,94	-2,73	-1,82	-1,79	-0,43	1,60	4,40	7,41	8,20	8,50	10,19	9,71	10,20	14,78
	X33	-12,76	-8,10	-2,85	-1,91	-1,90	-0,51	1,55	4,39	7,43	8,24	8,54	10,26	9,74	10,23	14,89
	X34	-12,97	-8,25	-2,98	-2,01	-2,00	-0,59	1,50	4,38	7,46	8,28	8,58	10,32	9,77	10,26	15,01
	X35	-13,18	-8,41	-3,10	-2,10	-2,11	-0,66	1,45	4,37	7,48	8,32	8,62	10,39	9,80	10,30	15,12
	X36	-13,39	-8,56	-3,22	-2,20	-2,21	-0,74	1,39	4,36	7,50	8,37	8,66	10,45	9,83	10,33	15,23
	X37	-13,60	-8,71	-3,35	-2,29	-2,32	-0,82	1,34	4,35	7,53	8,41	8,70	10,52	9,87	10,36	15,35
	X38	-13,81	-8,87	-3,47	-2,38	-2,42	-0,89	1,29	4,34	7,55	8,45	8,74	10,58	9,90	10,39	15,46
	X39	-14,02	-9,02	-3,59	-2,48	-2,53	-0,97	1,24	4,33	7,57	8,49	8,77	10,64	9,93	10,42	15,57
	X40	-14,23	-9,18	-3,72	-2,57	-2,63	-1,05	1,19	4,32	7,59	8,53	8,81	10,71	9,96	10,46	15,68
		Набір варіацій змінної x														
	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Варіант	X1	-14,44	-9,33	-3,84	-2,66	-2,73	-1,13	1,13	4,31	7,62	8,57	8,85	10,77	10,00	10,49	15,80

для ІА-Х4	X2	-14,65	-9,49	-3,97	-2,76	-2,84	-1,20	1,08	4,30	7,64	8,62	8,89	10,84	10,03	10,52	15,91
	X3	-14,86	-9,64	-4,09	-2,85	-2,94	-1,28	1,03	4,29	7,66	8,66	8,93	10,90	10,06	10,55	16,02
	X4	-15,07	-9,80	-4,21	-2,95	-3,05	-1,36	0,98	4,28	7,69	8,70	8,97	10,97	10,09	10,59	16,13
	X5	-15,28	-9,95	-4,34	-3,04	-3,15	-1,43	0,93	4,27	7,71	8,74	9,01	11,03	10,12	10,62	16,25
	X6	-15,49	-10,10	-4,46	-3,13	-3,26	-1,51	0,87	4,26	7,73	8,78	9,05	11,10	10,16	10,65	16,36
	X7	-15,70	-10,26	-4,59	-3,23	-3,36	-1,59	0,82	4,25	7,75	8,82	9,09	11,16	10,19	10,68	16,47
	X8	-15,91	-10,41	-4,71	-3,32	-3,47	-1,66	0,77	4,24	7,78	8,86	9,13	11,22	10,22	10,71	16,59
	X9	-16,12	-10,57	-4,83	-3,41	-3,57	-1,74	0,72	4,23	7,80	8,91	9,17	11,29	10,25	10,75	16,70
	X10	-16,33	-10,72	-4,96	-3,51	-3,67	-1,82	0,66	4,22	7,82	8,95	9,20	11,35	10,28	10,78	16,81
	X11	-16,54	-10,88	-5,08	-3,60	-3,78	-1,89	0,61	4,21	7,85	8,99	9,24	11,42	10,32	10,81	16,92
	X12	-16,75	-11,03	-5,20	-3,70	-3,88	-1,97	0,56	4,20	7,87	9,03	9,28	11,48	10,35	10,84	17,04
	X13	-16,96	-11,18	-5,33	-3,79	-3,99	-2,05	0,51	4,19	7,89	9,07	9,32	11,55	10,38	10,88	17,15
	X14	-17,17	-11,34	-5,45	-3,88	-4,09	-2,12	0,46	4,18	7,91	9,11	9,36	11,61	10,41	10,91	17,26
	X15	-17,38	-11,49	-5,58	-3,98	-4,20	-2,20	0,40	4,17	7,94	9,15	9,40	11,68	10,45	10,94	17,38
	X16	-17,59	-11,65	-5,70	-4,07	-4,30	-2,28	0,35	4,16	7,96	9,20	9,44	11,74	10,48	10,97	17,49
	X17	-17,80	-11,80	-5,82	-4,16	-4,41	-2,36	0,30	4,15	7,98	9,24	9,48	11,80	10,51	11,00	17,60
	X18	-18,01	-11,96	-5,95	-4,26	-4,51	-2,43	0,25	4,14	8,01	9,28	9,52	11,87	10,54	11,04	17,71
	X19	-18,22	-12,11	-6,07	-4,35	-4,62	-2,51	0,20	4,13	8,03	9,32	9,56	11,93	10,57	11,07	17,83
	X20	-18,43	-12,26	-6,20	-4,45	-4,72	-2,59	0,14	4,12	8,05	9,36	9,60	12,00	10,61	11,10	17,94
	X21	-18,64	-12,42	-6,32	-4,54	-4,82	-2,66	0,09	4,11	8,07	9,40	9,64	12,06	10,64	11,13	18,05
	X22	-18,85	-12,57	-6,44	-4,63	-4,93	-2,74	0,04	4,10	8,10	9,44	9,67	12,13	10,67	11,17	18,16
	X23	-19,06	-12,73	-6,57	-4,73	-5,03	-2,82	-0,01	4,09	8,12	9,49	9,71	12,19	10,70	11,20	18,28
	X24	-19,27	-12,88	-6,69	-4,82	-5,14	-2,89	-0,06	4,08	8,14	9,53	9,75	12,26	10,73	11,23	18,39
	X25	-19,48	-13,04	-6,81	-4,91	-5,24	-2,97	-0,12	4,07	8,17	9,57	9,79	12,32	10,77	11,26	18,50
	X26	-19,69	-13,19	-6,94	-5,01	-5,35	-3,05	-0,17	4,06	8,19	9,61	9,83	12,38	10,80	11,29	18,62
	X27	-19,90	-13,35	-7,06	-5,10	-5,45	-3,12	-0,22	4,05	8,21	9,65	9,87	12,45	10,83	11,33	18,73
	X28	-20,11	-13,50	-7,19	-5,20	-5,56	-3,20	-0,27	4,04	8,23	9,69	9,91	12,51	10,86	11,36	18,84
	X29	-20,32	-13,65	-7,31	-5,29	-5,66	-3,28	-0,32	4,03	8,26	9,74	9,95	12,58	10,90	11,39	18,95
	X30	-20,53	-13,81	-7,43	-5,38	-5,76	-3,35	-0,38	4,02	8,28	9,78	9,99	12,64	10,93	11,42	19,07
	X31	-20,74	-13,96	-7,56	-5,48	-5,87	-3,43	-0,43	4,01	8,30	9,82	10,03	12,71	10,96	11,45	19,18
	X32	-20,95	-14,12	-7,68	-5,57	-5,97	-3,51	-0,48	4,00	8,33	9,86	10,07	12,77	10,99	11,49	19,29
	X33	-21,16	-14,27	-7,81	-5,66	-6,08	-3,58	-0,53	3,99	8,35	9,90	10,10	12,84	11,02	11,52	19,40
	X34	-21,37	-14,43	-7,93	-5,76	-6,18	-3,66	-0,59	3,98	8,37	9,94	10,14	12,90	11,06	11,55	19,52
	X35	-21,58	-14,58	-8,05	-5,85	-6,29	-3,74	-0,64	3,97	8,39	9,98	10,18	12,96	11,09	11,58	19,63
	X36	-21,79	-14,73	-8,18	-5,95	-6,39	-3,82	-0,69	3,96	8,42	10,03	10,22	13,03	11,12	11,62	19,74
	X37	-22,00	-14,89	-8,30	-6,04	-6,50	-3,89	-0,74	3,94	8,44	10,07	10,26	13,09	11,15	11,65	19,86
	X38	-22,22	-15,04	-8,42	-6,13	-6,60	-3,97	-0,79	3,93	8,46	10,11	10,30	13,16	11,18	11,68	19,97
	X39	-22,43	-15,20	-8,55	-6,23	-6,71	-4,05	-0,85	3,92	8,49	10,15	10,34	13,22	11,22	11,71	20,08
	X40	-22,64	-15,35	-8,67	-6,32	-6,81	-4,12	-0,90	3,91	8,51	10,19	10,38	13,29	11,25	11,74	20,19
		Набір варіацій змінної x														
	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Варіант для ІА-Х5	X1	-22,85	-15,51	-8,80	-6,41	-6,91	-4,20	-0,95	3,90	8,53	10,23	10,42	13,35	11,28	11,78	20,31
	X2	-23,06	-15,66	-8,92	-6,51	-7,02	-4,28	-1,00	3,89	8,55	10,27	10,46	13,42	11,31	11,81	20,42
	X3	-23,27	-15,81	-9,04	-6,60	-7,12	-4,35	-1,05	3,88	8,58	10,32	10,50	13,48	11,35	11,84	20,53

X4	-23,48	-15,97	-9,17	-6,69	-7,23	-4,43	-1,11	3,87	8,60	10,36	10,53	13,54	11,38	11,87	20,64
X5	-23,69	-16,12	-9,29	-6,79	-7,33	-4,51	-1,16	3,86	8,62	10,40	10,57	13,61	11,41	11,91	20,76
X6	-23,90	-16,28	-9,42	-6,88	-7,44	-4,58	-1,21	3,85	8,65	10,44	10,61	13,67	11,44	11,94	20,87
X7	-24,11	-16,43	-9,54	-6,98	-7,54	-4,66	-1,26	3,84	8,67	10,48	10,65	13,74	11,47	11,97	20,98
X8	-24,32	-16,59	-9,66	-7,07	-7,65	-4,74	-1,31	3,83	8,69	10,52	10,69	13,80	11,51	12,00	21,10
X9	-24,53	-16,74	-9,79	-7,16	-7,75	-4,81	-1,37	3,82	8,71	10,56	10,73	13,87	11,54	12,03	21,21
X10	-24,74	-16,89	-9,91	-7,26	-7,86	-4,89	-1,42	3,81	8,74	10,61	10,77	13,93	11,57	12,07	21,32
X11	-24,95	-17,05	-10,03	-7,35	-7,96	-4,97	-1,47	3,80	8,76	10,65	10,81	14,00	11,60	12,10	21,43
X12	-25,16	-17,20	-10,16	-7,44	-8,06	-5,05	-1,52	3,79	8,78	10,69	10,85	14,06	11,63	12,13	21,55
X13	-25,37	-17,36	-10,28	-7,54	-8,17	-5,12	-1,57	3,78	8,81	10,73	10,89	14,12	11,67	12,16	21,66
X14	-25,58	-17,51	-10,41	-7,63	-8,27	-5,20	-1,63	3,77	8,83	10,77	10,93	14,19	11,70	12,20	21,77
X15	-25,79	-17,67	-10,53	-7,73	-8,38	-5,28	-1,68	3,76	8,85	10,81	10,97	14,25	11,73	12,23	21,89
X16	-26,00	-17,82	-10,65	-7,82	-8,48	-5,35	-1,73	3,75	8,87	10,86	11,00	14,32	11,76	12,26	22,00
X17	-26,21	-17,98	-10,78	-7,91	-8,59	-5,43	-1,78	3,74	8,90	10,90	11,04	14,38	11,80	12,29	22,11
X18	-26,42	-18,13	-10,90	-8,01	-8,69	-5,51	-1,84	3,73	8,92	10,94	11,08	14,45	11,83	12,32	22,22
X19	-26,63	-18,28	-11,03	-8,10	-8,80	-5,58	-1,89	3,72	8,94	10,98	11,12	14,51	11,86	12,36	22,34
X20	-26,84	-18,44	-11,15	-8,19	-8,90	-5,66	-1,94	3,71	8,97	11,02	11,16	14,58	11,89	12,39	22,45
X21	-27,05	-18,59	-11,27	-8,29	-9,00	-5,74	-1,99	3,70	8,99	11,06	11,20	14,64	11,92	12,42	22,56
X22	-27,26	-18,75	-11,40	-8,38	-9,11	-5,81	-2,04	3,69	9,01	11,10	11,24	14,70	11,96	12,45	22,67
X23	-27,47	-18,90	-11,52	-8,48	-9,21	-5,89	-2,10	3,68	9,03	11,15	11,28	14,77	11,99	12,49	22,79
X24	-27,68	-19,06	-11,64	-8,57	-9,32	-5,97	-2,15	3,67	9,06	11,19	11,32	14,83	12,02	12,52	22,90
X25	-27,89	-19,21	-11,77	-8,66	-9,42	-6,04	-2,20	3,66	9,08	11,23	11,36	14,90	12,05	12,55	23,01
X26	-28,10	-19,36	-11,89	-8,76	-9,53	-6,12	-2,25	3,65	9,10	11,27	11,40	14,96	12,08	12,58	23,13
X27	-28,31	-19,52	-12,02	-8,85	-9,63	-6,20	-2,30	3,64	9,13	11,31	11,43	15,03	12,12	12,61	23,24
X28	-28,52	-19,67	-12,14	-8,94	-9,74	-6,28	-2,36	3,63	9,15	11,35	11,47	15,09	12,15	12,65	23,35
X29	-28,73	-19,83	-12,26	-9,04	-9,84	-6,35	-2,41	3,62	9,17	11,39	11,51	15,16	12,18	12,68	23,46
X30	-28,94	-19,98	-12,39	-9,13	-9,95	-6,43	-2,46	3,61	9,19	11,44	11,55	15,22	12,21	12,71	23,58
X31	-29,15	-20,14	-12,51	-9,23	-10,05	-6,51	-2,51	3,60	9,22	11,48	11,59	15,28	12,25	12,74	23,69
X32	-29,36	-20,29	-12,64	-9,32	-10,15	-6,58	-2,56	3,59	9,24	11,52	11,63	15,35	12,28	12,77	23,80
X33	-29,57	-20,44	-12,76	-9,41	-10,26	-6,66	-2,62	3,58	9,26	11,56	11,67	15,41	12,31	12,81	23,91
X34	-29,78	-20,60	-12,88	-9,51	-10,36	-6,74	-2,67	3,57	9,29	11,60	11,71	15,48	12,34	12,84	24,03
X35	-29,99	-20,75	-13,01	-9,60	-10,47	-6,81	-2,72	3,56	9,31	11,64	11,75	15,54	12,37	12,87	24,14
X36	-30,20	-20,91	-13,13	-9,69	-10,57	-6,89	-2,77	3,55	9,33	11,68	11,79	15,61	12,41	12,90	24,25
X37	-30,41	-21,06	-13,25	-9,79	-10,68	-6,97	-2,82	3,54	9,35	11,73	11,83	15,67	12,44	12,94	24,37
X38	-30,62	-21,22	-13,38	-9,88	-10,78	-7,04	-2,88	3,53	9,38	11,77	11,87	15,74	12,47	12,97	24,48
X39	-30,83	-21,37	-13,50	-9,98	-10,89	-7,12	-2,93	3,52	9,40	11,81	11,90	15,80	12,50	13,00	24,59
X40	-31,04	-21,53	-13,63	-10,07	-10,99	-7,20	-2,98	3,51	9,42	11,85	11,94	15,86	12,53	13,03	24,70

		Набір варіацій змінної у														
	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Варіант для ІА-Х1	Y1	8,11	8,98	10,39	11,33	12,45	13,65	14,57	15,81	17,04	18,24	19,05	20,19	21,49	22,64	23,77
	Y2	12,20	13,35	13,94	14,86	15,81	17,06	18,00	19,49	20,92	21,82	22,98	23,88	25,29	26,58	28,02
	Y3	18,16	19,88	20,60	21,13	21,95	23,76	24,46	25,76	27,37	28,40	28,60	30	31,30	32,47	34,50
	Y4	13,56	13,78	15,48	16,62	17,76	18,38	19,94	20,84	21,92	23,81	23,61	25,75	26,24	27,59	28,46
	Y5	17,04	17,27	18,41	20,08	20,74	22,18	23,25	23,86	24,92	27,04	27,07	28,74	29,68	30,76	32,50
	Y6	18,61	19,75	21,53	21,68	22,98	24,58	25,14	26,39	27,89	28,59	29,24	31,38	31,77	33,00	34,07
	Y7	11,45	11,85	13,45	14,38	14,87	16,95	17,74	19,13	20,15	20,52	21,83	23,06	23,91	25,98	27,12
	Y8	14,00	15,55	16,98	17,99	18,66	19,77	20,68	21,88	23,05	24,38	24,81	26,66	27,76	28,64	30,44
	Y9	22,02	22,99	23,87	25,30	26,06	27,37	28,95	29,95	30,64	31,77	32,73	34,16	34,96	36,47	37,70
	Y10	16,65	17,67	18,80	20,19	20,48	22,32	22,76	23,72	25,17	26,29	26,96	28,64	30,32	30,93	31,83
	Y11	25,40	26,76	27,24	29,09	31,62	30,91	31,51	33,42	33,95	35,30	36,14	37,82	38,82	40,24	41,41
	Y12	11,93	13,07	14,52	15,01	16,93	17,95	18,24	20,24	20,61	21,87	22,94	24,33	25,95	26,40	27,34
	Y13	9,16	10,15	11,74	12,81	14,07	15,43	16,47	17,87	19,25	20,62	21,53	22,82	24,29	25,58	26,86
	Y14	13,78	15,09	15,76	16,79	17,87	19,28	20,34	22,02	23,64	24,65	25,97	26,98	28,58	30,03	31,67
	Y15	20,52	22,46	23,27	23,88	24,81	26,84	27,64	29,11	30,93	32,10	32,32	34	35,37	36,69	38,98
	Y16	15,33	15,57	17,49	18,78	20,07	20,77	22,53	23,55	24,77	26,91	26,68	29,10	29,65	31,17	32,16
	Y17	19,25	19,52	20,81	22,69	23,44	25,06	26,27	26,96	28,16	30,55	30,59	32,48	33,54	34,75	36,73
	Y18	21,03	22,31	24,32	24,50	25,97	27,78	28,41	29,82	31,51	32,31	33,04	35,46	35,91	37,28	38,50
	Y19	12,93	13,39	15,20	16,25	16,81	19,15	20,05	21,62	22,77	23,19	24,67	26,06	27,02	29,36	30,64
	Y20	15,82	17,57	19,19	20,33	21,08	22,34	23,36	24,73	26,05	27,55	28,03	30,12	31,37	32,36	34,40
	Y21	24,88	25,98	26,97	28,59	29,45	30,93	32,72	33,84	34,63	35,91	36,98	38,60	39,50	41,21	42,60
	Y22	18,82	19,97	21,25	22,82	23,15	25,22	25,72	26,81	28,44	29,70	30,46	32,36	34,26	34,96	35,97
	Y23	28,70	30,24	30,78	32,87	35,73	34,93	35,60	37,77	38,36	39,89	40,84	42,74	43,87	45,47	46,79
	Y24	13,48	14,77	16,40	16,96	19,14	20,29	20,62	22,87	23,29	24,72	25,92	27,49	29,32	29,83	30,89
	Y25	10,35	11,47	13,27	14,47	15,90	17,43	18,61	20,19	21,75	23,30	24,33	25,79	27,44	28,90	30,35
	Y26	15,57	17,05	17,81	18,98	20,19	21,78	22,98	24,88	26,71	27,86	29,35	30,49	32,29	33,94	35,78
	Y27	23,18	25,38	26,30	26,99	28,03	30,33	31,23	32,89	34,95	36,27	36,53	38	39,97	41,46	44,05
	Y28	17,32	17,59	19,76	21,22	22,68	23,47	25,46	26,61	27,99	30,40	30,15	32,88	33,51	35,22	36,34
	Y29	21,75	22,05	23,51	25,64	26,49	28,32	29,69	30,46	31,82	34,52	34,57	36,70	37,90	39,27	41,50
	Y30	23,77	25,21	27,49	27,69	29,35	31,39	32,11	33,69	35,61	36,51	37,34	40,07	40,57	42,13	43,50
	Y31	14,62	15,13	17,18	18,36	18,99	21,64	22,65	24,43	25,73	26,20	27,87	29,45	30,53	33,18	34,62
	Y32	17,88	19,85	21,68	22,97	23,83	25,24	26,40	27,94	29,43	31,13	31,68	34,04	35,45	36,57	38,87
	Y33	28,12	29,36	30,48	32,31	33,28	34,95	36,97	38,24	39,13	40,57	41,79	43,62	44,63	46,56	48,14
	Y34	21,27	22,57	24,01	25,79	26,16	28,50	29,06	30,29	32,13	33,57	34,42	36,57	38,71	39,50	40,64
	Y35	32,44	34,17	34,78	37,14	40,37	39,47	40,23	42,68	43,35	45,08	46,15	48,30	49,57	51,38	52,87
	Y36	15,23	16,69	18,53	19,16	21,62	22,92	23,30	25,84	26,31	27,93	29,29	31,06	33,14	33,71	34,91
	Y37	11,70	12,96	15,00	16,35	17,97	19,70	21,02	22,82	24,58	26,33	27,49	29,14	31,01	32,66	34,29
	Y38	17,60	19,26	20,12	21,44	22,82	24,61	25,97	28,12	30,19	31,48	33,16	34,45	36,49	38,35	40,43
	Y39	26,20	28,68	29,72	30,49	31,67	34,28	35,29	37,17	39,50	40,98	41,27	438	45,17	46,85	49,77

	Y40	19,57	19,88	22,33	23,98	25,63	26,52	28,77	30,07	31,63	34,36	34,07	37,15	37,86	39,80	41,06
		Набір варіацій змінної у														
	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Варіант для IA-X2	Y1	24,58	24,92	26,57	28,98	29,93	32,00	33,55	34,42	35,96	39,01	39,06	41,47	42,83	44,38	46,90
	Y2	26,86	28,49	31,06	31,29	33,16	35,47	36,28	38,07	40,24	41,26	42,19	45,28	45,85	47,61	49,16
	Y3	16,52	17,10	19,41	20,75	21,46	24,45	25,60	27,60	29,07	29,61	31,50	33,27	34,50	37,49	39,12
	Y4	20,20	22,43	24,50	25,95	26,92	28,52	29,83	31,58	33,26	35,18	35,80	38,46	40,06	41,32	43,92
	Y5	31,77	33,18	34,44	36,51	37,61	39,50	41,77	43,21	44,21	45,85	47,22	49,29	50,44	52,62	54,40
	Y6	24,03	25,50	27,13	29,14	29,56	32,21	32,84	34,23	36,31	37,93	38,90	41,32	43,75	44,64	45,93
	Y7	36,65	38,61	39,30	41,97	45,62	44,60	45,46	48,22	48,98	50,94	52,15	54,57	56,01	58,06	59,75
	Y8	17,21	18,86	20,94	21,65	24,43	25,91	26,33	29,20	29,74	31,56	33,10	35,10	37,44	38,09	39,45
	Y9	13,22	14,65	16,95	18,48	20,31	22,26	23,76	25,78	27,78	29,75	31,06	32,93	35,04	36,91	38,75
	Y10	19,89	21,77	22,74	24,23	25,78	27,81	29,35	31,77	34,11	35,57	37,47	38,93	41,23	43,33	45,69
	Y11	29,60	32,41	33,58	34,46	35,79	38,73	39,88	42,00	44,63	46,31	46,64	49	51,04	52,94	56,24
	Y12	22,11	22,46	25,24	27,10	28,96	29,97	32,51	33,98	35,74	38,82	38,49	41,98	42,79	44,98	46,40
	Y13	27,78	28,16	30,02	32,74	33,82	36,16	37,91	38,90	40,63	44,08	44,14	46,86	48,39	50,15	52,99
	Y14	30,35	32,19	35,10	35,35	37,47	40,08	41,00	43,02	45,47	46,62	47,68	51,17	51,81	53,80	55,55
	Y15	18,66	19,32	21,93	23,45	24,25	27,63	28,93	31,19	32,85	33,45	35,59	37,60	38,99	42,37	44,21
	Y16	22,83	25,35	27,68	29,33	30,42	32,23	33,71	35,68	37,58	39,75	40,45	43,46	45,27	46,69	49,63
	Y17	35,90	37,49	38,91	41,25	42,49	44,63	47,21	48,83	49,96	51,81	53,36	55,70	56,99	59,46	61,47
	Y18	27,15	28,82	30,66	32,93	33,40	36,39	37,11	38,68	41,03	42,86	43,95	46,69	49,43	50,44	51,90
	Y19	41,42	43,63	44,41	47,42	51,55	50,40	51,37	54,49	55,35	57,56	58,93	61,67	63,29	65,61	67,51
	Y20	19,45	21,31	23,67	24,47	27,61	29,27	29,75	33,00	33,60	35,66	37,40	39,66	42,31	43,04	44,58
	Y21	14,94	16,55	19,15	20,88	22,95	25,15	26,85	29,14	31,39	33,61	35,10	37,21	39,60	41,70	43,79
	Y22	22,47	24,60	25,69	27,38	29,14	31,43	33,16	35,91	38,55	40,20	42,34	43,99	46,59	48,97	51,63
	Y23	33,45	36,63	37,95	38,94	40,45	43,77	45,07	47,46	50,43	52,33	52,70	56	57,68	59,82	63,56
	Y24	24,99	25,38	28,52	30,62	32,73	33,86	36,73	38,40	40,38	43,87	43,50	47,44	48,35	50,82	52,43
	Y25	31,39	31,82	33,92	37,00	38,22	40,86	42,84	43,95	45,91	49,81	49,88	52,95	54,68	56,66	59,88
	Y26	34,30	36,38	39,66	39,95	42,34	45,29	46,33	48,62	51,38	52,68	53,88	57,82	58,54	60,79	62,77
	Y27	21,09	21,83	24,78	26,50	27,40	31,22	32,69	35,25	37,12	37,80	40,22	42,49	44,06	47,87	49,96
	Y28	25,79	28,64	31,28	33,14	34,38	36,42	38,09	40,32	42,47	44,92	45,71	49,11	51,15	52,76	56,09
	Y29	40,57	42,36	43,97	46,62	48,02	50,43	53,34	55,18	56,46	58,54	60,30	62,94	64,40	67,19	69,46
	Y30	30,68	32,56	34,65	37,21	37,74	41,13	41,93	43,71	46,37	48,43	49,67	52,76	55,86	56,99	58,65
	Y31	46,80	49,30	50,18	53,59	58,25	56,95	58,05	61,58	62,55	65,04	66,59	69,69	71,52	74,14	76,29
	Y32	21,98	24,08	26,74	27,65	31,20	33,08	33,61	37,29	37,97	40,30	42,26	44,82	47,81	48,64	50,37
	Y33	16,88	18,70	21,64	23,60	25,93	28,42	30,34	32,92	35,47	37,98	39,66	42,04	44,75	47,13	49,48
	Y34	25,39	27,79	29,03	30,94	32,92	35,51	37,47	40,57	43,56	45,42	47,85	49,71	52,65	55,33	58,34
	Y35	37,80	41,39	42,88	44,00	45,70	49,46	50,93	53,63	56,99	59,13	59,55	63	65,17	67,60	71,82
	Y36	28,24	28,68	32,23	34,60	36,98	38,26	41,51	43,39	45,63	49,57	49,15	53,61	54,63	57,43	59,25
	Y37	35,47	35,96	38,33	41,81	43,18	46,17	48,41	49,67	51,88	56,29	56,36	59,83	61,79	64,03	67,67
	Y38	38,75	41,11	44,82	45,14	47,85	51,18	52,35	54,94	58,06	59,53	60,88	65,34	66,15	68,69	70,93
	Y39	23,83	24,67	28,00	29,94	30,97	35,28	36,94	39,83	41,95	42,72	45,45	48,01	49,78	54,10	56,45
	Y40	29,15	32,37	35,35	37,45	38,85	41,16	43,04	45,56	47,99	50,76	51,65	55,50	57,80	59,62	63,38
		Набір варіацій змінної у														

	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Варіант для ІА-ХЗ	Y1	45,84	47,87	49,69	52,68	54,26	56,99	60,28	62,35	63,80	66,15	68,13	71,12	72,78	75,92	78,49
	Y2	34,67	36,80	39,15	42,04	42,65	46,47	47,38	49,39	52,40	54,73	56,13	59,62	63,12	64,40	66,27
	Y3	52,88	55,71	56,71	60,56	65,83	64,36	65,59	69,58	70,68	73,50	75,25	78,74	80,82	83,78	86,21
	Y4	24,83	27,21	30,22	31,25	35,26	37,38	37,98	42,14	42,90	45,54	47,75	50,65	54,03	54,96	56,92
	Y5	19,08	21,13	24,45	26,67	29,30	32,12	34,28	37,21	40,08	42,92	44,82	47,51	50,56	53,25	55,91
	Y6	28,69	31,41	32,80	34,97	37,21	40,13	42,34	45,85	49,22	51,33	54,07	56,18	59,50	62,53	65,93
	Y7	42,71	46,77	48,46	49,72	51,64	55,89	57,55	60,60	64,40	66,82	67,30	715	73,65	76,39	81,16
	Y8	31,91	32,41	36,41	39,10	41,79	43,24	46,90	49,04	51,57	56,02	55,54	60,58	61,74	64,90	66,95
	Y9	40,08	40,63	43,32	47,24	48,80	52,17	54,70	56,12	58,63	63,61	63,69	67,61	69,83	72,35	76,47
	Y10	43,79	46,45	50,64	51,01	54,07	57,84	59,15	62,08	65,61	67,27	68,80	73,83	74,75	77,62	80,15
	Y11	26,93	27,88	31,65	33,83	34,99	39,87	41,74	45,00	47,40	48,27	51,35	54,25	56,26	61,13	63,79
	Y12	32,94	36,57	39,95	42,32	43,90	46,51	48,64	51,49	54,23	57,36	58,36	62,71	65,32	67,37	71,62
	Y13	51,80	54,09	56,15	59,52	61,31	64,40	68,11	70,46	72,09	74,75	76,99	80,37	82,24	85,79	88,69
	Y14	39,18	41,58	44,24	47,51	48,19	52,51	53,54	55,81	59,21	61,84	63,42	67,37	71,33	72,78	74,88
	Y15	59,76	62,95	64,08	68,43	74,38	72,72	74,12	78,63	79,86	83,05	85,03	88,98	91,33	94,67	97,41
	Y16	28,06	30,75	34,15	35,31	39,84	42,24	42,92	47,61	48,48	51,46	53,96	57,23	61,05	62,11	64,32
	Y17	21,56	23,88	27,63	30,13	33,11	36,30	38,74	42,04	45,29	48,50	50,65	53,68	57,14	60,17	63,18
	Y18	32,42	35,49	37,07	39,51	42,04	45,35	47,85	51,81	55,62	58,00	61,10	63,48	67,23	70,66	74,50
	Y19	48,26	52,85	54,76	56,18	58,36	63,15	65,03	68,48	72,77	75,51	76,04	808	83,22	86,32	91,71
	Y20	36,06	36,62	41,15	44,19	47,22	48,86	53,00	55,41	58,27	63,30	62,76	68,45	69,76	73,33	75,66
	Y21	45,29	45,91	48,95	53,39	55,14	58,95	61,81	63,42	66,25	71,88	71,97	76,40	78,90	81,76	86,41
	Y22	49,49	52,49	57,23	57,64	61,10	65,36	66,84	70,15	74,14	76,01	77,74	83,43	84,47	87,72	90,57
	Y23	30,43	31,50	35,76	38,23	39,54	45,05	47,16	50,85	53,56	54,55	58,03	61,31	63,57	69,08	72,08
	Y24	37,22	41,33	45,14	47,82	49,60	52,55	54,96	58,18	61,28	64,82	65,95	70,86	73,81	76,13	80,93
	Y25	58,54	61,13	63,45	67,26	69,29	72,77	76,97	79,62	81,46	84,47	87,00	90,81	92,93	96,95	100,22
	Y26	44,27	46,98	49,99	53,68	54,46	59,34	60,50	63,06	66,90	69,88	71,67	76,13	80,60	82,24	84,62
	Y27	67,53	71,13	72,41	77,32	84,05	82,18	83,76	88,85	90,25	93,85	96,08	100,55	103,20	106,98	110,08
	Y28	31,71	34,75	38,59	39,90	45,02	47,73	48,50	53,80	54,79	58,15	60,98	64,67	68,99	70,18	72,68
	Y29	24,36	26,98	31,22	34,05	37,41	41,01	43,77	47,51	51,17	54,81	57,23	60,66	64,57	68,00	71,40
	Y30	36,64	40,11	41,89	44,65	47,51	51,24	54,07	58,54	62,85	65,54	69,04	71,73	75,97	79,84	84,18
	Y31	54,54	59,72	61,87	63,49	65,94	71,36	73,48	77,38	82,23	85,32	85,93	913	94,04	97,54	103,63
	Y32	40,74	41,38	46,50	49,93	53,36	55,21	59,89	62,61	65,84	71,53	70,92	77,35	78,83	82,87	85,49
	Y33	51,17	51,88	55,31	60,33	62,31	66,62	69,85	71,66	74,86	81,22	81,32	86,33	89,16	92,39	97,64
	Y34	55,92	59,32	64,67	65,14	69,04	73,85	75,53	79,27	83,78	85,90	87,85	94,27	95,45	99,12	102,35
	Y35	34,39	35,60	40,41	43,20	44,68	50,91	53,29	57,47	60,53	61,64	65,57	69,28	71,83	78,06	81,46
	Y36	42,06	46,70	51,01	54,03	56,05	59,38	62,11	65,74	69,24	73,25	74,52	80,08	83,41	86,03	91,45
	Y37	66,15	69,07	71,70	76,00	78,29	82,23	86,97	89,97	92,05	95,45	98,31	102,62	105,01	109,55	113,25
	Y38	50,03	53,09	56,49	60,66	61,54	67,06	68,37	71,26	75,60	78,97	80,98	86,03	91,08	92,93	95,62
	Y39	76,31	80,38	81,83	87,38	94,98	92,86	94,64	100,40	101,98	106,05	108,57	113,62	116,61	120,89	124,39
	Y40	35,83	39,26	43,60	45,08	50,87	53,93	54,81	60,80	61,91	65,71	68,91	73,08	77,96	79,30	82,13
		Набір варіацій змінної у														
	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Варіант	Y1	27,53	30,49	35,28	38,48	42,28	46,35	49,46	53,68	57,83	61,93	64,67	68,55	72,96	76,84	80,68

для ІА-Х4	Y2	41,40	45,32	47,33	50,45	53,68	57,90	61,10	66,15	71,02	74,06	78,02	81,06	85,85	90,22	95,12
	Y3	61,63	67,48	69,92	71,74	74,52	80,64	83,03	87,44	92,92	96,42	97,10	103	106,26	110,22	117,10
	Y4	46,04	46,76	52,54	56,42	60,30	62,39	67,67	70,75	74,40	80,83	80,14	87,41	89,08	93,64	96,61
	Y5	57,83	58,63	62,50	68,17	70,41	75,28	78,93	80,98	84,59	91,78	91,89	97,56	100,75	104,40	110,33
	Y6	63,19	67,03	73,07	73,61	78,02	83,45	85,35	89,57	94,67	97,06	99,27	106,53	107,86	112,00	115,65
	Y7	38,86	40,22	45,66	48,82	50,49	57,52	60,22	64,94	68,40	69,65	74,10	78,28	81,17	88,20	92,04
	Y8	47,52	52,77	57,64	61,06	63,34	67,10	70,18	74,29	78,24	82,77	84,21	90,49	94,25	97,21	103,34
	Y9	74,75	78,05	81,02	85,89	88,47	92,92	98,28	101,66	104,02	107,86	111,09	115,96	118,66	123,79	127,97
	Y10	56,53	59,99	63,83	68,55	69,54	75,77	77,25	80,52	85,43	89,23	91,51	97,21	102,92	105,01	108,05
	Y11	86,23	90,83	92,46	98,74	107,33	104,93	106,95	113,45	115,24	119,84	122,69	128,39	131,77	136,60	140,56
	Y12	40,49	44,37	49,27	50,95	57,48	60,94	61,93	68,70	69,96	74,25	77,86	82,58	88,09	89,61	92,80
	Y13	31,10	34,46	39,87	43,48	47,77	52,37	55,89	60,66	65,34	69,98	73,08	77,46	82,44	86,83	91,16
	Y14	46,79	51,21	53,49	57,01	60,66	65,43	69,04	74,75	80,25	83,69	88,16	91,59	97,01	101,95	107,49
	Y15	69,64	76,26	79,01	81,07	84,20	91,12	93,83	98,81	105,00	108,95	109,72	116	120,08	124,55	132,32
	Y16	52,03	52,84	59,37	63,76	68,14	70,50	76,47	79,95	84,08	91,34	90,56	98,77	100,66	105,81	109,17
	Y17	65,34	66,25	70,63	77,03	79,56	85,06	89,19	91,51	95,59	103,71	103,84	110,24	113,85	117,97	124,67
	Y18	71,40	75,74	82,57	83,17	88,16	94,30	96,45	101,22	106,97	109,68	112,17	120,38	121,88	126,57	130,69
	Y19	43,91	45,45	51,60	55,16	57,05	65,00	68,05	73,38	77,29	78,71	83,73	88,46	91,72	99,67	104,01
	Y20	53,70	59,63	65,13	69,00	71,57	75,83	79,31	83,95	88,42	93,53	95,16	102,25	106,50	109,85	116,77
	Y21	84,46	88,20	91,55	97,05	99,97	105,00	111,06	114,88	117,54	121,88	125,53	131,03	134,08	139,88	144,61
	Y22	63,88	67,79	72,13	77,46	78,58	85,62	87,30	90,99	96,53	100,83	103,41	109,85	116,30	118,66	122,10
	Y23	97,44	102,64	104,48	111,57	121,28	118,57	120,85	128,20	130,22	135,42	138,64	145,08	148,91	154,36	158,83
	Y24	45,75	50,14	55,68	57,57	64,96	68,87	69,98	77,63	79,05	83,90	87,99	93,31	99,54	101,26	104,87
	Y25	35,15	38,93	45,05	49,13	53,98	59,18	63,16	68,55	73,84	79,08	82,58	87,53	93,16	98,11	103,02
	Y26	52,87	57,87	60,44	64,42	68,55	73,94	78,01	84,47	90,69	94,57	99,62	103,50	109,62	115,20	121,46
	Y27	78,69	86,17	89,28	91,61	95,15	102,97	106,03	111,66	118,65	123,11	123,99	131	135,69	140,74	149,52
	Y28	58,79	59,71	67,09	72,04	77,00	79,67	86,41	90,35	95,01	103,21	102,34	111,61	113,74	119,57	123,36
	Y29	73,84	74,86	79,81	87,04	89,91	96,12	100,78	103,40	108,02	117,19	117,34	124,57	128,65	133,31	140,88
	Y30	80,68	85,59	93,31	93,99	99,62	106,56	108,99	114,38	120,88	123,94	126,76	136,03	137,73	143,02	147,68
	Y31	49,61	51,36	58,30	62,33	64,47	73,45	76,90	82,92	87,34	88,94	94,62	99,96	103,65	112,63	117,53
	Y32	60,68	67,38	73,60	77,97	80,88	85,68	89,62	94,86	99,91	105,69	107,53	115,54	120,35	124,13	131,95
	Y33	95,44	99,67	103,45	109,67	112,97	118,65	125,49	129,81	132,82	137,73	141,85	148,07	151,51	158,07	163,41
	Y34	72,19	76,61	81,51	87,53	88,79	96,75	98,65	102,82	109,08	113,94	116,85	124,13	131,42	134,09	137,97
	Y35	110,10	115,98	118,07	126,08	137,05	133,99	136,56	144,86	147,14	153,02	156,66	163,94	168,26	174,43	179,48
	Y36	51,70	56,65	62,92	65,05	73,40	77,82	79,08	87,72	89,33	94,81	99,42	105,44	112,48	114,42	118,50
	Y37	39,72	44,00	50,91	55,52	61,00	66,87	71,37	77,46	83,44	89,36	93,31	98,91	105,27	110,87	116,41
	Y38	59,74	65,39	68,30	72,80	77,46	83,55	88,16	95,45	102,47	106,86	112,57	116,96	123,87	130,18	137,25
	Y39	88,92	97,37	100,88	103,52	107,52	116,35	119,81	126,17	134,07	139,12	140,11	148	153,33	159,03	168,96
	Y40	66,43	67,48	75,81	81,41	87,00	90,02	97,65	102,09	107,36	116,63	115,64	126,12	128,53	135,11	139,39
		Набір варіацій змінної у														
	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Варіант для ІА-Х5	Y1	83,44	84,59	90,19	98,36	101,60	108,62	113,88	116,85	122,06	132,43	132,59	140,76	145,37	150,64	159,20
	Y2	91,17	96,71	105,44	106,20	112,57	120,41	123,16	129,24	136,60	140,05	143,23	153,71	155,63	161,61	166,88
	Y3	56,06	58,04	65,88	70,44	72,85	83,00	86,89	93,70	98,69	100,50	106,92	112,95	117,12	127,27	132,81

	Y4	68,57	76,14	83,16	88,10	91,39	96,82	101,27	107,19	112,90	119,43	121,51	130,56	135,99	140,27	149,10
	Y5	107,85	112,62	116,90	123,92	127,65	134,07	141,81	146,69	150,09	155,63	160,29	167,32	171,21	178,62	184,65
	Y6	81,57	86,57	92,11	98,91	100,33	109,33	111,47	116,19	123,27	128,75	132,04	140,27	148,50	151,52	155,91
	Y7	124,42	131,06	133,41	142,47	154,86	151,41	154,31	163,70	166,27	172,91	177,03	185,25	190,14	197,10	202,81
	Y8	58,42	64,02	71,10	73,51	82,94	87,94	89,36	99,13	100,94	107,14	112,35	119,15	127,11	129,30	133,91
	Y9	44,88	49,72	57,53	62,73	68,93	75,56	80,65	87,53	94,29	100,98	105,44	111,77	118,96	125,28	131,54
	Y10	67,51	73,89	77,18	82,26	87,53	94,41	99,62	107,86	115,80	120,76	127,20	132,16	139,97	147,10	155,10
	Y11	100,48	110,03	114,00	116,97	121,50	131,48	135,38	142,58	151,50	157,20	158,32	168	173,26	179,71	190,93
	Y12	75,07	76,25	85,67	91,99	98,31	101,72	110,34	115,36	121,31	131,79	130,67	142,51	145,24	152,68	157,51
	Y13	94,29	95,59	101,91	111,15	114,80	122,74	128,69	132,04	137,93	149,64	149,83	159,06	164,27	170,22	179,89
	Y14	103,03	109,29	119,14	120,01	127,20	136,07	139,17	146,05	154,35	158,26	161,85	173,69	175,86	182,62	188,57
	Y15	63,35	65,58	74,45	79,59	82,32	93,79	98,19	105,88	111,52	113,56	120,82	127,64	132,35	143,82	150,08
	Y16	77,49	86,04	93,98	99,55	103,27	109,41	114,43	121,13	127,57	134,95	137,31	147,53	153,67	158,51	168,49
	Y17	121,87	127,26	132,10	140,03	144,25	151,50	160,24	165,76	169,60	175,86	181,13	189,07	193,47	201,84	208,66
	Y18	92,18	97,82	104,08	111,77	113,38	123,54	125,96	131,29	139,29	145,49	149,21	158,51	167,80	171,21	176,17
	Y19	140,59	148,09	150,76	160,99	175,00	171,09	174,38	184,98	187,89	195,39	200,04	209,34	214,85	222,73	229,17
	Y20	66,02	72,34	80,34	83,07	93,73	99,37	100,98	112,01	114,06	121,06	126,95	134,64	143,63	146,11	151,32
	Y21	50,71	56,18	65,00	70,89	77,89	85,39	91,13	98,91	106,54	114,11	119,15	126,30	134,42	141,57	148,64
	Y22	76,28	83,50	87,21	92,95	98,91	106,68	112,57	121,88	130,85	136,45	143,74	149,34	158,17	166,22	175,26
	Y23	113,55	124,33	128,82	132,18	137,29	148,57	152,98	161,11	171,20	177,64	178,90	190	195,78	203,07	215,75
	Y24	84,83	86,16	96,81	103,95	111,10	114,95	124,69	130,36	137,08	148,92	147,66	161,04	164,12	172,53	177,99
	Y25	106,54	108,01	115,16	125,60	129,73	138,69	145,42	149,20	155,86	169,10	169,31	179,74	185,63	192,35	203,28
	Y26	116,42	123,49	134,63	135,61	143,74	153,75	157,26	165,03	174,42	178,83	182,89	196,27	198,73	206,36	213,09
	Y27	71,59	74,11	84,13	89,94	93,02	105,98	110,96	119,64	126,02	128,33	136,52	144,23	149,55	162,51	169,59
	Y28	87,56	97,23	106,19	112,50	116,70	123,63	129,31	136,87	144,16	152,49	155,16	166,71	173,65	179,11	190,39
	Y29	137,71	143,81	149,27	158,24	163,00	171,20	181,07	187,31	191,65	198,73	204,68	213,65	218,62	228,08	235,78
	Y30	104,16	110,54	117,61	126,30	128,12	139,61	142,34	148,36	157,40	164,40	168,61	179,11	189,62	193,47	199,08
	Y31	158,87	167,34	170,36	181,91	197,75	193,33	197,04	209,02	212,31	220,79	226,04	236,55	242,79	251,68	258,97
	Y32	74,60	81,75	90,78	93,86	105,91	112,29	114,11	126,58	128,89	136,80	143,46	152,14	162,30	165,10	170,99
	Y33	57,31	63,48	73,45	80,10	88,02	96,49	102,98	111,77	120,39	128,94	134,64	142,71	151,90	159,97	167,96
	Y34	86,20	94,35	98,55	105,04	111,77	120,55	127,20	137,73	147,86	154,19	162,42	168,76	178,73	187,83	198,04
	Y35	128,31	140,50	145,56	149,36	155,14	167,89	172,87	182,05	193,45	200,73	202,16	214	221,24	229,47	243,79
	Y36	95,86	97,36	109,39	117,46	125,54	129,89	140,89	147,31	154,90	168,28	166,86	181,98	185,46	194,96	201,13
	Y37	120,39	122,06	130,13	141,92	146,59	156,73	164,32	168,60	176,12	191,08	191,32	203,11	209,76	217,36	229,71
	Y38	131,55	139,55	152,13	153,24	162,42	173,74	177,70	186,49	197,09	202,08	206,67	221,79	224,56	233,19	240,79
	Y39	80,90	83,74	95,06	101,63	105,12	119,76	125,38	135,20	142,40	145,01	154,27	162,98	168,99	183,64	191,63
	Y40	98,94	109,87	120,00	127,12	131,87	139,71	146,12	154,67	162,90	172,32	175,33	188,39	196,22	202,40	215,14

Додаток Б – Таблиця варіантів передавальної функції згідно з шифром навчальної групи та номером студента за
списком навчальної групи

Варіант №	Завдання для ІА-Х1
1.	$W(s) = \frac{16}{s^2 + s + 1}$
2.	$W(s) = \frac{13}{0.7s^2 + s + 1}$
3.	$W(s) = \frac{18}{0.6s^2 + 0.5s + 1}$
4.	$W(s) = \frac{15}{0.8s^2 + 0.8s + 1}$
5.	$W(s) = \frac{0.1s + 15}{0.5s^2 + 0.3s + 1}$
6.	$W(s) = \frac{0.1s + 11}{0.5s^2 + 0.31s + 1}$
7.	$W(s) = \frac{0.2s + 8}{0.1s^2 + 0.25s + 1}$
8.	$W(s) = \frac{8}{0.5s^2 + 0.3s + 1}$
9.	$W(s) = \frac{12}{0.7s^2 + 0.45s + 1}$
10.	$W(s) = \frac{0.17s + 7}{0.4s^2 + 0.3s + 1}$
11.	$W(s) = \frac{0.2s + 5}{0.46s^2 + 0.6s + 1}$
12.	$W(s) = \frac{0.1s + 12}{0.8s^2 + 0.4s + 1}$
13.	$W(s) = \frac{0.1s + 13}{0.8s^2 + 0.4s + 1}$
14.	$W(s) = \frac{0.2s + 19}{s^2 + 0.2s + 1}$
15.	$W(s) = \frac{0.3s + 11}{0.5s^2 + 0.4s + 1}$
16.	$W(s) = \frac{0.22s + 15}{0.8s^2 + 0.6s + 1}$
17.	$W(s) = \frac{12}{0.28s^2 + 0.4s + 1}$
18.	$W(s) = \frac{10}{0.36s^2 + 0.8s + 1}$
19.	$W(s) = \frac{0.45s + 10}{2s^2 + 0.5s + 1}$
20.	$W(s) = \frac{12}{4s^2 + 0.6s + 1}$
21.	$W(s) = \frac{0.1s + 12}{0.58s^2 + 0.4s + 1}$
22.	$W(s) = \frac{0.4s + 18}{s^2 + 0.62s + 1}$
23.	$W(s) = \frac{18}{s^2 + 0.57s + 1}$
24.	$W(s) = \frac{12}{3s^2 + 0.8s + 1}$
25.	$W(s) = \frac{15}{0.3s^2 + 0.46s + 1}$
26.	$W(s) = \frac{0.43s + 15}{0.4s^2 + 0.8s + 1}$

27.	$W(s) = \frac{s + 26}{0.36s^2 + 0.6s + 1}$
28.	$W(s) = \frac{0.42s + 5}{0.6s^2 + 0.8s + 1}$
29.	$W(s) = \frac{0.96s + 11}{0.8s^2 + 0.4s + 1}$
30.	$W(s) = \frac{12}{6s^2 + 0.8s + 1}$
31.	$W(s) = \frac{25}{0.2s^2 + 0.6s + 1}$
32.	$W(s) = \frac{0.3s + 25}{0.4s^2 + 0.8s + 1}$
33.	$W(s) = \frac{s + 26}{0.6s^2 + 0.6s + 1}$
34.	$W(s) = \frac{0.2s + 4.5}{0.96s^2 + 0.8s + 1}$
35.	$W(s) = \frac{0.16s + 16}{0.8s^2 + 0.4s + 1}$

Варіант №	Завдання для ІА-Х2
1.	$W(s) = \frac{16}{s^2 + 2s + 1}$
2.	$W(s) = \frac{13}{0.7s^2 + s + 1}$
3.	$W(s) = \frac{18}{0.6s^2 + 0.25s + 1}$
4.	$W(s) = \frac{15}{0.8s^2 + 0.28s + 1}$
5.	$W(s) = \frac{0.1s + 15}{0.5s^2 + 0.23s + 1}$
6.	$W(s) = \frac{0.1s + 11}{0.25s^2 + 0.1s + 1}$
7.	$W(s) = \frac{0.2s + 8}{0.21s^2 + 0.5s + 1}$
8.	$W(s) = \frac{8}{0.25s^2 + 0.3s + 1}$
9.	$W(s) = \frac{12}{0.27s^2 + 0.4s + 1}$
10.	$W(s) = \frac{0.17s + 7}{0.24s^2 + 0.3s + 1}$
11.	$W(s) = \frac{0.22s + 5}{0.46s^2 + 0.6s + 1}$
12.	$W(s) = \frac{0.21s + 12}{0.8s^2 + 0.24s + 1}$
13.	$W(s) = \frac{0.1s + 13}{0.28s^2 + 0.4s + 1}$
14.	$W(s) = \frac{0.2s + 19}{2s^2 + 0.2s + 1}$
15.	$W(s) = \frac{0.23s + 11}{0.25s^2 + 0.4s + 1}$
16.	$W(s) = \frac{0.22s + 15}{0.28s^2 + 0.6s + 1}$
17.	$W(s) = \frac{72}{0.28s^2 + 0.4s + 1}$
18.	$W(s) = \frac{20}{0.36s^2 + 0.8s + 1}$
19.	$W(s) = \frac{0.45s + 12}{2s^2 + 0.5s + 1}$
20.	$W(s) = \frac{32}{4s^2 + 0.6s + 1}$
21.	$W(s) = \frac{0.1s + 12}{0.9s^2 + 0.34s + 1}$
22.	$W(s) = \frac{0.9s + 18}{s^2 + 0.62s + 1}$
23.	$W(s) = \frac{18}{7s^2 + 0.57s + 1}$
24.	$W(s) = \frac{12}{3s^2 + 0.28s + 1}$
25.	$W(s) = \frac{12}{0.3s^2 + 0.46s + 1}$
26.	$W(s) = \frac{0.43s + 15}{0.4s^2 + 0.8s + 1}$
27.	$W(s) = \frac{s + 7}{0.36s^2 + 0.6s + 1}$
28.	$W(s) = \frac{0.42s + 5}{0.6s^2 + 0.28s + 1}$
29.	$W(s) = \frac{0.96s + 11}{0.8s^2 + 0.42s + 1}$

30.	$W(s) = \frac{12}{6s^2 + 0.28s + 1}$
31.	$W(s) = \frac{25}{0.2s^2 + 0.6s + 1}$
32.	$W(s) = \frac{0.23s + 25}{0.24s^2 + 0.8s + 1}$
33.	$W(s) = \frac{s + 76}{0.6s^2 + 0.26s + 1}$
34.	$W(s) = \frac{0.2s + 64.5}{0.96s^2 + 0.8s + 1}$
35.	$W(s) = \frac{0.16s + 16}{0.28s^2 + 0.2s + 1}$

Варіант №	Завдання для ІА-ХЗ
1.	$W(s) = \frac{16}{s^2 + 3s + 1}$
2.	$W(s) = \frac{13}{0.7s^2 + 3s + 1}$
3.	$W(s) = \frac{18}{0.6s^2 + 0.35s + 1}$
4.	$W(s) = \frac{15}{0.8s^2 + 0.38s + 1}$
5.	$W(s) = \frac{0.1s + 15}{0.5s^2 + 0.33s + 1}$
6.	$W(s) = \frac{0.1s + 11}{0.35s^2 + 0.1s + 1}$
7.	$W(s) = \frac{0.3s + 8}{0.31s^2 + 0.5s + 1}$
8.	$W(s) = \frac{8}{0.8s^2 + 0.33s + 1}$
9.	$W(s) = \frac{12}{0.37s^2 + 0.4s + 1}$
10.	$W(s) = \frac{0.17s + 7}{0.34s^2 + 0.3s + 1}$
11.	$W(s) = \frac{0.32s + 5}{0.46s^2 + 0.3s + 1}$
12.	$W(s) = \frac{0.21s + 13}{0.8s^2 + 0.34s + 1}$
13.	$W(s) = \frac{0.1s + 13}{0.3s^2 + 0.34s + 1}$
14.	$W(s) = \frac{0.3s + 19}{3s^2 + 0.2s + 1}$
15.	$W(s) = \frac{0.23s + 13}{0.35s^2 + 0.4s + 1}$
16.	$W(s) = \frac{0.22s + 13}{0.38s^2 + 0.6s + 1}$
17.	$W(s) = \frac{32}{0.38s^2 + 0.4s + 1}$
18.	$W(s) = \frac{30}{0.33s^2 + 0.8s + 1}$
19.	$W(s) = \frac{0.45s + 13}{3s^2 + 0.5s + 1}$
20.	$W(s) = \frac{32}{3s^2 + 0.36s + 1}$
21.	$W(s) = \frac{0.31s + 13}{0.9s^2 + 0.34s + 1}$
22.	$W(s) = \frac{0.39s + 13}{s^2 + 0.63s + 1}$
23.	$W(s) = \frac{18}{7.3s^2 + 0.37s + 1}$
24.	$W(s) = \frac{12}{3s^2 + 0.38s + 1}$
25.	$W(s) = \frac{12}{0.3s^2 + 0.36s + 1}$
26.	$W(s) = \frac{0.33s + 13}{0.4s^2 + 0.3s + 1}$
27.	$W(s) = \frac{s + 8}{0.33s^2 + 0.6s + 1}$
28.	$W(s) = \frac{0.42s + 3}{0.6s^2 + 0.38s + 1}$
29.	$W(s) = \frac{0.96s + 31}{0.3s^2 + 0.42s + 1}$

30.	$W(s) = \frac{12}{3s^2 + 0.28s + 1}$
31.	$W(s) = \frac{35}{0.3s^2 + 0.6s + 1}$
32.	$W(s) = \frac{0.33s + 25}{0.34s^2 + 0.8s + 1}$
33.	$W(s) = \frac{s + 36}{0.6s^2 + 0.36s + 1}$
34.	$W(s) = \frac{0.2s + 34.5}{0.96s^2 + 0.8s + 1}$
35.	$W(s) = \frac{0.36s + 16}{0.38s^2 + 0.2s + 1}$

Варіант №	Завдання для ІА-Х4
1.	$W(s) = \frac{14}{s^2 + 4s + 1}$
2.	$W(s) = \frac{14}{0.4s^2 + 4s + 1}$
3.	$W(s) = \frac{18}{0.4s^2 + 0.25s + 1}$
4.	$W(s) = \frac{15}{0.8s^2 + 0.48s + 1}$
5.	$W(s) = \frac{0.1s + 15}{0.5s^2 + 0.43s + 1}$
6.	$W(s) = \frac{0.1s + 11}{0.45s^2 + 0.4s + 1}$
7.	$W(s) = \frac{0.4s + 8}{0.41s^2 + 0.5s + 1}$
8.	$W(s) = \frac{8}{0.45s^2 + 0.3s + 1}$
9.	$W(s) = \frac{14}{0.47s^2 + 0.4s + 1}$
10.	$W(s) = \frac{0.17s + 4}{0.44s^2 + 0.3s + 1}$
11.	$W(s) = \frac{0.42s + 4}{0.46s^2 + 0.6s + 1}$
12.	$W(s) = \frac{0.21s + 14}{0.8s^2 + 0.44s + 1}$
13.	$W(s) = \frac{0.1s + 14}{0.48s^2 + 0.4s + 1}$
14.	$W(s) = \frac{0.4s + 19}{4s^2 + 0.2s + 1}$
15.	$W(s) = \frac{0.43s + 14}{0.25s^2 + 0.4s + 1}$
16.	$W(s) = \frac{0.22s + 15}{0.48s^2 + 0.4s + 1}$
17.	$W(s) = \frac{42}{0.78s^2 + 0.4s + 1}$
18.	$W(s) = \frac{24}{0.36s^2 + 0.4s + 1}$
19.	$W(s) = \frac{0.45s + 14}{4s^2 + 0.5s + 1}$
20.	$W(s) = \frac{34}{4s^2 + 0.4s + 1}$
21.	$W(s) = \frac{0.4s + 14}{0.9s^2 + 0.34s + 1}$
22.	$W(s) = \frac{0.9s + 14}{s^2 + 0.42s + 1}$
23.	$W(s) = \frac{18}{7s^2 + 0.57s + 1}$
24.	$W(s) = \frac{14}{3s^2 + 0.48s + 1}$
25.	$W(s) = \frac{14}{0.3s^2 + 0.46s + 1}$
26.	$W(s) = \frac{0.43s + 15}{0.4s^2 + 0.48s + 1}$
27.	$W(s) = \frac{s + 4}{0.46s^2 + 0.4s + 1}$
28.	$W(s) = \frac{0.42s + 5}{0.6s^2 + 0.48s + 1}$
29.	$W(s) = \frac{0.46s + 11}{0.4s^2 + 0.42s + 1}$

30.	$W(s) = \frac{12}{4s^2 + 0.48s + 1}$
31.	$W(s) = \frac{25}{0.2s^2 + 0.4s + 1}$
32.	$W(s) = \frac{0.43s + 25}{0.24s^2 + 0.4s + 1}$
33.	$W(s) = \frac{s + 46}{0.6s^2 + 0.46s + 1}$
34.	$W(s) = \frac{0.2s + 44.5}{0.96s^2 + 0.8s + 1}$
35.	$W(s) = \frac{0.16s + 16}{0.7s^2 + 0.42s + 1}$