

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ МЕТАЛУРГІЇ

згідно з вимогами завдання дирекції технічного проекту
(повна назва кафедри) проектів

Кваліфікаційна робота / проект

групи магістрів
(рівень вищої освіти)

ему можливо дослідження та розробка
інтерфейсу автоматичного технічного
проектів

Виконав: студент II курсу, групи АКП-18-104
спеціальності 157 автоматизація та керування
(код і назва спеціальності) технічного
освітньої програми автоматичного технічного
(код і назва освітньої програми) проектів
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

А.С. Сурово
(ініціали та прізвище)

Керівник Доцент Р.П.У Григор'єв
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент Тех. факультет А.А. Медвед
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя
2020



Зарпор'збачи національний університет
(повне найменування закладу вищої освіти)

бтет Автоматизації
 ра Автоматизація та комп'ютерні інженерії Рехессоані
 вищої освіти друго магістерської
(другий (магістерський) рівень)

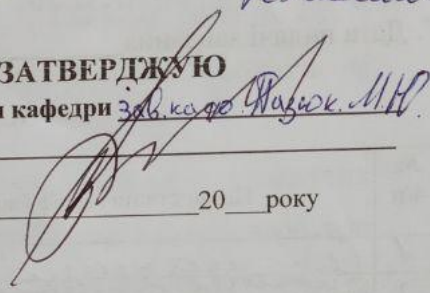
альність 151 Автоматизація та комп'ютерні інженерії Рехессоані
(шифр і назва)

алізація _____
(шифр і назва)

ьо-професійна програма Автоматизація та комп'ютерні інженерії Рехессоані
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Зав. кафедрой Инж. М.Н.



“ ” 20 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВИТИ

Сиротко Андрій Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

ма кваліфікаційної роботи магістра модельне дослідження
розробка алгоритмів одесії оптимізації

ник кваліфікаційної роботи магістра Зиганко Володимир Юрійович доктор В.Н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

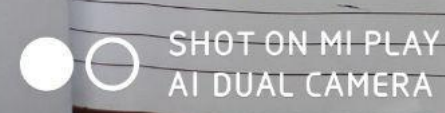
рджені наказом закладу вищої освіти від “20” березня 2014 року № 1540-с

рок подання здобувачем кваліфікаційної роботи магістра _____

хідні дані кваліфікаційної роботи магістра _____

міст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
робити) 1. Вивести програми розрахунку САР. 2. Проаналізувати результати
розрахунку. 3. Проаналізувати результати моделювання. 4. Проаналізувати
результати моделювання САР. 5. Проаналізувати результати моделювання
результати моделювання САР. 6. Вивести результати моделювання
програми розрахунку

релік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентаційна робота в електронному вигляді



5. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра:

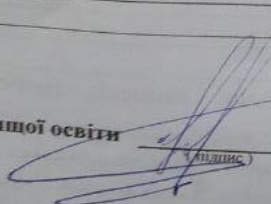
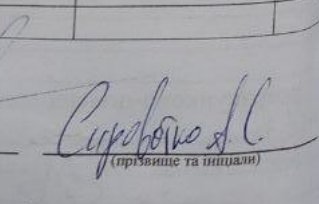
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Розділ 1	Досека К.П. и кафедри АУМТ. Зімова В.О.	26.12.19
Розділ 2	Досека К.П. и кафедри АУМТ. Зімова В.О.	26.12.19
Розділ 3	Досека К.П. и кафедри АУМТ. Зімова В.О.	26.12.19
Розділ 4	Досека К.П. и кафедри АУМТ. Зімова В.О.	26.12.19
Розділ 5	Досека К.П. и кафедри АУМТ. Зімова В.О.	26.12.19
Розділ 6	Досека К.П. и кафедри АУМТ. Зімова В.О.	26.12.19
Розділ 7	Досека К.П. и кафедри АУМТ. Зімова В.О.	26.12.19
Розділ 8	Досека К.П. и кафедри АУМТ. Зімова В.О.	26.12.19

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи магістра	Прізвище
1	Суб'єктивна інформація	10.09.19 - 13.09.19	
2	Суб'єктивна інформація	14.09.19 - 17.09.19	
3	Суб'єктивна інформація	16.09.19 - 23.09.19	
4	Суб'єктивна інформація	23.09.19 - 26.09.19	
5	Суб'єктивна інформація	27.09.19 - 28.09.19	
6	Суб'єктивна інформація	01.10.19 - 03.10.19	
7	Суб'єктивна інформація	03.10.19 - 18.10.19	
8	Суб'єктивна інформація	22.10.19 - 25.10.19	
9	Суб'єктивна інформація	01.11.19 - 09.11.19	
10	Суб'єктивна інформація	19.11.19 - 19.11.19	

Злобувач вищої освіти

Керівник кваліфікаційної роботи магістра

Пояс
 тему: «М
 параметри
 машинопи
 послань.
 В третьо
 побудови
 змінними
 В
 одноконт
 оцінку ро
 В п
 дається
 гігієнічні
 впливають
 В ш
 регулова
 В сь

SHOT ON MI PLAY
 AIDUAL CAMERA
 ВСІХ
 відомше
 За
 ТІЛОВІ
 корист
 РОБАСТ
 МОДЕЛ
 УЛІК

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 102 сторінки, 77 рисунків, 9 таблиць, 28 джерел.

Розглянуті питання оцінювання робастності і побудови нестандартних алгоритмів для регулювання об'єктів зі змінними параметрами.

Розроблено моделі замкнутих одноконтурних систем з різними алгоритмами регулювання та зроблено оцінку робастності за отриманими результатами.

Запропоновані нетипові алгоритми, такі як введення нелінійності в типові закони, побудова нечіткого регулятора на базі ПІ-регулятора, використання ковзаючого режиму для релейного регулятора.

РОБАСТНІСТЬ, РОБАСТНІ СИСТЕМИ, ПАРАМЕТРИ, СИСТЕМА,
МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ЗМІННІ ПАРАМЕТРИ, ЗАКОНИ
РЕГУЛЮВАННЯ, РЕГУЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Стан Проблеми Робастності САР	7
1.1 Робастні системи управління і чутливість	9
1.2 Синтез робастних систем управління	11
1.3 Критерії робастності	16
1.4 Висновки до розділу 1.....	18
2 Імітаційна Модель Термічно Масивного Тіла.....	19
3 Оцінка Робастності Системи При Різних Типах Регуляторі.....	23
3.1 П-регулятор.....	23
3.2 ПІ-регулятор.....	26
3.3 ПІД-регулятор.....	29
3.4 Релейний 2-х позиційний регулятор.....	32
3.5 Релейний 3-х позиційний регулятор.....	34
3.6 Висновки до розділу 3.....	40
4 Стабілізація Релейних САР В Ковзаючому Режимі.....	41
4.1 Релейний 2-х позиційний регулятор з ковзаючим режимом	44
4.2 Порівняння якості перехідного процесу системи з релейним регулятором і з релейним регулятором у ковзаючому режимі.....	47
4.3 Висновки до розділу 4.....	49
5 Введення Нелінійств Типові Закони Регулювання Як Засіб Підвищення Робастності Системи.....	50
5.1 Введення нелінійності в ПІ-регулятор.....	50
5.2 Порівняння якості перехідного процесу системи з ПІ-регулятором, ПІД-регулятором з нелінійним елементом у законі регулювання	53
5.3 Введення нелінійності в ПІД-регулятор.....	55
5.4 Порівняння якості перехідного процесу системи з ПІД-регулятором, ПІД-регулятором з нелінійним елементом у законі регулювання.....	63
5.5 Висновки до розділу 5.....	66

6. Аналіз Нечітких Систем Регулювання З Позції Оцінки Робастності.....	67
6.1 Загальні відомості про нечіткі системи регулювання	67
6.2 Принцип роботи нечіткого регулятора.	72
6.3 Побудова та дослідження систему автоматичного управління з нечітким ПІ-регулятором	73
6.4 Порівняння якості перехідного процесу системи з ПІ-регулятором, нечітким ПІ-регулятором	85
6.5 Висновки до розділу 6.....	82
7. Порівняння Отриманих Результатів Для Всіх Законів Регулювання При Різних Значеннях Відношення Т/Т.....	84
7.1 Перехідні процеси при типових законах регулювання.....	84
7.2 Перехідні процеси при релейних законах регулювання.....	90
7.3 Порівняння робастності для всіх перехідних процесів.....	91
7.4 Висновки до розділу 7.....	99
Перелік Використаних Джерел.....	100

ВСТУП

Система управління - це сукупність об'єкта та керуючого впливу завдання якого полягає в забезпеченні необхідного значення вихідної величини не залежно від прикладених збурень або зміна за певним законом. Динаміка системи визначається як властивостями об'єкта управління так і властивостями регулятора. Проте об'єкт управління протягом одного циклу роботи змінює свої параметри в широкому діапазоні і це призводить до необхідності застосовувати методи робастного управління.

Таким чином, одна з актуальних проблем сучасної теорії автоматичного управління - забезпечення властивостей робастності динамічних систем в умовах їх нестационарності, нелінійності і зміни параметрів об'єкта на протязі одного циклу роботи. Проектування таких систем з використанням методів математичного моделювання істотно підвищує ефективність їх розробки, що дозволяє не тільки ставити математичні моделі робастних систем управління, але і формувати за рахунок алгоритмів керування якість їх функціонування відповідно до поставленої мети.

Істотний вплив на теорію систем управління надає розвиток комп'ютерних технологій, які не тільки спростили аналіз і розрахунок складних систем управління, а й змінили погляд на методи вирішення завдань теорії управління. Імітаційне моделювання є невід'ємною частиною розробки складних динамічних систем, істотно підвищуючи ефективність їх розробки вже на стадії їх проектування.

Поява нових та розвиток відомих методів побудови робастних законів управління в умовах апріорної невизначеності, тобто при неповній інформації про параметри або характеристики об'єкта, нестационарності і зміни параметрів об'єкта на протязі одного циклу роботи, різні модифікації існуючих алгоритмів робастного управління - все це свідчить, що завдання в повному обсязі ще не вирішено. Важливою тенденцією розвитку даного напрямку теорії автоматичного управління є розширення сфери його застосування. Успішне

застосування робастних законів управління об'єктами в різних областях виробництва значною мірою пов'язано з їхнім ефективним функціонуванням, працездатністю в реальних умовах дії на об'єкт безлічі факторів, тобто забезпеченням необхідних значень показників якості управління.

На сьогодні основним завданням робастних систем керування є пошук закону управління, який зберігав би вихідні змінні системи і сигнали помилки в заданих припустимих межах незважаючи на зміну параметрів об'єкта управління.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ РОБАСТНОСТІ САР

Робастність означає незначну зміну виходу системи управління при малій зміні параметрів об'єкту управління. Системи, що володіють властивістю робастності, називаються робастних (грубими) системами. Зазвичай робастні контролери застосовуються для керування об'єктами з невідомою або неповною математичною моделлю, і що містять невизначеності.

Важливою тенденцією розвитку даного напрямку теорії автоматичного управління є розширення сфери його застосування. Успішне застосування робастних законів управління об'єктами в різних областях виробництва значною мірою пов'язано з їхнім ефективним функціонуванням, працездатністю в реальних умовах дії на об'єкт безлічі факторів, тобто забезпеченням необхідних значень показників якості управління.

Проектування моделей робастних систем з урахуванням оцінки стійкості дозволяє ефективно вирішити задачу управління складним динамічним об'єктом, що функціонують в умовах апріорної невизначеності, а також прикладених до об'єкту управління задаючих впливів і діючих на нього зовнішніх збурень. Важливий аспект таких систем полягає в збереженні працездатності, а також основних показників якості в умовах можливих варіацій параметрів об'єкта управління.

У роботі [1] говориться, що багато сучасні підходів до синтезу систем автоматичного керування роблять акцент на робастність систем, тобто здатність систем мати необхідною якістю незважаючи на неточності моделі або суттєву невизначеність характеристик об'єкта управління. При цьому наголошується, що підходи перш за все враховують той факт, що реальні фізичні системи і навколишні умови, в яких вони працюють, не можуть бути змодельовані абсолютно точно, вони можуть змінюватися непередбачуваним чином і можуть піддаватися всіляким збурень.

Робастність систем, як правило, забезпечується належним вибором регулятора. Враховуючи, що головним завданням регулятора є забезпечення

необхідної якості системи в перехідних і сталих режимах, слід вибирати такий регулятор, який забезпечував би необхідну швидкодію при ступінчастому вхідному сигналі, що визначається часом регулювання, малою динамічною помилкою при довільній вхідній дії і допустимими змінами якості системи, що характеризується зазначеними параметрами.

З роботи [1] випливає, що проектування робастних систем управління - це одна зі складних проблем сучасної теорії управління. Однак слід зазначити, що стійкість є одним з найбільш важливих властивостей систем управління, але не єдиним. Такі важливі характеристики управління як точність, час регулювання, перерегулювання повинні забезпечуватися також на прийнятному рівні. Властивість системи керування виконувати поставлені вимоги на якість при варіації параметрів об'єкта управління можна визначити як властивість робастності в більш широкому сенсі, ніж робастної стійкості. Обмеження на якість управління можуть призначатися як в тимчасовій, так і в комплексній області.

Виходячи з доступних на сьогоднішній день даних випливає, що головним завданням синтезу робастних систем керування є пошук закону управління, який зберігав би вихідні змінні системи і сигнали помилки в заданих припустимих межах незважаючи на наявність невизначеностей в контурі управління. Невизначеності можуть приймати будь-які форми, однак найбільш істотними є шуми, нелінійності і неточності в знанні передатної функції об'єкта керування.

Значний вплив на теорію систем управління надає розвиток комп'ютерних технологій, які спрощують аналіз і розрахунок складних систем управління, змінюють погляд на методи вирішення завдань теорії управління. Зокрема, імітаційне моделювання, яке стало невід'ємною частиною при розробки складних динамічних систем.

Наявність потужних пакетів прикладних програм (MATLAB та інші) полегшує завдання практичної реалізації теоретичних рішень. Але залишається актуальною розробка спеціалізованих комплексів імітаційного моделювання,

що враховують особливості конкретного завдання і володіють достатньою універсальністю, гнучкістю, зручністю використання.

1.1 Робастні системи управління і чутливість

Синтез систем високої точності в умовах невизначеності є класичною проблемою теорії управління. Основи вирішення цієї проблеми були закладені на початку 1930-х років Г. С. Блеком і Х. У. Боді у зв'язку з аналізом чутливості систем зі зворотним зв'язком. З тих пір було опубліковано велику кількість робіт, які зачіпають дану проблему. Від проектувальника потрібно, щоб створювана ним система функціонувала належним чином у широкому діапазоні зміни невизначених параметрів. Кажуть, що система є робастною, якщо вона володіє достатньою надійністю, грубістю і гнучкістю.

Виходячи з роботи [1] можна сказати, що від робастної системи потрібно, щоб вона (1) володіла низькою чутливістю, (2) зберігала стійкість і (3) задовольняла вимогам, що пред'являються до її якості, у досить великому діапазоні зміни її параметрів

При малих змінах параметрів в якості міри робастності можна використовувати диференціальні чутливості.

Як описано в роботі [2] робастність можна визначити як:

$$S_{\alpha}^W = \frac{\frac{\partial W}{\partial \alpha}}{\frac{W}{\alpha}}, \quad (1.1.1)$$

де α — параметр, а W — передатна функція системи.

Чутливість кореня визначається як:

$$S_{\alpha}^{r_i} = \frac{\frac{\partial r_i}{\partial \alpha}}{\frac{r_i}{\alpha}}, \quad (1.1.2)$$

Для системи n -го порядку можна сказати, що якщо нулі функції $W(s)$ не залежать від параметра α , то

$$S_{\alpha}^W = -\sum_{i=1}^n S_{\alpha}^{r_i} \cdot \frac{1}{(s+r_i)}. \quad (1.1.3)$$

Однак чутливість S характеризує робастність системи тільки при малих змінах коефіцієнта K . Якщо змінити K від $1/4$ до $K = 1/16$ в один бік і до $K = 1$ в інший, то ми отримаємо перехідні характеристики, зображені на рис. 1. Тому, якщо чекати, що коефіцієнт K буде змінюватися в широкому діапазоні, то, очевидно, таку систему не можна вважати робастною. Робастна система повинна володіти реакцією на обраний вхідний сигнал, досить близькою (в межах обумовлених допусків) до тієї, яка відповідає номінальному значенню параметра.

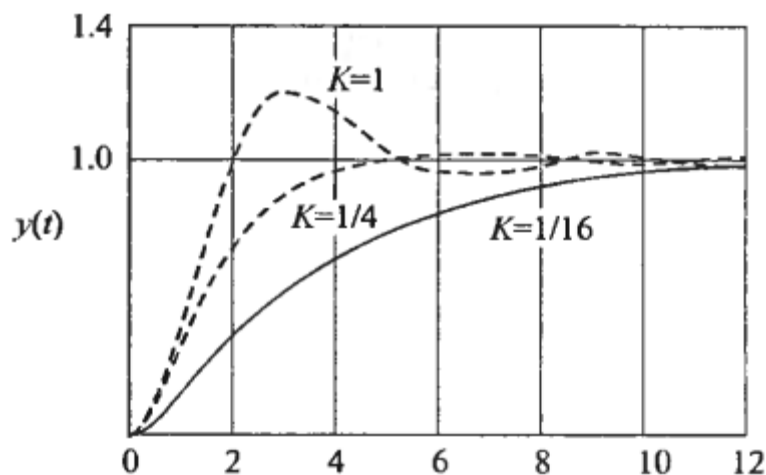


Рисунок. 1.1 Перехідні характеристики при різних значеннях коефіцієнта K

З рисунка 1.1 випливає, що при збільшенні коефіцієнта передачі в системі починають з'являтися коливання і динамічна помилка.

1.2 Синтез робастних систем управління

Синтез робастних систем управління включає в себе два завдання:

1. визначення структури регулятора;
2. налаштування його параметрів з метою отримати «оптимальної» якості системи.

Процедура синтезу була розглянута в роботі [2]. У роботі передбачається, що процедура синтезу буде виконуватися в припущенні про наявність «повної інформації про об'єкт». Крім того, об'єкт буде представлятися у вигляді лінійної неперервної моделі з постійними параметрами. Структуру регулятора обрано так, щоб реакція системи задовольняла певним критеріям якості.

Суть полягала в тому, що при постановці задачі синтезу одна з можливих вимог може полягати в тому, щоб вихідна змінна системи миттєво і точно відтворювала всі зміни вхідного сигналу. Це означає, що передавальна функція системи повинна бути дорівнює одиниці:

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = 1 \quad (1.2.1)$$

З недоліків запропонованого методу можна відзначити, що оскільки будь-яка система містить елементи ємнісного та індуктивного типу, які накопичують енергію того чи іншого виду на практиці це неможливо реалізувати. Саме ці елементи в поєднанні з елементами які розсіюють енергію, зумовлюють динаміку системи управління. Такі системи одні вхідні сигнали можуть відтворювати досить точно, в той час як інші можуть зовсім не зуміти відтворити - і все це тому, що смуга пропускання реальної системи не є нескінченною.

Також в роботі [2] був розглянутий синтез робастних систем з ПД-регулятором. У роботі говориться, що вибір трьох коефіцієнтів ПД-регулятора по суті є завдання відшукування потрібної точки в тривимірному просторі. Кожна

точка цього простору відповідає різним комбінаціям трьох параметрів ПД-регулятора. Вибираючи різні точки в просторі параметрів, ми можемо, наприклад, отримати різний вид реакції системи на ступінчастий вхідний сигнал. ПД-регулятор можна підібрати шляхом пошуку потрібної точки в просторі параметрів методом проб і помилок.

Можна відзначити, що головною проблемою у виборі зазначених трьох коефіцієнтів є те, що цим коефіцієнтами не так-то просто поставити у відповідність показники якості та робастності, які хотів би мати проектувальник. У роботі [2] для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати метод оцінки якості ІЗМП (інтеграл від зваженого модуля помилки) і оптимальних значень коефіцієнтів характеристичного полінома замкнутої системи. Використовуючи даний метод можна вибрати три коефіцієнти ПД-регулятора, що мінімізують оцінку ІЗМП, при якій система має прекрасну реакцією на ступінчастий або лінійний сигнал.

Так само існують такі технології синтезу робастних регуляторів як H_∞ -синтез і LQG-синтез [3]. H_∞ -синтез є оптимізаційним, що має справу зі строгим математичним описом передбачуваної поведінки замкнутої системи і її стійкості. Працює як зі стійкістю, так і з чутливістю системи, забезпечує стійкість замкнутого контуру. З недоліків слід зазначити, що метод вимагає особливої уваги до параметричної робастності об'єкту управління.

LQG-синтез включає в себе набір методів і математичного апарату теорії керування для синтезу систем управління з негативним зворотним зв'язком для лінійних систем з адитивним гаусівських шумом. Синтез проводиться шляхом мінімізації заданого квадратичного функціоналу. У методі застосовується використання доступної інформації про перешкоди. Недоліками є те, що LQG-синтезом не гарантуються запаси стійкості, а також потрібна точна модель об'єкта і велика кількість ітерацій.

Питання робастного налаштування двоконтурних автоматичних систем регулювання було розглянуто у роботі [4]. В якості рішення було запропоновано здійснити пошук компромісних робастних настроювальних

параметрів двоконтурних автоматичних систем регулювання чисельним методом імітаційного моделювання з використанням алгоритму оптимізації Optim-MGA. Наведено результати розрахунку і аналізу двоконтурної АСР з ПІ-регулятором і диференціатор. За отриманими результатами можна сказати, що запропонований метод дозволяє робити систему не просто грубою до варіацій параметрів, а оптимально грубою як за якісними показниками, так і по заданому діапазону стійкості при всіх можливих змінах динамічних властивостей об'єкта регулювання.

Основні підходи до вирішення завдання побудови робастного регулятора були розглянуті в роботі [10] і полягають в наступному:

- використання регуляторів з нескінченно великим або кінцевим, але великим коефіцієнтом передачі.
- забезпечення максимального значення ступеня стійкості системи, хоча без певних супутніх умов це не є достатнім.
- мінімаксне регулювання.
- оптимальне керування в різних функціональних просторах.
- використання функцій Ляпунова для синтезу систем.
- використання методів інтервальної математики.
- використання принципів інваріантного управління.

При цьому вирішуються такі завдання:

- забезпечення робастної стійкості, тобто одночасної стійкості безлічі систем з невизначеністю із заданого класу.
- забезпечення малої чутливості мінімізованого функціоналу якості системи до дії невизначеності.
- забезпечення максимальної робастності, тобто синтез системи стійкої при максимально широкому діапазоні зміни параметрів невизначеності моделі.

Спосіб збільшення грубості системи, що базується на необхідності врахування чинника невизначеності в математичному описі об'єкта та введенні в традиційну процедуру синтезу регуляторів додатково ще одного напрямку дослідження розглянуто в роботі [15]. Тобто разом із звичайною процедурою

синтезу тепер розглядається ще проблема зменшення чутливості контрольованої змінної до наявності невизначеності, яка і називається збільшенням грубості системи. При цьому в якості контрольованої змінної в одновимірній системі зручно розглядати сигнал помилки системи. Передавальну функцію замкненої системи помилково називають функцією чутливості системи або просто чутливістю. Тоді як критерій якості, який оцінює грубість системи в динаміці, може бути використана норма передавальної функції замкненої системи за помилкою в будь-якому з функціональних просторів.

У роботі [16] показана загальна схема дослідження робастної стійкості, яка дається так званним μ -аналізом. Він заснований на понятті структурного сингулярного числа матриці. У μ -аналізі система приводиться до стандартної М- Δ -конфігурації, де всі невизначеності Δ включені в ланцюг штучної зворотного зв'язку, а М-номінальна замкнута система (що включає номінальний об'єкт, регулятор і зворотний зв'язок). Матрична невизначеність $\Delta(s)$ має деяку структуру (у ній можуть бути блоки, що відповідають речовій або комплексній параметричній або матричній невизначеності, частотній невизначеності). Число $\mu(M)$ визначається як зворотне до мінімальної норми Δ заданої структури, при якій матриця $I+M\Delta$ стає виродженою. Для обчислення $\mu(M)$ існують чисельні методи, засновані на верхніх і нижніх межах для $\mu(M)$.

Так само при синтезі робастних систем потрібно дотримуватися теорії робастної стійкості, яка спирається на мінімакний підхід - потрібно збереження стійкості при будь-якій допустимій невизначеності [17]. Проте можна вважати невизначеність випадковою, а систему робастної стійкості, якщо вона зберігає стійкість з імовірністю, близькою до одиниці. Такий імовірнісний підхід має ряд переваг. Зокрема, можна застосувати метод Монте-Карло для прямої перевірки ймовірнісної стійкості. Імовірнісний радіус стійкості часто виявляється помітно більшим, ніж детермінований.

Виходячи з роботи [10] можна сказати, що при достатньо великому числі підходів до вирішення проблеми, внаслідок значної складності теорії і методів проектування, має місце значна кількість прикладів рішень, конкретних

реальних завдань автоматизації технологічних процесів, на інженерному рівні. Тому актуальною є задача побудови таких методик синтезу промислових робастних систем, які дозволяють отримувати близькі до оптимальних рішення, але відрізняються від оптимальних більшою простотою й доступністю для фахівця з автоматизації технологічних процесів.

Також при синтезі робастних систем управління промисловими технологічними процесами, необхідно враховувати такі особливості: У системах регулювання широко використовуються одноконтурні системи регулювання; наявність тривалих постійних часу і запізнювань об'єкта управління; можливо є декомпозиції задачі управління; найчастіше об'єкти управління є мінімально фазовими і стійкими, або знаходяться на аперіодичній межі стійкості; можливо апроксимувати динаміку одновимірного об'єкту за допомогою рівнянь першого, другого і третього порядку з запізненням, наявність шумів, наявність невизначеності в моделі об'єкта управління; традиція використовувати найпростіші закони (П, ПІ, ПІД) регулювання, і закони позиційного регулювання; використання методів розв'язання окремих каналів регулювання в багатозв'язних системах.

Однак, варто зауважити, що оптимальні системи рідко безпосередньо використовуються при вирішенні практичних завдань автоматизації. Найчастіше рішення оптимальної задачі використовується як еталон для конкретного напрямку синтезу, щоб отримати граничне значення заданого показника якості системи досяжного для даного об'єкта. В ідеальному випадку необхідно мати оптимальні рішення для всіх критеріїв якості, що цікавлять проектувальника, щоб була можливість об'єктивної оцінки отриманої системи в кожному напрямку дослідження. Але система оптимальна в одному відношенні може не задовольняти іншим якісним показникам.

1.3 Критерії робастності

У роботі [5] була розглянута задача робастного управління, яка полягає в забезпеченні критерію робастності. Загальна канонічна задача робастного управління математично описувалася в наступному вигляді:

Нехай передатна функція об'єкта управління – $W(s)$. Необхідно синтезувати такий контролер з передавальної функцією $F(s)$, щоб передатна функція замкнутої системи W_{y1u1} задовольняла наступному рівнянню, яке називається критерієм робастності:

$$\frac{1}{K_M(W_{y1u1}(j\omega))} < 1,$$

де

$$K_M(W_{y1u1}(j\omega)) = \inf \left[\sigma_n(\Delta) \mid \det((I - W_{y1u1})\Delta) = 0 \right]$$

Δ - матриця невизначеностей,

σ_n - n-е сингулярне число матриці.

K_M можна розглядати як розмір найменшої невизначеності на кожній частоті, яка може зробити систему нестійкою.

Для того, щоб ввести в робастний синтез вимоги за якістю управління, використовується фіктивна невизначеність Δ_n . При її відсутності завдання є завданням забезпечення робастної стійкості. У робастному аналізі потрібно знайти як межу стійкості, в робастному ж синтезі потрібно визначити передавальну функцію контролера для відповідності критерію робастності.

У роботі [11] для оцінки робастності пропонується для оцінки грубості системи використовувати норму передавальної функції за помилкою, яка для систем з одним входом і одним виходом є величину модуля максимально віддаленої від початку координат точки годографа-фазової характеристики системи за помилкою.

Так само йдеться, що для оцінки грубості системи зручно використовувати величину інтервалу зміни коефіцієнта передачі передавальної

функції об'єкта управління або запізнення, при якому система не втрачає стійкості. Чим більше цей інтервал, тим більше грубої є система до варіацій коефіцієнта передачі об'єкта та запізнювання. Це характеризує ступінь пристосованості системи до реальних умов. Тут також можуть бути використані й інші параметри передавальної функції об'єкта. Можна також розглядати більш вузький інтервал зміни параметрів моделі об'єкта при обмеженнях, що накладаються на якість показники якості системи, наприклад на перерегулювання.

1.4 Висновки до розділу 1

1. У будь-якому технологічному процесі розробник систем автоматичного управління стикається з неточністю математичного опису, невизначеністю деяких параметрів об'єкта, зміною динамічних параметрів об'єкта управління в широкому діапазоні протягом одного циклу роботи та завданням класу вхідних збурень. З цим пов'язана поява проблеми робастного управління, що отримала найбільший розвиток в останні десятиліття.

2. Важливою тенденцією розвитку робастної теорії автоматичного управління є розширення сфери його застосування. Успішне застосування робастних законів управління об'єктами в різних областях виробництва значною мірою пов'язано з їхнім ефективним функціонуванням, працездатністю в реальних умовах дії на об'єкт безлічі факторів, тобто забезпеченням необхідних значень показників якості управління.

3. Поява нових та розвиток відомих методів побудови робастних законів управління, різні модифікації існуючих алгоритмів робастного управління - все це свідчить, що завдання в повному обсязі ще не вирішена.

2 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТЕРМІЧНО МАСИВНОГО ТІЛА

Технологічні агрегати періодичної дії протягом одного циклу роботи змінюють свої динамічні параметри, такі як постійна часу і транспортне запізнювання, в широкому діапазоні. Прикладом такого об'єкта є нагрів термічно масивних тіл.

Розглянемо динаміку нагріву термічно масивних тіл. Для цього розроблена імітаційна модель у середовищі Matlab, яка складається з послідовно включених аперіодичних ланок I порядку, що представляють собою шари металу, в яких тепло передається від одного шару до іншого.

На рисунку 2.1 показана імітаційна модель термічно масивного тіла. Термічно масивне тіло умовно розбито на 5 шарів. Кожен шар представлений у вигляді аперіодичного ланки I порядку і враховує температуру з попереднього і наступного шару (рисунок 2.1).

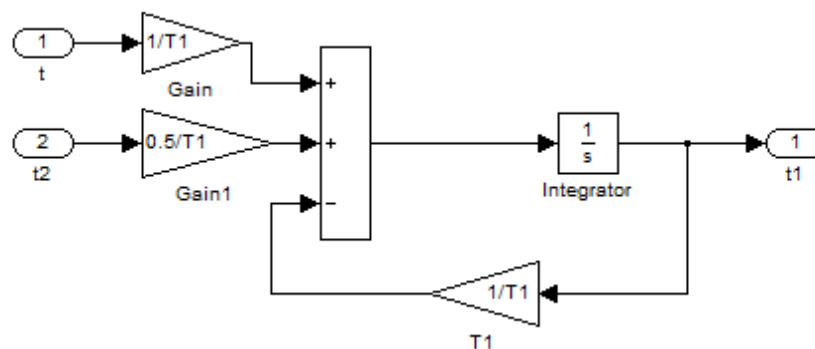


Рисунок. 2.1 Аперіодична ланка I порядку

При зміні температури також змінюються властивості об'єкта, такі як щільність матеріалу, теплопровідність, теплоємність, від яких залежить постійна часу T . Таким чином ми отримали об'єкт, який постійно змінюється в процесі роботи.

Для розрахунку постійної часу T створений спеціальний блок, який в кожен момент часу проводить розрахунок для поточного значення температури (рисунок. 2.1), а далі саме це значення і використовується в аперіодичному ланці.

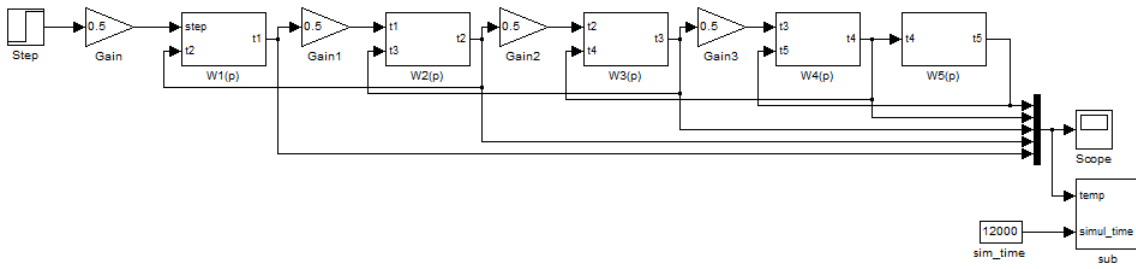
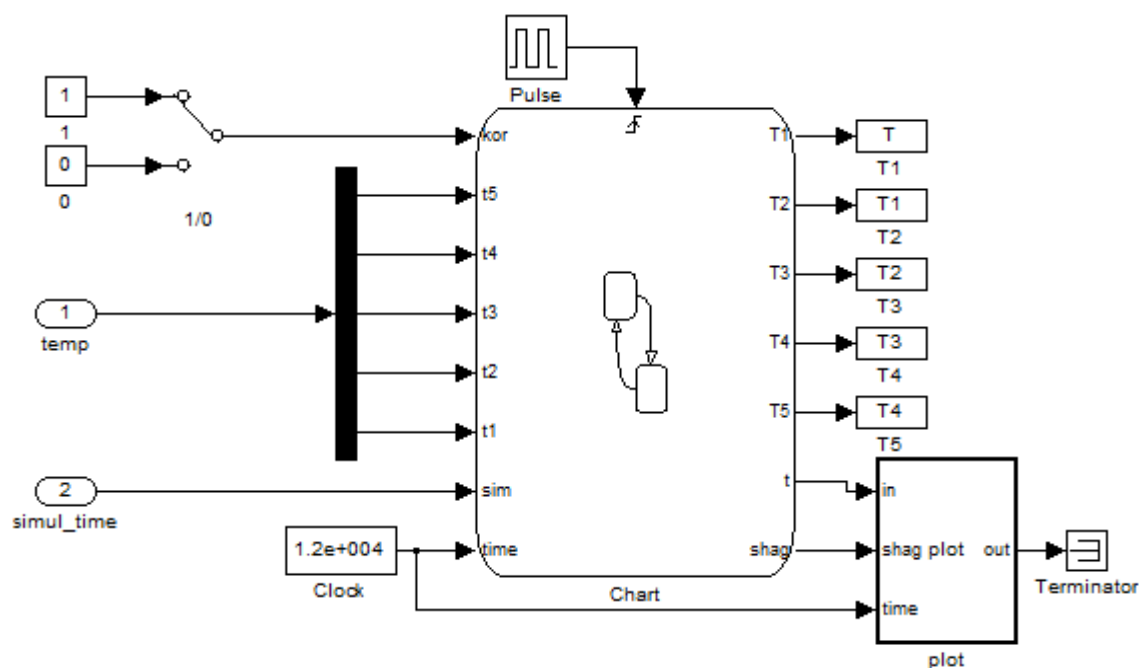
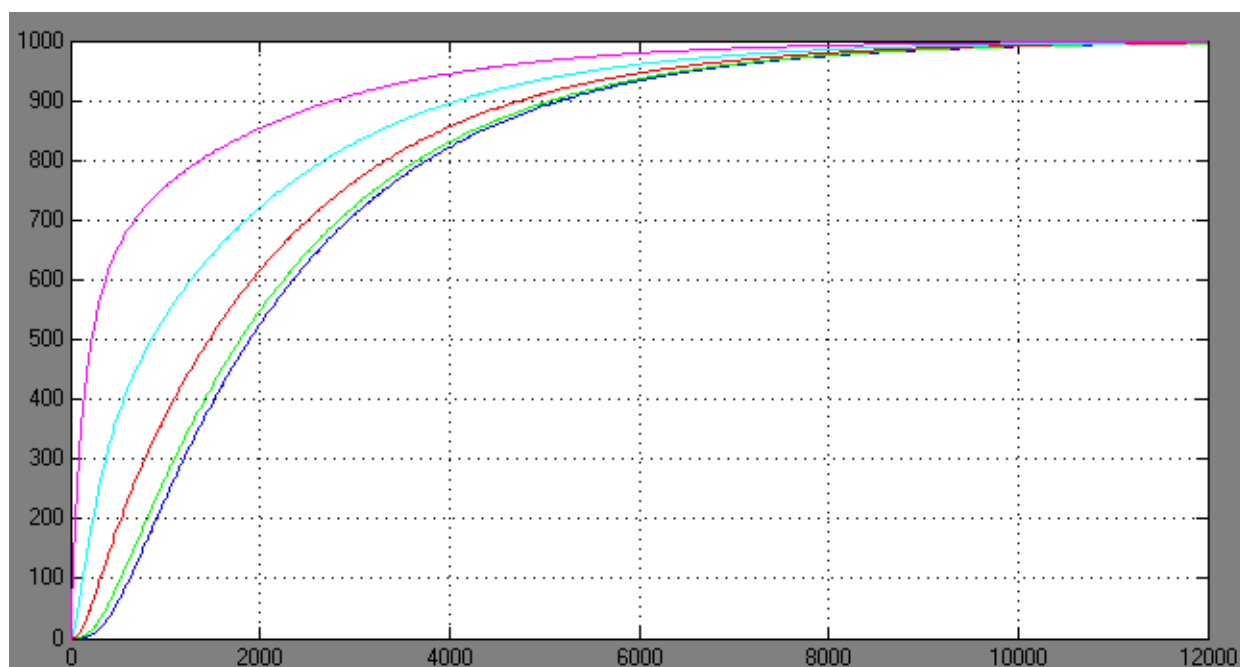


Рисунок. 2.2 Імітаційна модель термічно масивного тіла



Рисунку. 2.3 Розрахунок постійної часу об'єкта

Для кожного шару розраховується своя постійна часу з урахуванням температури даного шару в поточний момент часу. Графік перехідного процесу по шарах наведено нижче.



Рисунком 2.4 Розподіл температури по шарах в часі

На рисунку 2.4 показано розподіл температури по шарах з плином часу з коригуванням постійної часу в кожен момент часу.

3 ОЦІНКА РОБАСТНОТИ СИСТЕМ ПРИ РІЗНИХ ТИПАХ РЕГУЛЯТОРІВ

Теорія робастних систем найчастіше передбачає опис об'єкта керування у вигляді системи диференціальних рівнянь, в яких присутня невизначеність. Розрізняють теорію систем з одним входом і одним виходом (siso) і систем, у яких векторний вхід і векторний вихід (mimo). Ми будемо розглядати систему з одним входом і одним виходом, яка знаходить широке розповсюдження при автоматизації нижнього рівня ієрархії при побудові АСУТП.

Аналіз літературних джерел з робастних систем показав, що на сьогоднішній день відсутня єдина кількісна оцінка робастності. У даній роботі ми будемо оцінювати робастність різних систем шляхом порівняння чутливості тривалості перехідного процесу і динамічної помилки до зміни параметрів.

3.1 П-регулятор

У пакеті Simulink програми Matlab була розроблена модель замкнутої системи управління, яка складається з об'єкта управління і П-регулятора.

Передавальна функція об'єкта:

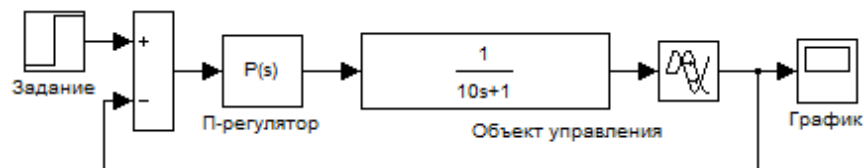


Рисунок 3.1 - Одноконтурна система з П-регулятором

На рисунку 3.1 показана структурна схема моделі замкненої системи управління, яка складається з об'єкта управління і П-регулятора. Об'єкт управління представлений у вигляді послідовно включених аперіодичної ланки першого порядку і ланки транспортного запізнювання.

У середині П-регулятор має вигляд:

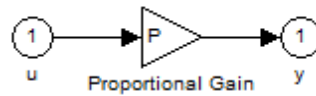
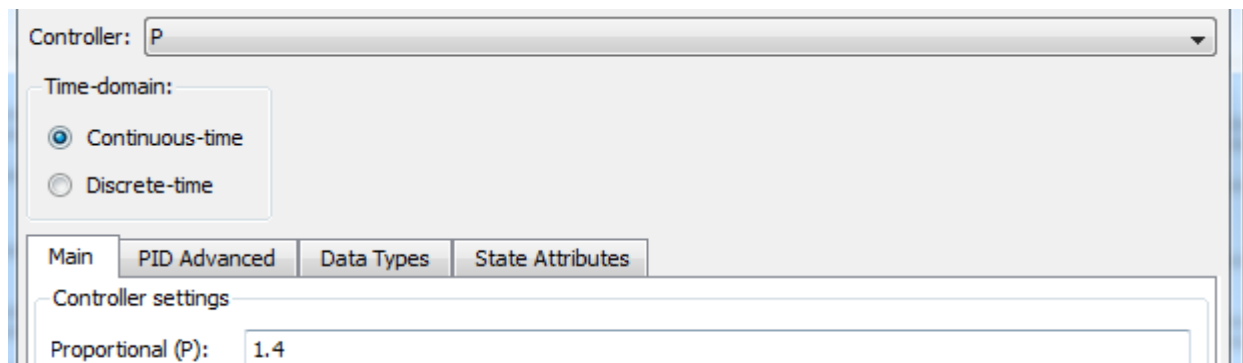


Рисунок 3.2 П-регулятор

П-регулятор є звичайною пропорційною ланкою з заданим коефіцієнтом передачі.

Значення параметра настройки для П-регулятора: $K_p=1.4$.

Рисунок. 3.3 Настройки для П-регулятора при $\tau=\text{const}$ і $T=\text{const}$

Після збору схеми, змінюючи по черзі один з параметрів об'єкта, а інший фіксуючи була отримана таблиця характеристик.

Таблиця 3.1 - Характеристики перехідного процесу з П-регулятором

	$\tau=\text{const} (5)$					$T=\text{const} (25)$				
τ/T	0.1	0.2	0.5	0.8	1	0.1	0.2	0.5	0.8	1
T	50	25	10	6.25	5	25				
τ	5					2.5	5	12.5	20	25
Δ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	65	25	25	38	51	34	25	61	146	248

В таблиці 3.1 представлені характеристики перехідного процесу для системи з П-регулятором при різних значеннях відношення τ/T , а саме динамічна помилка і час перехідного процесу.

В таблиці 3.1. представлені характеристики перехідного процесу для системи з П-регулятором при різних значеннях відношення τ/T , а саме динамічна помилка і час перехідного процесу.

Оцінювати якість перехідного процесу для системи з П-регулятором можна тільки по часу перехідного процесу ($t_{\text{пн}}$), а динамічна помилка ($\Delta X_{\text{вих}}^{\text{max}}$) відсутня. Зменшення або збільшення значення відносини τ/T призведе до збільшення часу перехідного процесу. Для обох випадків, при фіксованому значенні постійної часу об'єкта або транспортного запізнювання, найкраща якість регулювання спостерігається при значенні $\tau/T=0.1\dots 0.5$. Саме в цьому діапазоні відносин і рекомендується використовувати П-регулятор, а при виході з даного діапазону буде погіршуватися якість перехідного процесу.

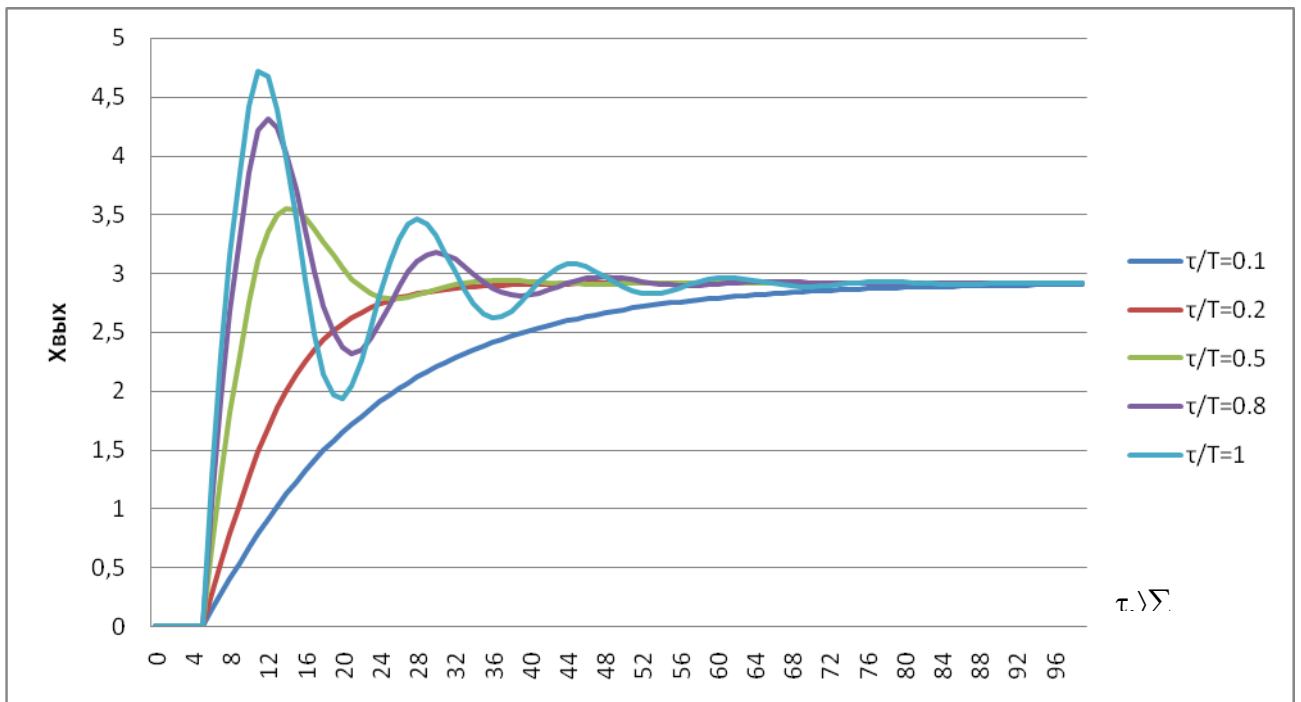


Рис. 3.4 Перехідні процеси для моделі з П-регулятором при різних значеннях відноски τ/T ($\tau=\text{const}$)

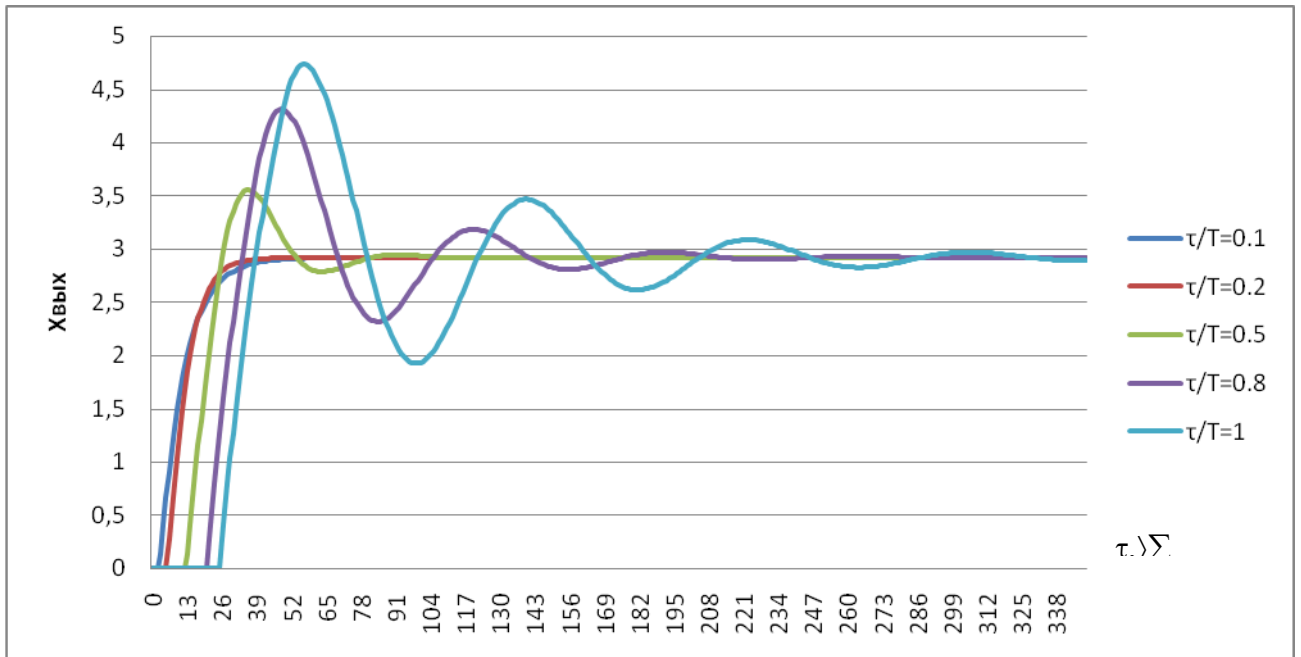


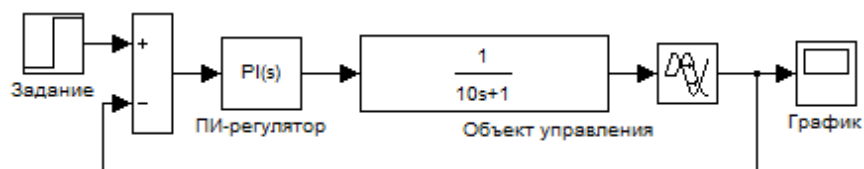
Рис. 3.5 Перехідні процеси для моделі з ПІ-регулятором при різних значеннях відноси τ/T ($T=\text{const}$)

З рисунка 3.4 можна сказати, що при фіксованому значенні часу транспортного запізнювання при зменшенні постійної часу об'єкта зменшується час перехідного процесу, але з'являються коливання і значно збільшується динамічна помилка. На рисунку 3.5 представлені перехідні процеси при фіксованому значенні постійної часу об'єкта. При мінімальних значеннях часу транспортного запізнювання тривалість перехідного процесу сама мінімальна, а при збільшенні запізнювання в системі виникають коливання і значно збільшується динамічна помилка і час перехідного процесу.

3.2 ПІ-регулятор

У пакеті Simulink програми Matlab була розроблена модель замкнутої системи управління, яка складається з об'єкта управління і ПІ-регулятора.

Передавальна функція об'єкта:



Рисунку. 3.6 Одноконтурна система з ПІ-регулятором

На рисунку 3.6 показана структурна схема моделі замкненої системи управління, яка складається з об'єкта управління і ПІ-регулятора. Об'єкт управління представлений у вигляді послідовно включених аперіодичного ланки першого порядку і ланки транспортного запізнювання.

У середині ПІ-регулятор має вигляд, рисунок 3.6 та рисунок 3.7:

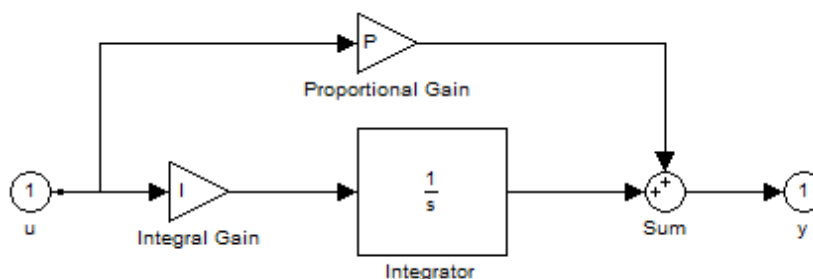
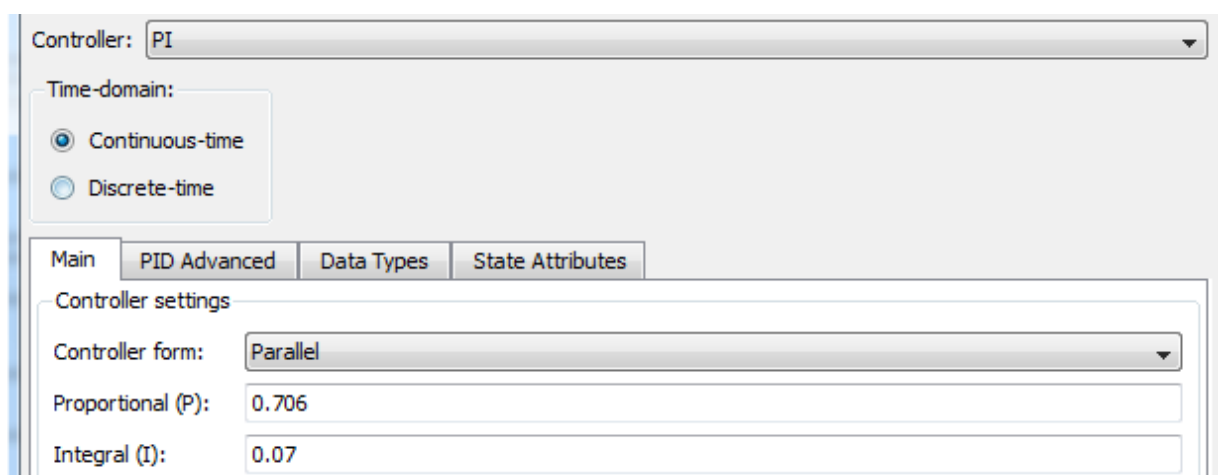
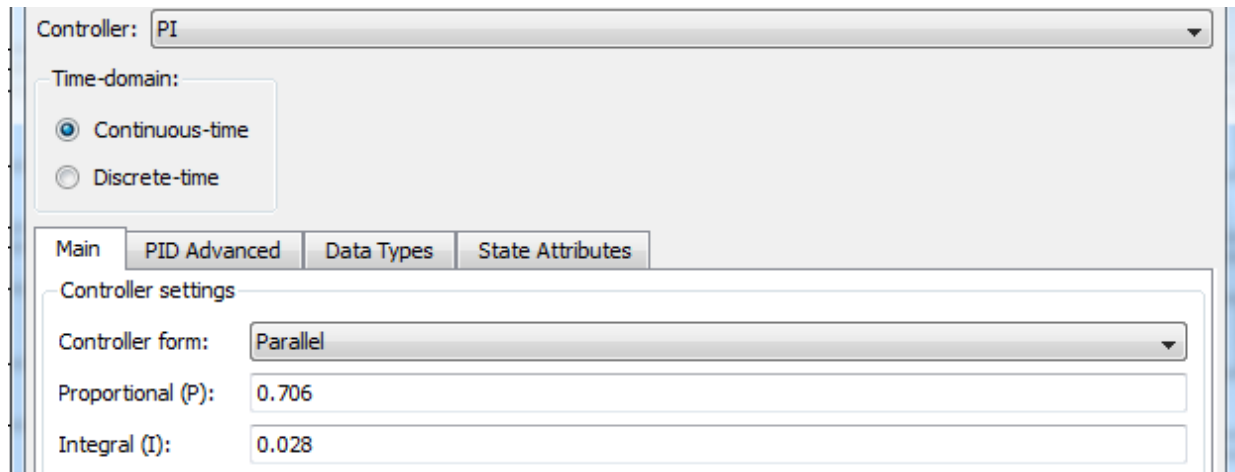


Рисунок. 3.7 ПІ-регулятор

Значення параметрів налаштування для ПІ-регулятора: $K_p=0.706$, $T_i=0.07$ ($\tau=\text{const}$) и $K_p=0.706$, $T_i=0.028$ ($T=\text{const}$).



a)



б)

Рисунку. 3.8 Настройки для ПІ-регулятора при $\tau=\text{const}$ (а) и $T=\text{const}$ (б)

Змінюючи по черзі один з параметрів об'єкта, а інший фіксуєчи була отримана таблиця характеристик.

Таблиця 3.1 Таблиця характеристик

	$\tau=\text{const}$ (5)					$T=\text{const}$ (25)				
τ/T	0.1	0.2	0.5	0.8	1	0.1	0.2	0.5	0.8	1
T	50	25	10	6.25	5	25				
τ	5					2.5	5	12.5	20	25
Δ	1.157	0.838	0	0	0	0	0	0	0.412	1.027
	289	145	37	64	69	155	142	93	103	169

У таблиці 3.1. представлені характеристики перехідного процесу для системи з ПІ-регулятором при різних значеннях відношення τ/T , а саме динамічна помилка і час перехідного процесу.

Оцінювати якість перехідного процесу для системи з ПІ-регулятором можна по часу перехідного процесу ($t_{\text{пп}}$) і динамічній помилці (Δ). Збільшення значення транспортного запізнювання об'єкта і постійної часу об'єкта призводить до погіршення динаміки замкнutoї системи - збільшення часу перехідного процесу. Для обох випадків найкращу якість регулювання спостерігається при значенні $\tau/T=0.5$ - відсутня динамічна помилка і мінімальний час перехідного процесу. Саме для даного значення відношення і його невеликих діапазонів зміни і рекомендується використовувати ПІ-

регулятор, а при значному збільшенні або зменшенні значення відносини τ/T буде погіршуватися якість перехідного процесу.

З рисунка 3.3 можна сказати, що при фіксованому значенні часу транспортного запізнювання при збільшенні постійної часу об'єкта збільшується час перехідного процесу і з'являються коливання, значно збільшується динамічна помилка. Представлені перехідні процеси при фіксованому значенні постійної часу об'єкта. При мінімальних значеннях часу транспортного запізнювання тривалість перехідного процесу сама мінімальна, а при збільшенні запізнювання в системі виникають коливання, збільшується динамічна помилка і час перехідного процесу.

3.3 ПІД-регулятор

У пакеті Simulink програми Matlab була розроблена модель замкнутої системи управління, яка складається з об'єкта управління і ПІД-регулятора.

Передавальна функція об'єкта:

$$W_{об}(p) = \frac{1}{10p + 1} \cdot e^{-5p}$$

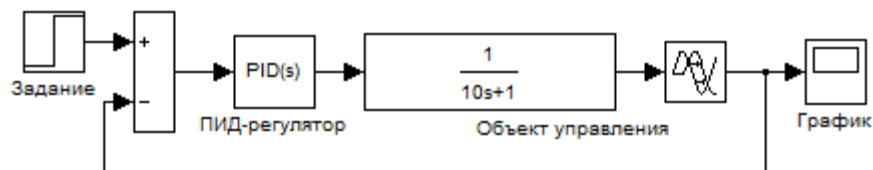


Рисунок. 3.9 Одноконтурна система з ПІД-регулятором

На рисунку 3.9 показана структурна схема моделі замкненої системи управління, яка складається з об'єкта управління і ПІД-регулятора. Об'єкт управління представлений у вигляді послідовно включених аперіодичного ланки першого порядку і ланки транспортного запізнювання.

У середині ПІД-регулятор має вигляд:

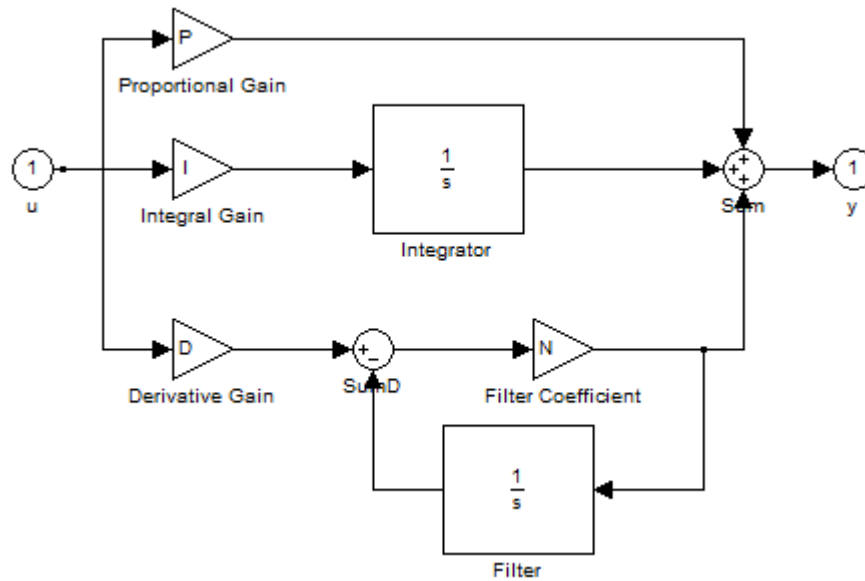
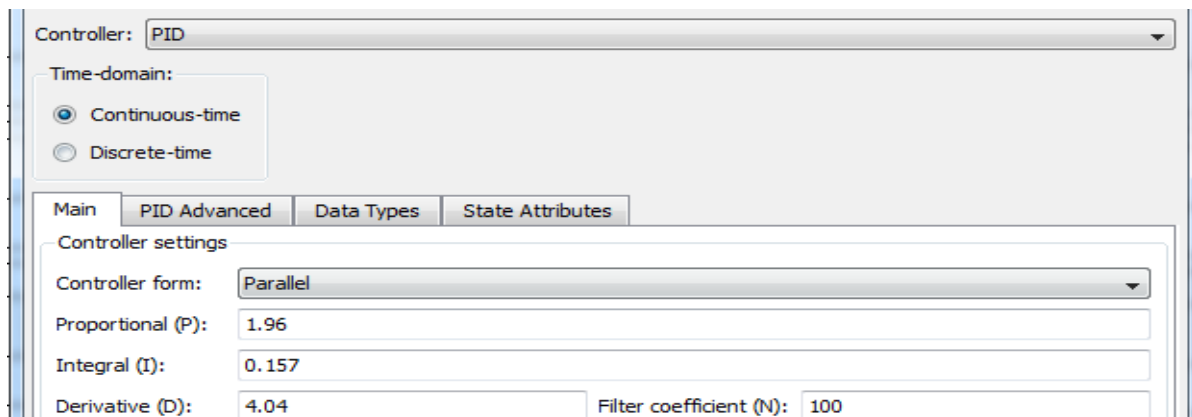
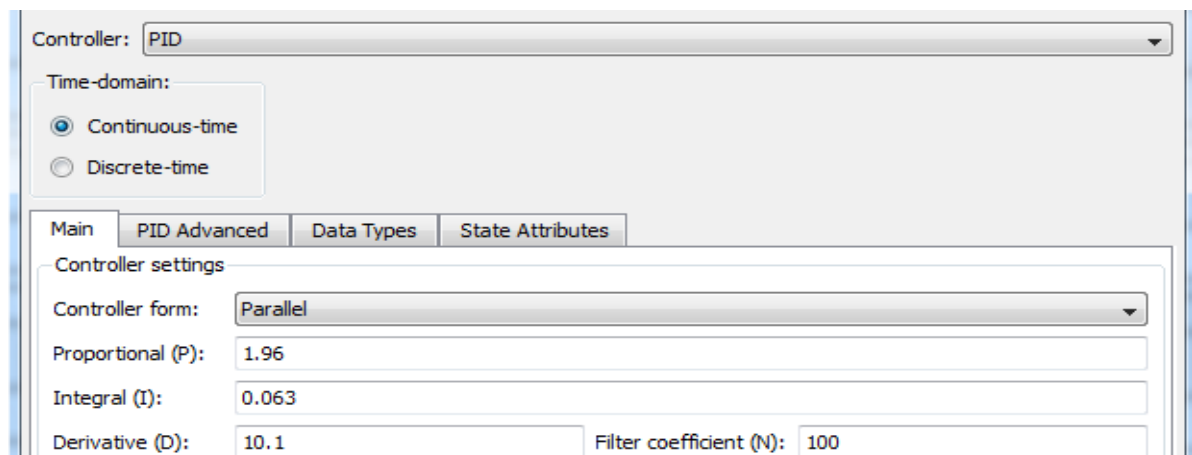


Рисунок. 3.10 ПІД-регулятор

Значення параметрів налаштування для ПІД-регулятора: ; ; ($\tau = \text{const}$) и ; ;
($T = \text{const}$).



а)



б)

Рисунок 3.11 Настройки для ПД-регулятора при $\tau=\text{const}$ (а) и $T=\text{const}$ (б)

Змінюючи по черзі один з параметрів об'єкта, а інший фіксуючи була отримана таблиця характеристик.

Таблиця 3.2 характеристик

	$\tau=\text{const}$ (5)					$T=\text{const}$ (25)				
τ/T	0.1	0.2	0.5	0.8	1	0.1	0.2	0.5	0.8	1
T	50	25	10	6.25	5	25				
τ	5					2.5	5	12.5	20	25
Δ	1.537	0.848	0.919	3.074	4.556	0	0	0.883	3.268	4.835
	184	88	20	73	373	85	75	49	213	711

У таблиці 3.2. представлені характеристики перехідного процесу для системи з ПД-регулятором при різних значеннях відношення T/τ , а саме динамічна помилка і час перехідного процесу.

Оцінювати якість перехідного процесу для системи з ПД-регулятором можна по часу перехідного процесу ($t_{\text{пр}}$) і динамічній помилці (Δ). Для даного об'єкта і ПД-регулятора при $\tau=\text{const}$ і $T=\text{const}$ найкращу якість регулювання спостерігається при значенні $T/\tau=0.2\dots0.5$ - мінімальні динамічна помилка і час перехідного процесу.

Зазвичай ПД-регулятор рекомендується використовувати для найбільш відповідальних контурів регулювання, так як він забезпечує найбільш високу швидкодію в системі. Проте слід враховувати, що ця умова виконується тільки при його оптимальних настройках (настроюються три параметри).

С збільшенням запізнювання в системі різко зростають негативні фазові зрушення: що знижує ефект дії диференціальної складової регулятора, збільшуються динамічна помилка і час перехідного процесу. Тому якість роботи ПД-регулятора для систем з великим запізненням стає порівняною з якістю роботи П-регулятора.

Крім цього, наявність шумів в каналі вимірювання в системі з ПД-регулятором призводить до значних випадковим коливанням керуючого сигналу регулятора, що збільшує дисперсію помилки регулювання і знос виконавчого механізму. Таким чином, ПД-регулятор слід вибрати для систем регулювання з відносно малим рівнем шумів і величиною запізнювання в об'єкті управління.

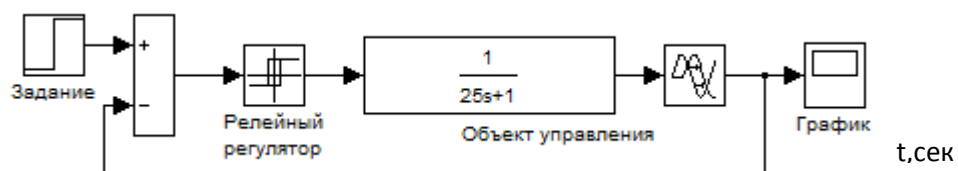
ПД регулятори дозволяють для об'єктів постійної часу об'єкта (інерційністю) T і з малим транспортним запізнюванням $\tau/T < 0.2$ забезпечити якість регулювання: неузгодженість регулювання $E < 1\%$ (від заданої точки), достатня малий час виходу на режим і невисоку чутливість до зовнішніх збурень. Іноді (в деяких об'єктах регулювання з істотним транспортним запізненням), при $\tau/T > 0.2$ ПД регулятор має поганою якістю регулювання.

З рисунка можна сказати, що при фіксованому значенні часу транспортного запізнювання при зменшенні постійної часу об'єкта відбувається збільшення часу перехідного процесу, значно збільшуються коливання в системі і динамічна помилка.

3.4 Релейний 2-х позиційний регулятор

У пакеті Simulink програми Matlab була розроблена модель замкнутої системи управління, яка складається з об'єкта управління і релейного двохпозиційного регулятора.

Передавальна функція об'єкта рисунок 3.12:



Рисунку. 3.12 Одноконтурна система з релейним регулятором

На рисунку 3.12 показана структурна схема моделі замкненої системи управління, яка складається з об'єкта управління і релейного регулятора. Об'єкт управління представлений у вигляді послідовно включених аперіодичної ланки першого порядку і ланки транспортного запізнювання.

Далі задамо налаштування для релейного регулятора.

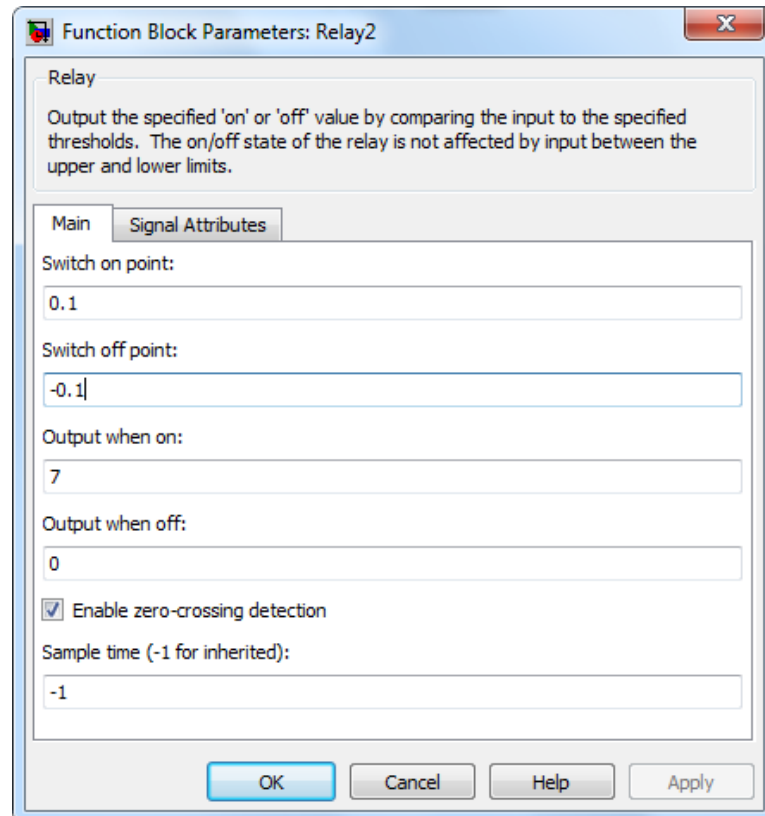


Рисунок. 3.13 Налаштування для релейного двохпозиційного регулятора

Налаштування для релейного двохпозиційного регулятора показані на рисунку 3.13. В якості налаштувань задається значення включення і виключення релейного елемента, відповідні значення для кожного положення.

Змінюючи по черзі один з параметрів об'єкта, а інший фіксуєчи була отримана таблиця характеристик.

Таблиця 3.3 Таблиця характеристик

	$\tau = \text{const} (5)$					$T = \text{const} (25)$				
τ/T	0.1	0.2	0.5	0.8	1	0.1	0.2	0.5	0.8	1
T	50	25	10	6.25	5	25				
τ	5					2.5	5	12.5	20	25

Δ	0.279	0.443	0.843	1.144	1.298	0.279	0.443	0.847	1.1443	1.299
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

У таблиці 3.3. представлені характеристики перехідного процесу для системи з релейним регулятором при різних значеннях відношення τ/T , а саме динамічна помилка і час перехідного процесу.

Оцінювати якість перехідного процесу будемо тільки по динамічній помилку (Δ), а час перехідного процесу ($t_{\text{пп}}$) визначити не можна, так як отриманий автоколивальний перехідний процес. У всіх довідниках і літературі рекомендується використовувати релейний регулятор при значенні $\tau/T < 0.2$, що і підтверджують результати, які були отримані нами. При виході з зазначеного діапазону значень відносини τ/T буде погіршуватися якість перехідного процесу, що визначається за значенням динамічної помилки.

В таблиці показані перехідні процеси для системи з релейним регулятором. При фіксованому значенні часу транспортного запізнювання і збільшенні постійної часу об'єкта збільшується коливальність перехідного процесу і динамічна помилка. При фіксованому значенні постійної часу об'єкта і мінімальних значеннях часу транспортного запізнювання динамічна помилка сама мінімальна. При тих же умовах, але збільшенні запізнювання в системі збільшується коливальність перехідного процесу і динамічна помилка.

3.5 Релейний 3-х позиційний регулятор

У пакеті Simulink програми Matlab була розроблена модель замкнутої системи управління, яка складається з об'єкта управління і релейного трьохпозиційного регулятора.

Передавальна функція об'єкта:

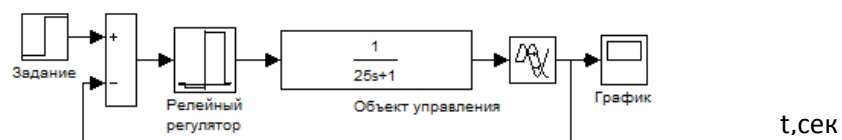


Рисунок. 3.14 Одноконтурна система з релейним регулятором

На рисунку 3.14 показана структурна схема моделі замкненої системи управління, яка складається з об'єкта управління і релейного трьохпозиційного регулятора. Об'єкт управління представлений у вигляді послідовно включених аперіодичної ланки першого порядку і ланки транспортного запізнювання.

За допомогою блоку Lookup Table запрограмуємо трипозиційний релейний регулятор з зоною нечутливості рівною 1 і шириною зони гістерезису рівної 0.5.

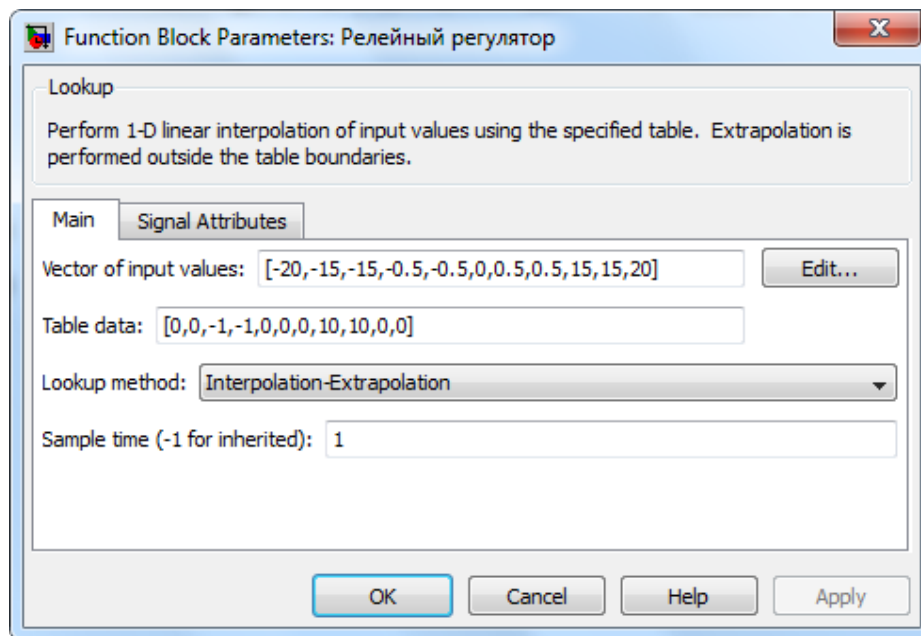


Рисунок. 3.15 Налаштування блоку **Lookup Table**

На рисунку 3.15 показаний блок Lookup Table в якому задаються налаштування для релейного трьохпозиційного регулятора: зона нечутливості і значення керу

При мінімальних значеннях часу транспортного запізнювання тривалість перехідного процесу сама мінімальна, а при збільшенні запізнювання в системі виникають значні коливання, а також значно збільшується динамічна помилка, час перехідного процесу.

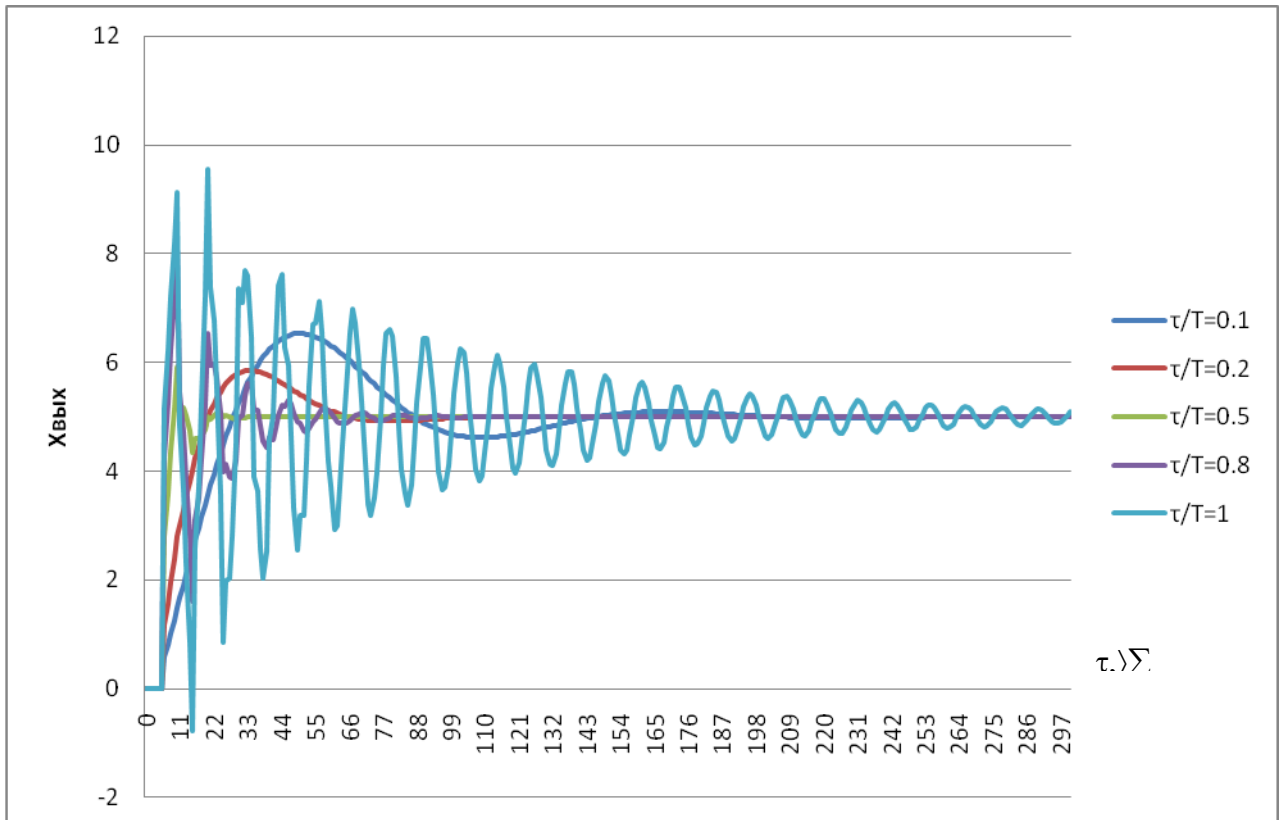


Рис. 3.16 Перехідні процеси для моделі з ПІД-регулятором при різних значеннях відносин τ/T ($\tau=\text{const}$)

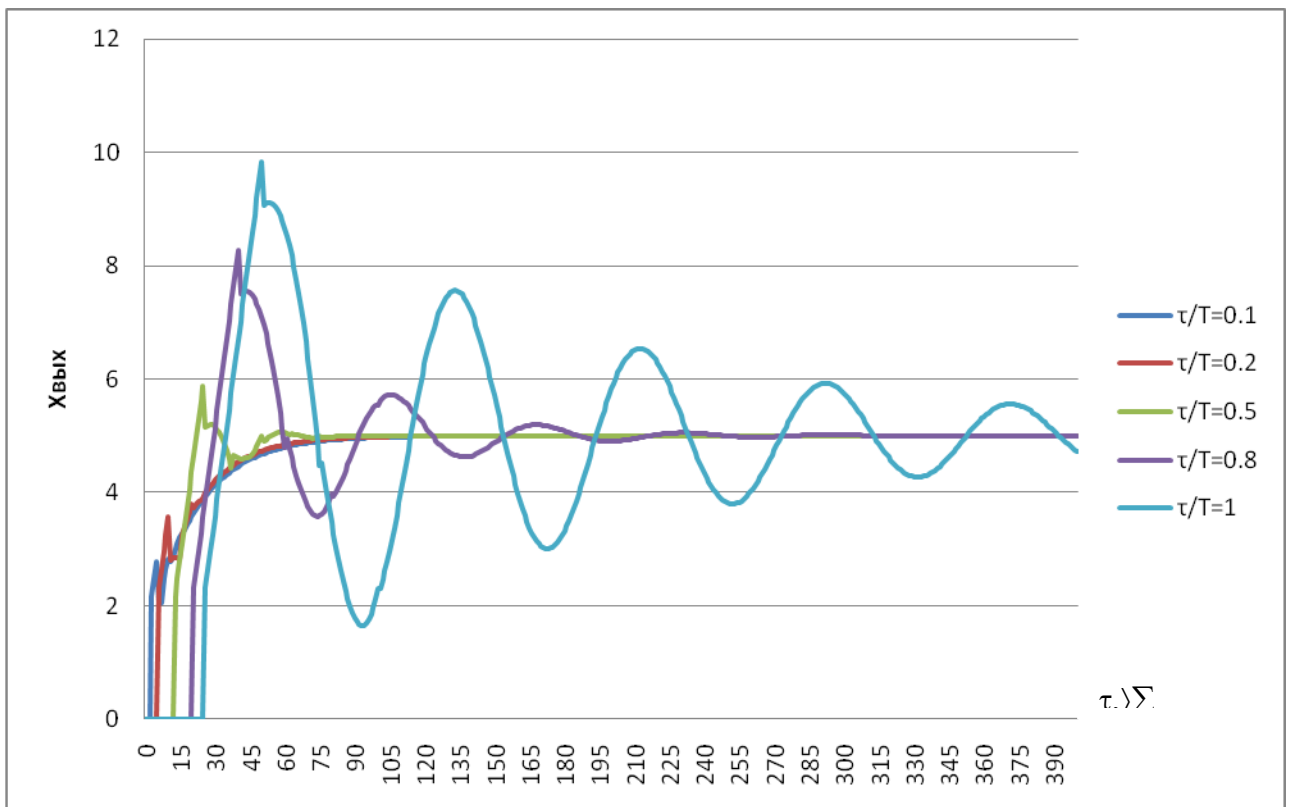


Рис. 3.17 Перехідні процеси для моделі з ПІД-регулятором при різних значеннях відносин τ/T ($T=\text{const}$)

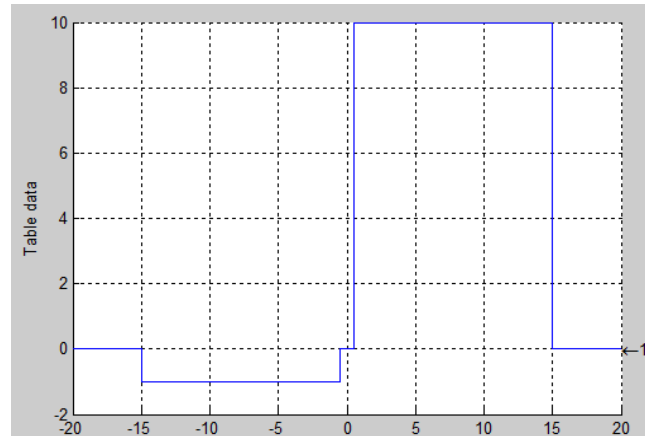


Рисунок. 3.18 Графічне подання релейного трьохпозиційного регулятора

На рисунку 3.18 графічно представлений релейний трипозиційний регулятор з зоною нечутливості рівною 1 і шириною зони гістерезису рівною 0.5.

Змінюючи по черзі один з параметрів об'єкта, а інший фіксуєчи була отримана таблиця характеристик.

Таблиця 3.4. Таблиця характеристик.

	$\tau = \text{const} (5)$					$T = \text{const} (25)$				
τ/T	0.1	0.2	0.5	0.8	1	0.1	0.2	0.5	0.8	1
T	50	25	10	6.25	5	25				
τ	25					2.5	5	12.5	20	25
Δ	0.12	0.67	1.91	2.666	3.199	0.034	0.671	1.675	2.566	2.988
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

У таблиці 3.4. представлені характеристики перехідного процесу для системи з релейним трьохпозиційним регулятором при різних значеннях відношення τ/T , а саме динамічна помилка і час перехідного процесу. Трипозиційні регулятори забезпечують добру якість регулювання для інерційних об'єктів з малим запізненням.

Процес трьохпозиційного регулювання є автоколивальних - регульована величина як в перехідному, так і в сталому режимі періодично змінюється відносно заданого значення, тобто регульована величина схильна до незгасаючих коливань.

Оцінювати якість перехідного процесу будемо тільки по динамічній помилку (Δ), а час перехідного процесу ($t_{\text{пп}}$) визначити не можна, так як отриманий автоколивальний перехідний процес. За отриманими результатами можна сказати, що оптимальна якість регулювання, яка оцінюється шляхом порівняння динамічної помилки спостерігається при значеннях значенні $\tau/T < 0.2$. Це ж вказується в усіх довідниках та літературі, що і підтверджують результати, які були отримані нами. При виході з зазначеного діапазону значень відносини τ/T буде погіршуватися якість перехідного процесу.

У таблиці показані перехідні процеси для системи з релейним регулятором. При фіксованому значенні часу транспортного запізнювання і збільшенні постійної часу об'єкта збільшується коливальність перехідного процесу і динамічна помилка. При фіксованому значенні постійної часу об'єкта і мінімальних значеннях часу транспортного запізнювання динамічна помилка сама мінімальна. При тих же умовах, але збільшенні запізнювання в системі збільшується коливальність перехідного процесу і динамічна помилка.

3.6 Висновки до розділу 3

1. Для оцінки робастності систем з різними типами регуляторів були побудовані моделі замкненої одноконтурної системи з:

- П, ПІ, ПІД-регуляторами;
- Релейним 2-х позиційним регулятором;
- Релейним 3-х позиційним регулятором;

2. Робастність була оцінена шляхом порівняння чутливості тривалості перехідного процесу і динамічної помилки до зміни параметрів.

3. Релейні закони регулювання забезпечують оптимальну якість регулювання при значенні відносини $\tau/T < 0.2$, а після виходу з цього вузького діапазону різко погіршується якість перехідного процесу.

4. Типові закони регулювання (П, ПІ, ПІД) показують оптимальне якість регулювання при $0.2 < \tau/T < 1$. Однак наявність запізнювання об'єкта різко погіршує динаміку замкненої системи і тому при відношенні $\tau/T > 0.5$ типові закони управління вже не забезпечують високу точність і швидкодію процесу регулювання.

5. Підвищити якість управління можна або шляхом зменшення запізнювання в об'єкті, або за рахунок застосування регулятора більш складної структури.

У слідстві наявності нелінійної характеристики в релейному управлінні його застосування ускладнює завдання побудови стійкої системи автоматичного регулювання, що відповідає заданим показникам якості.

З роботи [28] випливає, що за допомогою фазової площини можна отримати досить чітке уявлення про вплив ряду факторів на динаміку процесу регулювання в нелінійних системах. При розгляді релейного системи можна сказати, що зона нечутливості збільшує швидкість загасання процесу, але призводить до появи замість точки рівноваги відрізка спокою, тобто до збільшення помилки в усталеному режимі. Гістерезис в характеристиці двохпозиційного реле призводить до появи автоколивань.

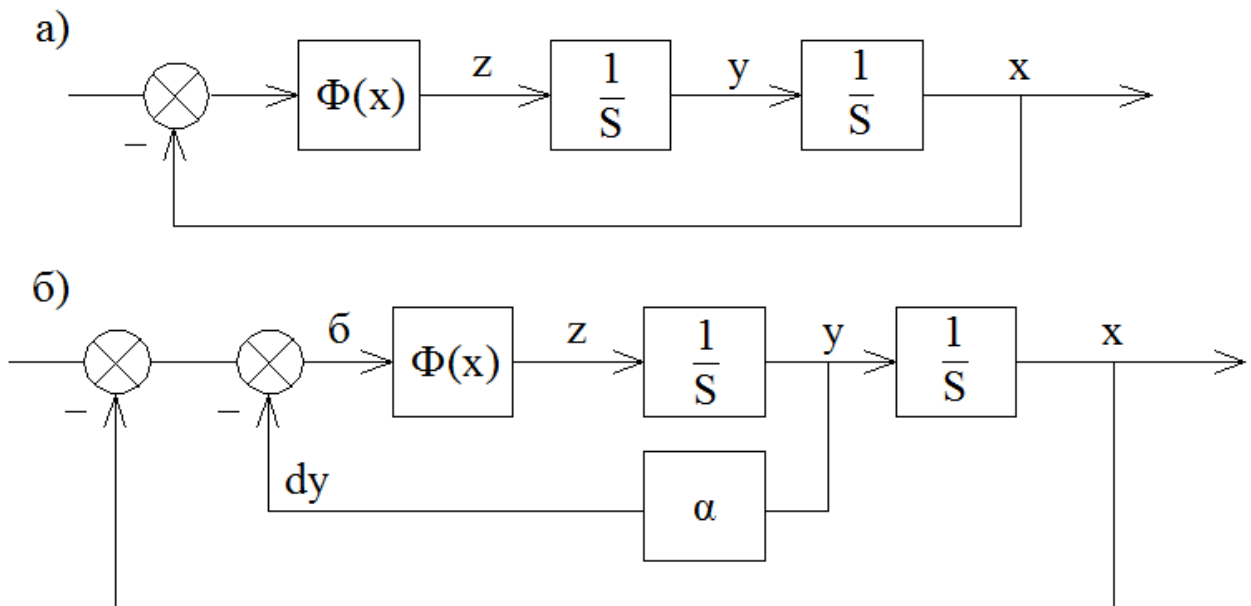


Рис. 4.1 Релейний система релейна система в ковзаючому режимі

Деякі способи стабілізації систем можна розглянути на прикладі однієї найпростішої релейного системи. Нехай дана релейна система, зображена на рисунку, 4.1. Лінійна частина цієї системи являє собою астатичну ланка другого порядку. Якщо $z = \Phi(x) = -kx$, ми будемо мати консервативну систему, в якій під впливом будь-якого поштовху виникнуть незгасаючі коливання, амплітуда яких буде залежати від величини стрибка (це - не автоколивання, параметри яких не залежать від початкових умов). Фазова картина буде являти собою сімейство вкладених один в одного еліпсів.

У випадку ідеального реле де K и C - постійні величини.

Друге з рівнянь (4.1) є рівняння параболи, тому фазові траєкторії будуть замкнутими кривими, утвореними з відрізків парабол (рисунок. 4.2, а).

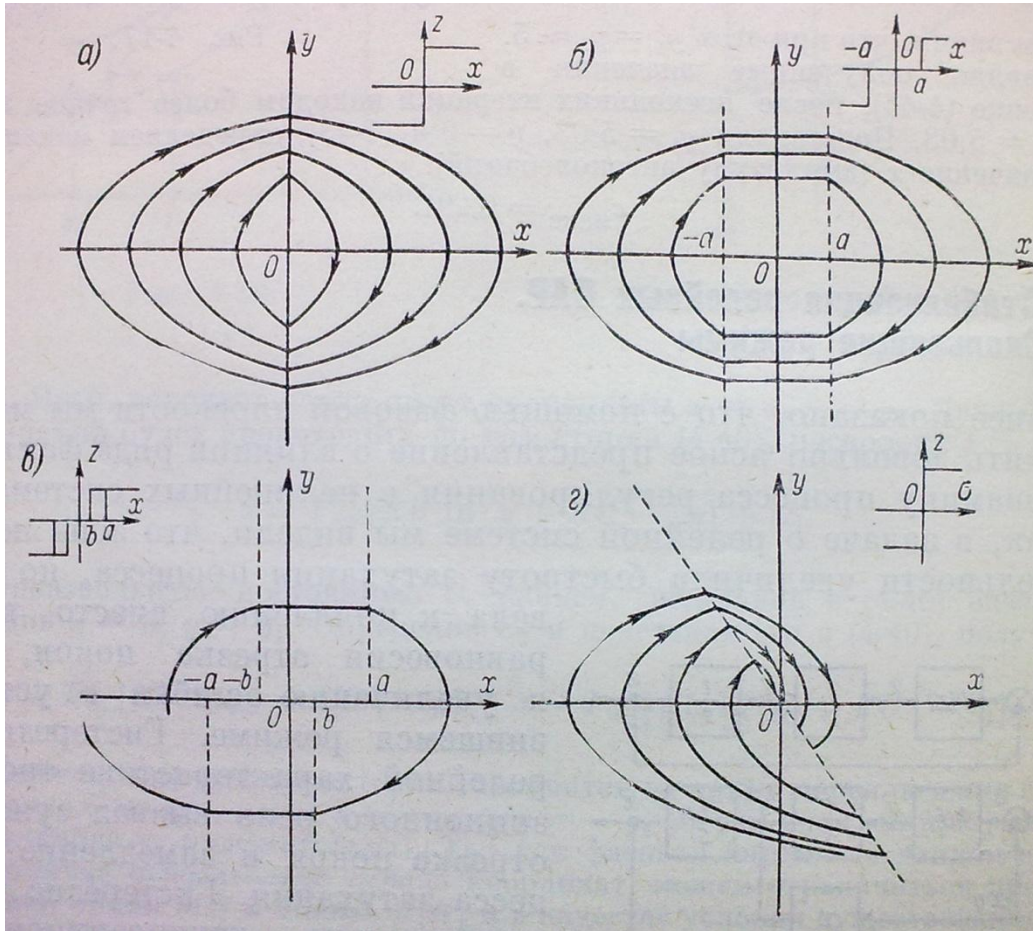


Рис. 4.2 Фазові траєкторії для релейного системи

Введення зони нечутливості призведе до того, що замкнуті траєкторії будуть складатися з параболічних і прямолінійних частин (рисунок. 4.2, б) і будуть охоплювати відрізок спокою. При наявності гістерезису в характеристиці будь-якого типу процес буде розбіжним (рис. 4.2, в). Таким чином, у всіх розглянутих випадках релейна система або знаходиться на межі стійкості, або нестійка.

Якщо реле буде спрацьовувати в залежності не тільки від координати, але і похідної координати (рисунок. 4.1, б):

У цьому випадку лінія перемикання не буде збігатися з віссю y і не буде їй паралельна. Лінія перемикання являє собою пряму нахилену до осі абсцис під кутом $\arctg()$. Навіть у випадку ідеального реле нахил лінії перемикання призведе до того, що процес стане затухаючим (рис. 4.2, г).

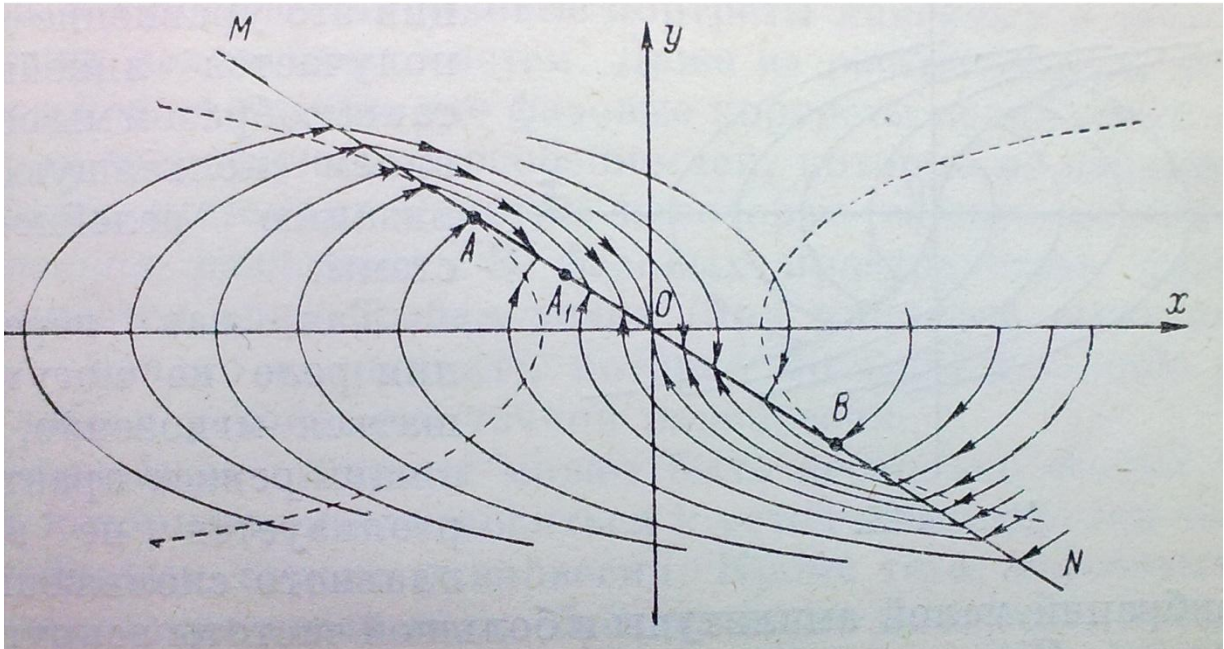


Рис. 4.3 Параболи для фазової площини ідеального реле

Разом з тим в певній частині фазової площини буде спостерігатися своєрідний рух, що одержало назву «ковзаючий режим».

Якщо розглянути систему з ідеальним реле, то буде видно, що фазові траєкторії в цьому випадку складаються з відрізків парабол. Були відзначені дві параболи, до яких лінія перемикання MN буде дотичній. Ці параболи показані на рисунку 4.3 і відзначені переривчастими лініями.

Поза від точок дотику A і B (рахуючи напрямком «за» направлення від осі ординат) фазові траєкторії будуть з одного боку виходити з точок, що лежать на лінії перемикання, а з іншого боку підходити до них. Це відповідає нормальному руху. На внутрішній ж ділянці AB між точками дотику фазові траєкторії будуть підходити до ліній перемикання з обох сторін. Точка, що зображує не зможе піти з лінії перемикання. Але вона не зможе і залишитися на одному місці, так як dx/dt у всіх точках існує. Точка A_1 , наприклад, має

позитивну швидкість і буде рухатися вправо, але вже не по фазовим траєкторіях, а по лінії перемикавання.

Процес руху по лінії перемикавання визначається не параметрами системи регулювання, а тільки рівнянням лінії перемикавання. За допомогою лінійних засобів корекції це рівняння зазвичай виходить лінійним, і таким чином ми здійснюємо ковзаючу лінеаризацію релейного системи.

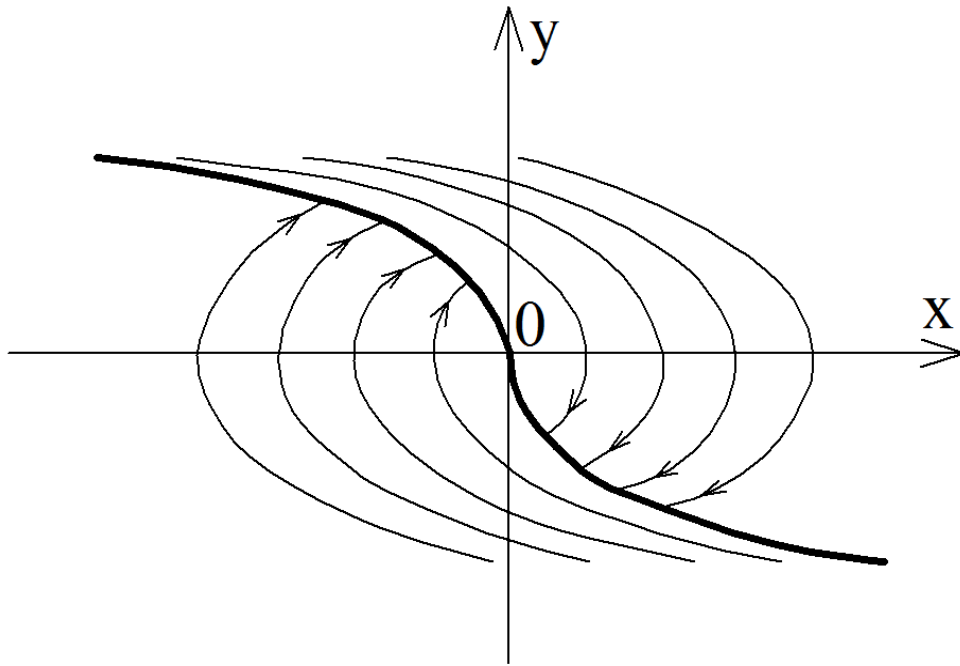


Рис. 4.4 Лінія перемикавання збігається з однією з фазових траєкторій

Так як перемикавання реле не можуть відбуватися миттєво, ковзаючий режим практично реалізується не у вигляді плавного ковзання, а у вигляді вібрацій малої амплітуди і великої частоти навколо лінії ковзання. При цьому перемикавання контакту реле відбуваються з великою частотою.

Лінія перемикавання не відноситься до фазових траєкторіях. Але можна зробити так, щоб лінія перемикавання співпала з однією з фазових траєкторій (рисунок.. 4.4). Тоді процес в системі завжди буде складатися з двох частин: підхід до лінії перемикавання по одній із траєкторій, вибір якої залежить від початкових умов, і рух по лінії перемикавання до стану рівноваги, тривалість перехідного процесу завжди буде кінцевою, причому найменшою з усіх можливих у даній системі, тобто процес буде оптимальним за швидкодією.

4.1 Релейний 2-х позиційний регулятор з ковзаючим режимом

Була розроблена модель замкнутої системи управління, яка складається з об'єкта управління і релейного двохпозиційного регулятора. Додатково додан позитивний зворотний зв'язок з релейним елементом.

Передавальна функція об'єкта:

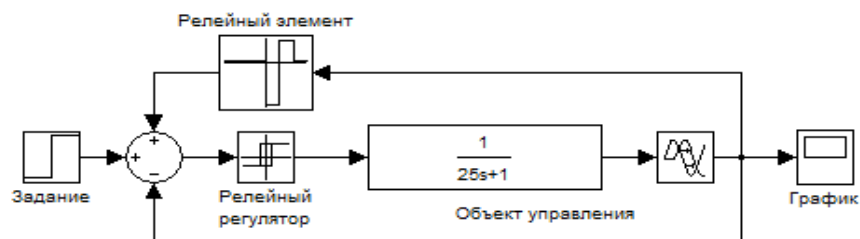


Рисунок.. 4.5 Одноконтурна система з релейним регулятором

На рисунку 4.5 показана структурна схема моделі замкненої системи управління, яка складається з об'єкта управління і релейного двохпозиційного регулятора з додатковою зворотним зв'язком. Об'єкт управління представлений у вигляді послідовно включених аперіодичної ланки першого порядку і ланки транспортного запізнювання.

Далі задаються налаштування для релейного регулятора.

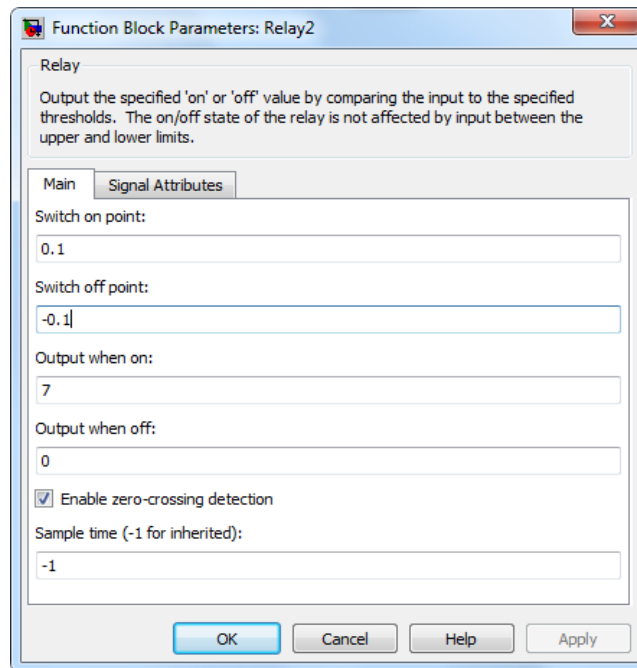


Рисунок. 4.6 Настройки для релейного двухпозиційного регулятора

Налаштування для релейного двухпозиційного регулятора показані на рисунку 4.6. В якості налаштувань задається значення включення і виключення релейного елемента, відповідні значення для кожного положення.

За допомогою блоку Lookup Table запрограмуємо релейний елемент, який буде включений в позитивний зворотний зв'язок.

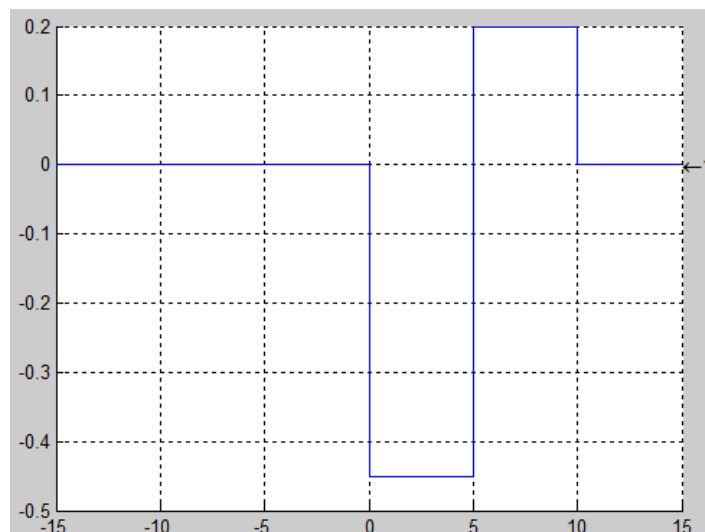


Рис. 4.7 Графічне подання релейного елемента

Змінюючи по черзі один з параметрів об'єкта, а інший фіксуючи була отримана таблиця характеристик.

Таблиця 4.1 Таблиця характеристик

	$\tau=\text{const} (5)$					$T=\text{const} (25)$				
τ/T	0.1	0.2	0.5	0.8	1	0.1	0.2	0.5	0.8	1
T	50	25	10	6.25	5	25				
τ	25					2.5	5	12.5	20	25
Δ	0	0,217	0,954	1,495	1,765	0	0,245	0,966	1,423	1,761
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

У таблиці 4.1. представлені характеристики перехідного процесу для системи з релейним регулятором у ковзаючому режимі при різних значеннях відношення τ / T , а саме динамічна помилка і час перехідного процесу.

Можна сказати, що при фіксованому значенні часу транспортного запізнювання при зменшенні постійної часу об'єкта зменшується час перехідного процесу, але з'являються коливання і значно збільшується динамічна помилка. На рисунку 4.5 представлені перехідні процеси при фіксованому значенні постійної часу об'єкта. При мінімальних значеннях часу транспортного запізнювання тривалість перехідного процесу сама мінімальна, а при збільшенні запізнювання в системі виникають коливання і значно збільшується динамічна помилка і час перехідного процесу.

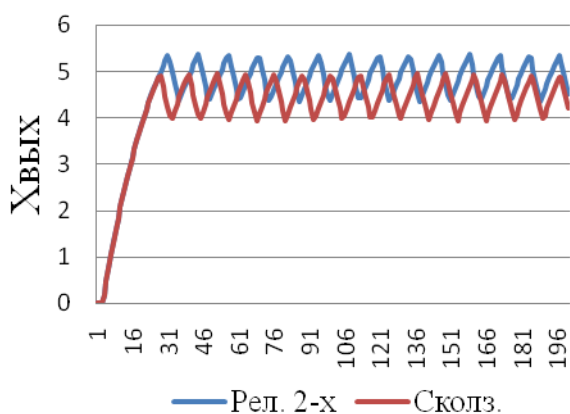


Рис. 4.4 Перехідні процеси для моделі з релейним двопозиційним регулятором у ковзаючому режимі при різних значеннях відносин τ/T ($\tau=\text{const}$)

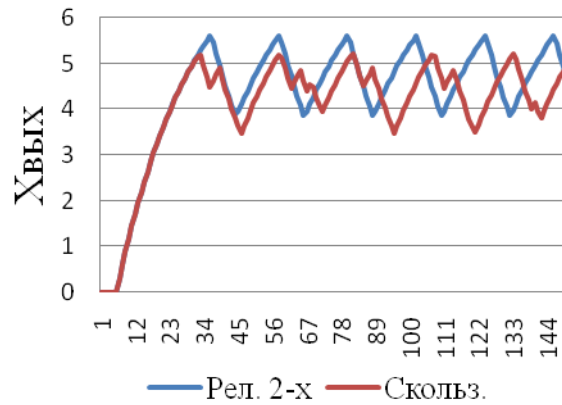


Рис. 4.5 Перехідні процеси для моделі з релейним двохопозиційним регулятором у ковзаючому режимі при різних значеннях відносин τ/T ($T=\text{const}$)

4.2 Порівняння якості перехідного процесу системи з релейним регулятором і з релейним регулятором у ковзаючому режимі

Для порівняння якості перехідного процесу системи розробленого релейного регулятора в ковзаючому режимі і типового релейного регулятора були побудовані графіки перехідних процесів для різних значень відносин τ/T .

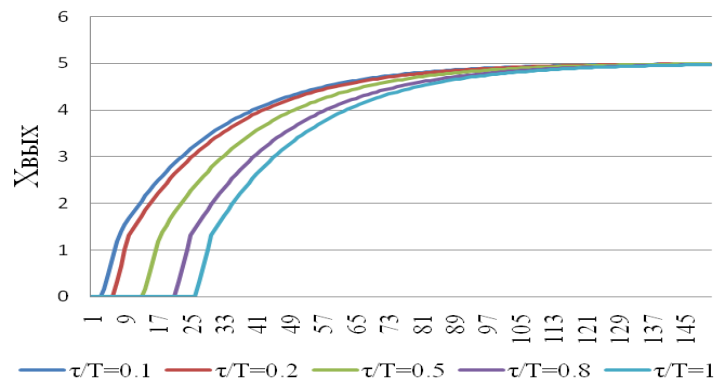


Рис. 4.6 Перехідні процеси в системі при релейному двохопозиційному регуляторі в ковзаючому режимі і типовому релейному двохопозиційному релейному регуляторі при $\tau/T=0.1$ (а), $\tau/T=0.2$ (б), $\tau/T=0.5$ (в), $\tau/T=0.8$ (г), $\tau/T=1$ (д) ($T=\text{const}$)

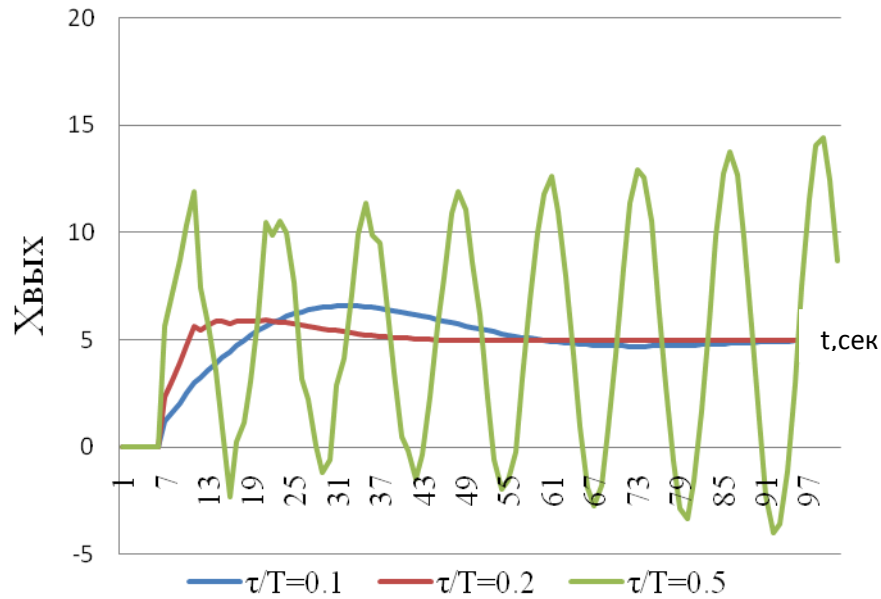


Рис. 4.7 Перехідні процеси в системі при релейному двопозиційний регулятор в ковзаючому режимі і типовому релейному двопозиційної релейному регуляторі при $\tau/T=0.1$ (а), $\tau/T=0.2$ (б), $\tau/T=0.5$ (в),

З рисунків 4.6 та 4.7 можна сказати, що в обох випадках при фіксованому значенні часу транспортного запізнювання або при фіксованому значенні постійної часу об'єкта релейний алгоритм регулювання в ковзаючому режимі краще в порівнянні зі звичайним релейним алгоритмом і значення динамічної помилки значно менше. Особливо це помітно при значенні відносини $\tau/T \leq 0.2$, при збільшенні значення відносини динамічна помилка так само краще, але відмінності в порівнянні із звичайним релейним алгоритмом незначно.

4.3 Висновки до розділу 4

1. Наявності нелінійної характеристики в релейних законах управління ускладнює завдання побудови стійкої системи автоматичного регулювання, що відповідає заданим показникам якості. У таких системах перехідний процес є автоколивальним.

2. Для поліпшення якості перехідного процесу в системах з релейним алгоритмом регулювання можна використовувати ковзаючий режим, при якому частота перемикавання релейного регулятора прагне до нескінченності. Введення ковзаючого режиму дозволяє здійснити лінеаризацію релейного системи. Поверхня ковзання вибирається така, що система, рухаючись по цій поверхні або в її околиці, має задані властивості.

3. Використання ковзаючого режиму значно зменшує значення динамічної похибки у порівнянні з типовим релейним алгоритмом. Найкраща якість перехідного процесу при значенні відносини $\tau/T \leq 0.2$.

4. Головна ознака ковзаючого режиму руху полягає в тому, що вид перехідного процесу вихідний координати не залежить від параметрів основної частини системи, а задається конструкцією і параметрами регулятора. Умова виникнення ковзаючого процесу полягає в тому, щоб фазові траєкторії можливих рухів системи зустрічалися на лінії перемикавання, підходячи до неї з обох сторін. Іншими словами форма лінії перемикавання визначає режими ковзання вихідний координати.

5 ВВЕДЕННЯ НЕЛІНІЙНОСТ В ТИПОВІ ЗАКОНИ РЕГУЛЮВАННЯ

Для підвищення робастності системи введемо нелінійність у закони регулювання, яка б автоматично виконувала перемикавання, наприклад при великих відхиленнях відбувається перехід на верхню гілку, що рівноцінно збільшенню коефіцієнту передачі, так як вони включені послідовно і регулятор буде працювати як релейний. УПо міру зменшення значення сигналу неузгодженості значення нелінійного елемента прагне до 1 і буде виконуватися звичайний закон регулювання. Нелінійний елемент включимо послідовно з типовими законами регулювання, такими як ПІ і ПІД закони.

Для оцінки отриманих результатів проведемо математичне моделювання в пакеті **Simulink** програми **Matlab**. В якості нелінійного елемента будемо використовувати блок **Coulomb & Viscous Friction**. У блоці задаємо коефіцієнт нелінійного елемента від значення якого і буде залежати кут нахилу кривої.

5.1 Введення нелінійності в ПІ-регулятор

У пакеті Simulink програми Matlab була розроблена модель замкнутої системи управління, яка складається з об'єкта управління, ПІ-регулятора і послідовно включеного з ним нелінійного елемента.

Передавальна функція об'єкта:

$$W_{об}(p) = \frac{1}{25p + 1} \cdot e^{-5p}$$

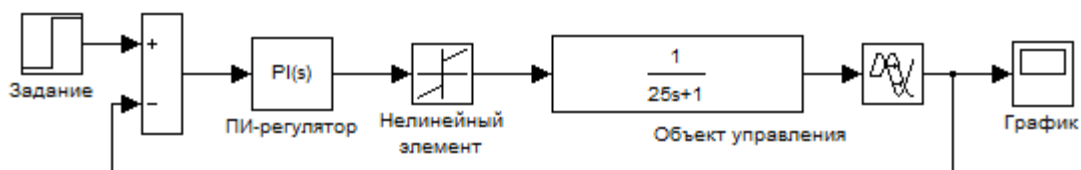


Рис. 5.1 Одноконтурна система з ПІ-регулятором і нелінійним елементом

На рисунку 5.1 показана структурна схема моделі замкненої системи управління, яка складається з об'єкта управління і ПІ-регулятора з нелінійним елементом. Об'єкт управління представлений у вигляді послідовно включених аперіодичної ланки першого порядку і ланки транспортного запізнювання.

У середині ПІ-регулятор має вигляд:

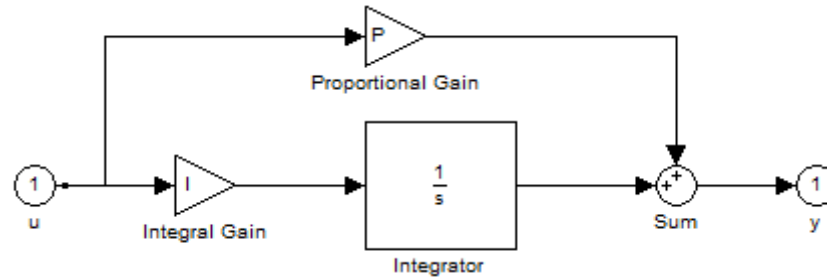


Рис. 5.2 ПІ-регулятор

Для нелінійного елемента, в якості якого виступає блок **Coulomb & Viscous Friction** задамо коефіцієнт рівний 2. Від значення коефіцієнта і буде залежати кут нахилу кривої і як результат значення керуючого впливу.

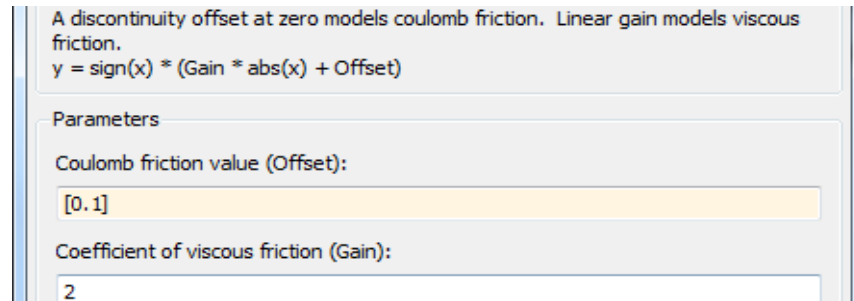
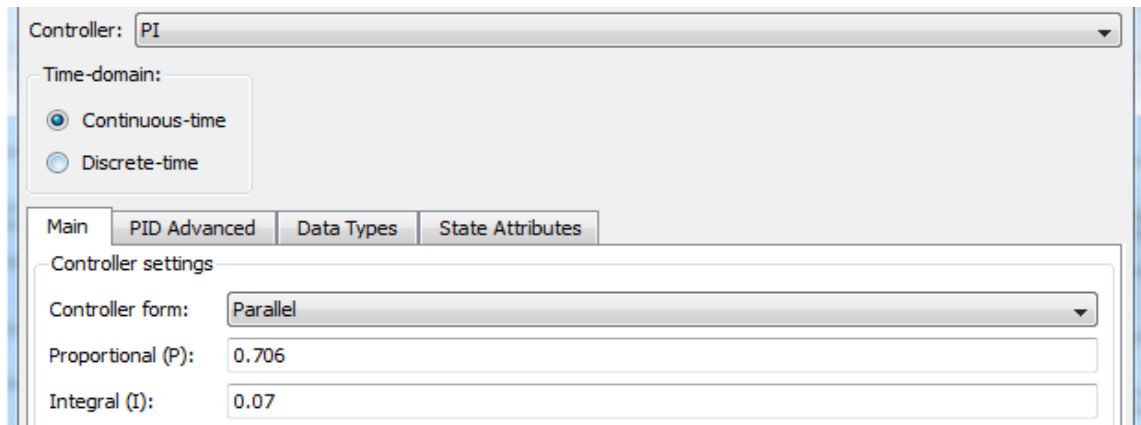
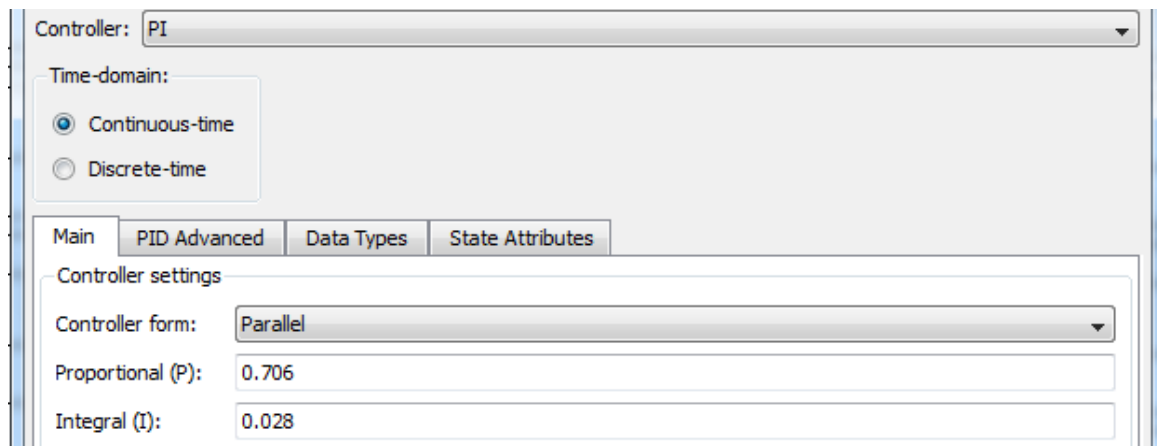


Рис. 5.3 Налаштування для нелінійного елемента

Значення параметрів налаштування для ПІ-регулятора: $K_p=0.706$, $T_i=0.07$ ($\tau=\text{const}$) и $K_p=0.706$, $T_i=0.028$ ($T=\text{const}$).



а)



б)

Рис. 5.4 Настройки для ПИ-регулятора при $\tau=\text{const}$ (а) и $T=\text{const}$ (б)

Далі, по черзі, будемо змінювати один з параметрів об'єкта, а інший фіксувати. У результаті отримаємо таблицю характеристик.

Таблиця 5.1 характеристик

	$\tau=\text{const}$ (5)					$T=\text{const}$ (25)				
τ/T	0.1	0.2	0.5	0.8	1	0.1	0.2	0.5	0.8	1
T	50	25	10	6.25	5	25				
τ	25					2.5	5	12.5	20	25
$\Delta x_{\text{вих}}^{\text{max}}$	1.965	1.356	1.07	1.64	2.013	0	0	1.075	3.161	4.567
$t_{\text{пп}}, \text{сек}$	243	93	34	62	76	69	53	85	363	1000

У таблиці 5.1. представлені характеристики перехідного процесу для системи з ПИ-регулятором і нелінійним елементом при різних значеннях відношення τ/T , а саме динамічна помилка і час перехідного процесу.

З рисунка 5.5 можна сказати, що при фіксованому значенні часу транспортного запізнювання при збільшенні постійної часу об'єкта збільшується час перехідного процесу, але зменшуються коливання. На малюнку 5.6 представлені перехідні процеси при фіксованому значенні постійної часу об'єкта. При мінімальних значеннях часу транспортного запізнювання тривалість перехідного процесу сама мінімальна, а при збільшенні запізнювання в системі виникають коливання і значно збільшується динамічна помилка і час перехідного процесу.

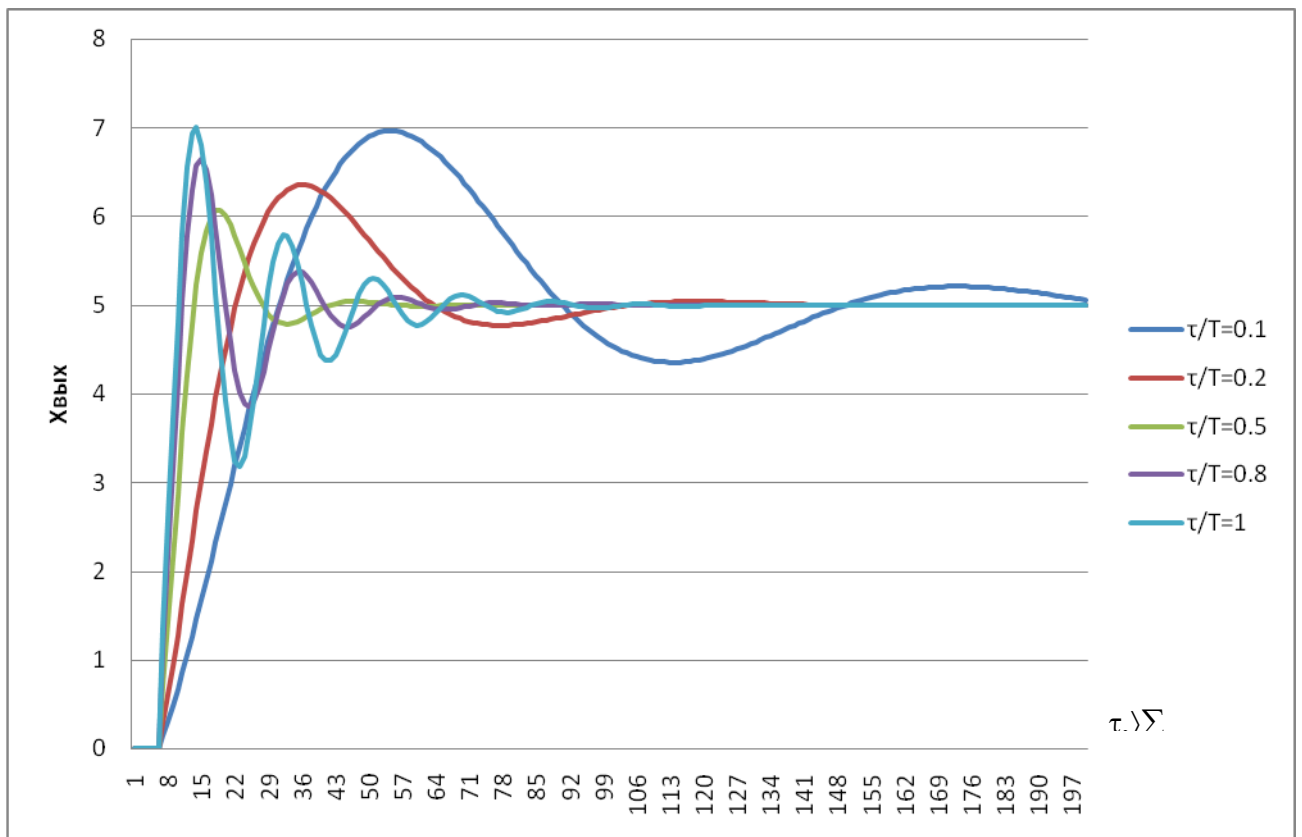


Рис. 5.5 Перехідні процеси для моделі з ПІ-регулятором і нелінійним елементом при різних значеннях відносин τ/T ($\tau=\text{const}$)

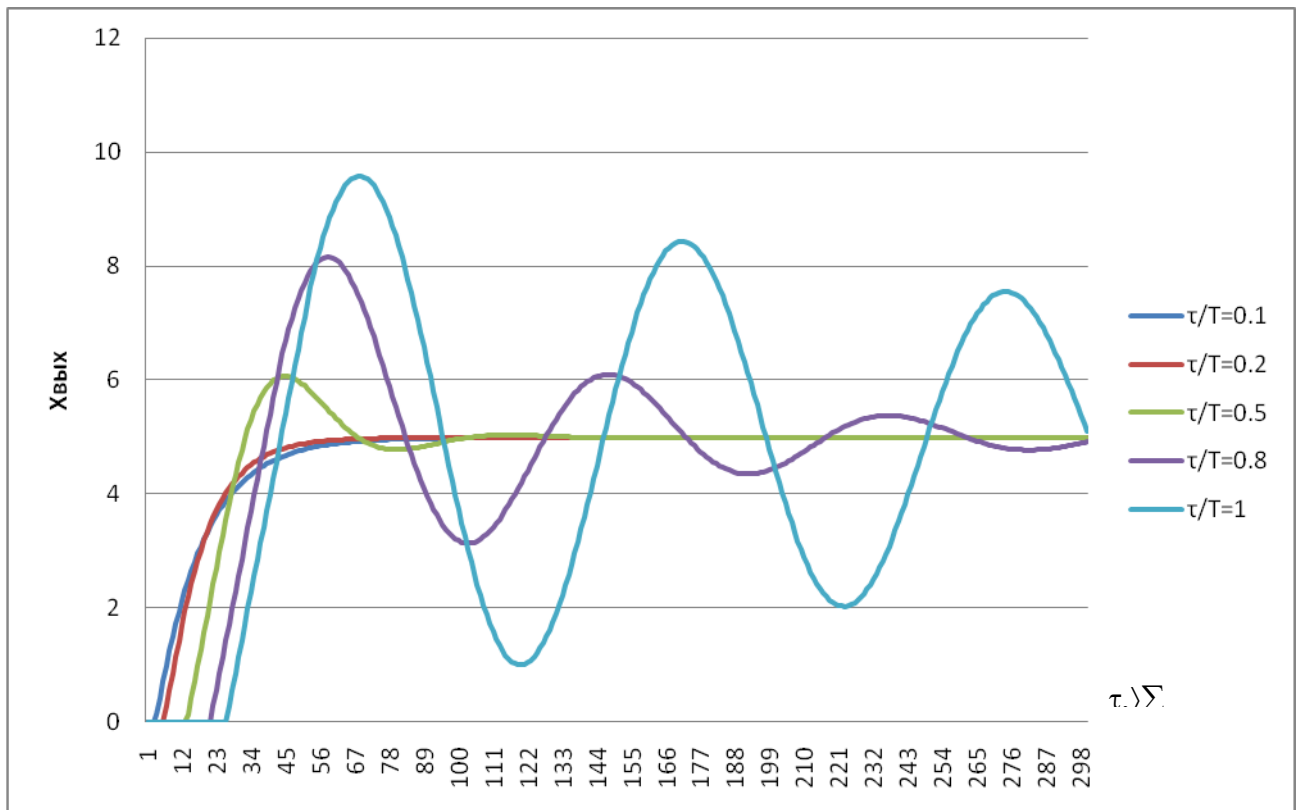
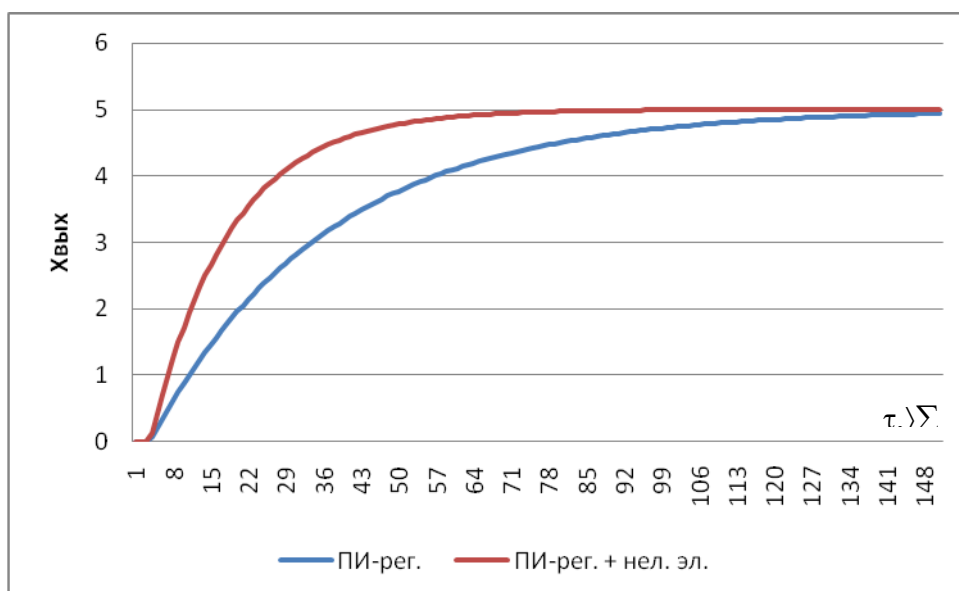


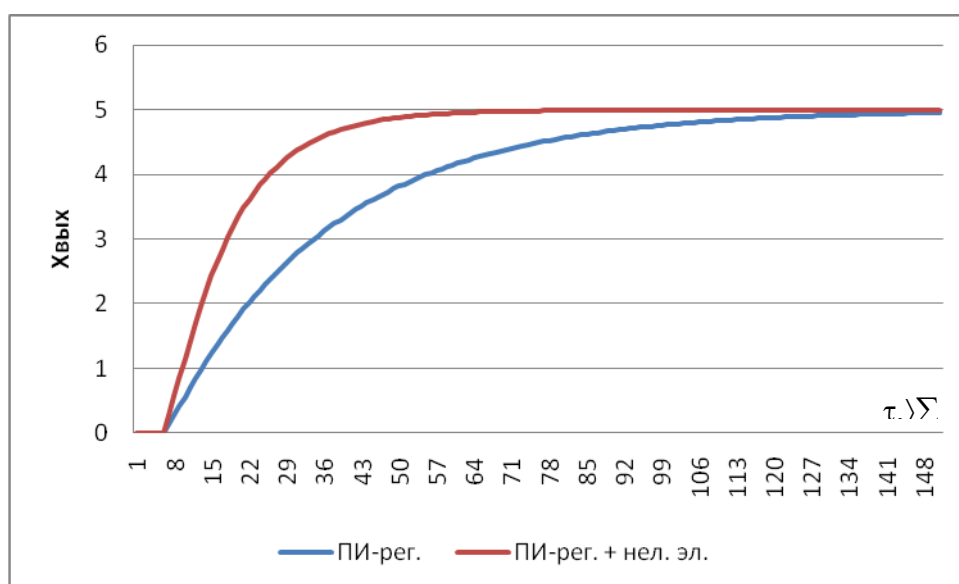
Рис. 5.6 Перехідні процеси для моделі з ПІ-регулятором і нелінійним елементом при різних значеннях відносин τ/T ($T=\text{const}$)

Порівняння якості переходного процесу системи з ПІ-регулятором, ПІ-регулятором з нелінійним елементом у законі регулювання

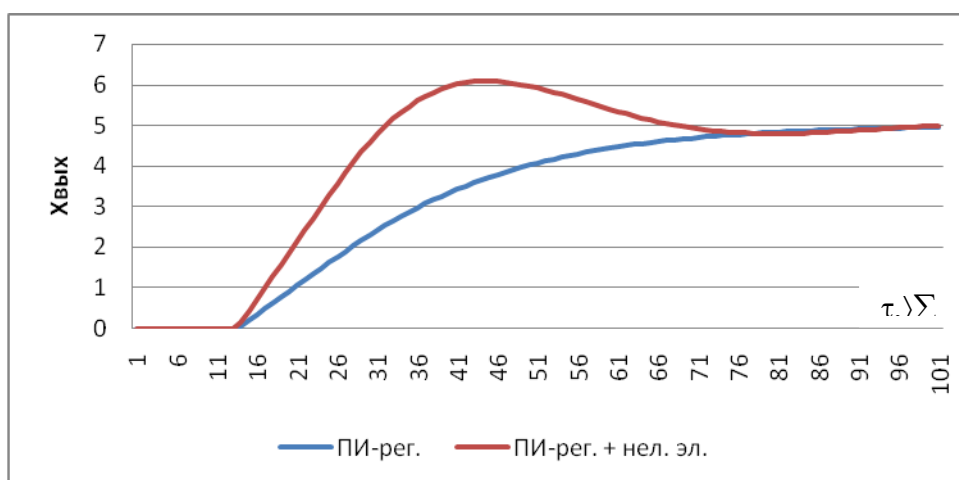
Для порівняння якості переходного процесу системи при ПІ-регуляторі з нелінійним елементом і стандартному ПІ-регулятором побудуємо графіки переходних процесів для різних значень відносин τ/T .



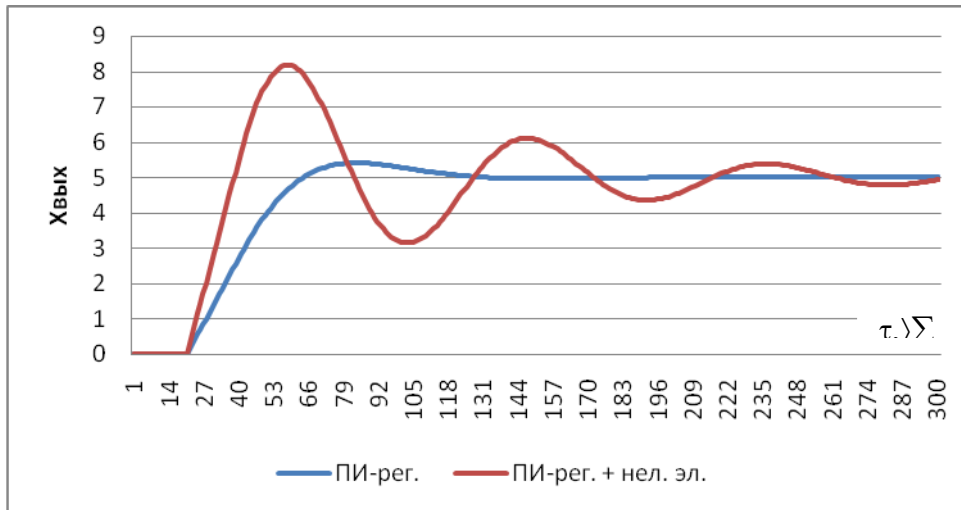
а)



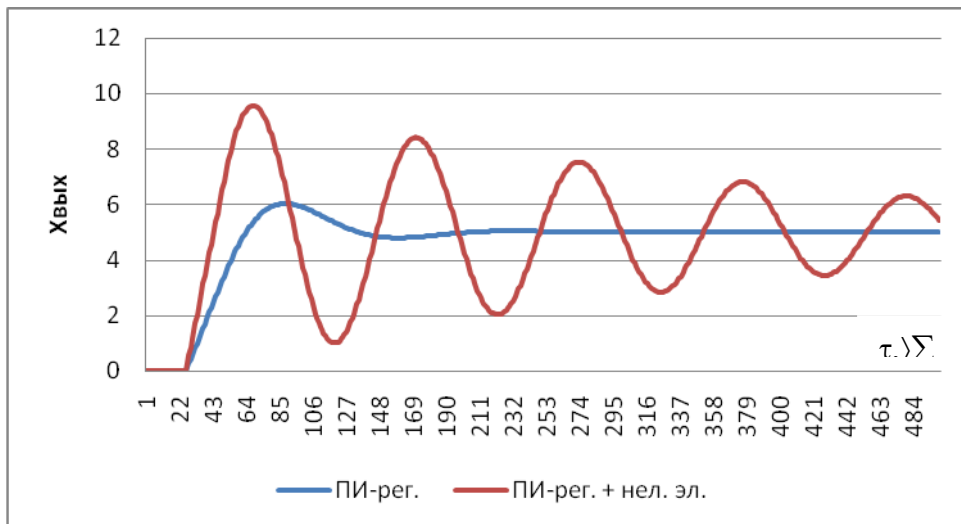
б)



в)

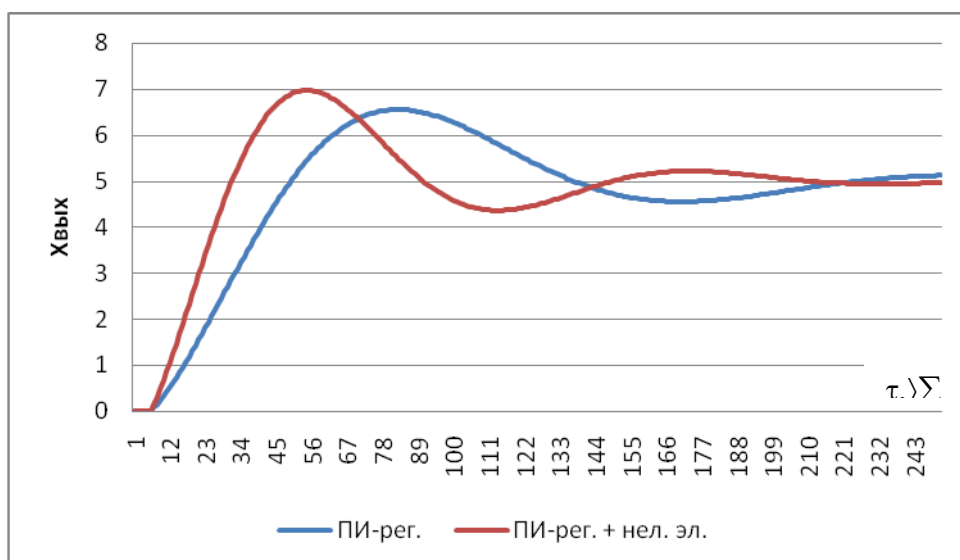


Г)

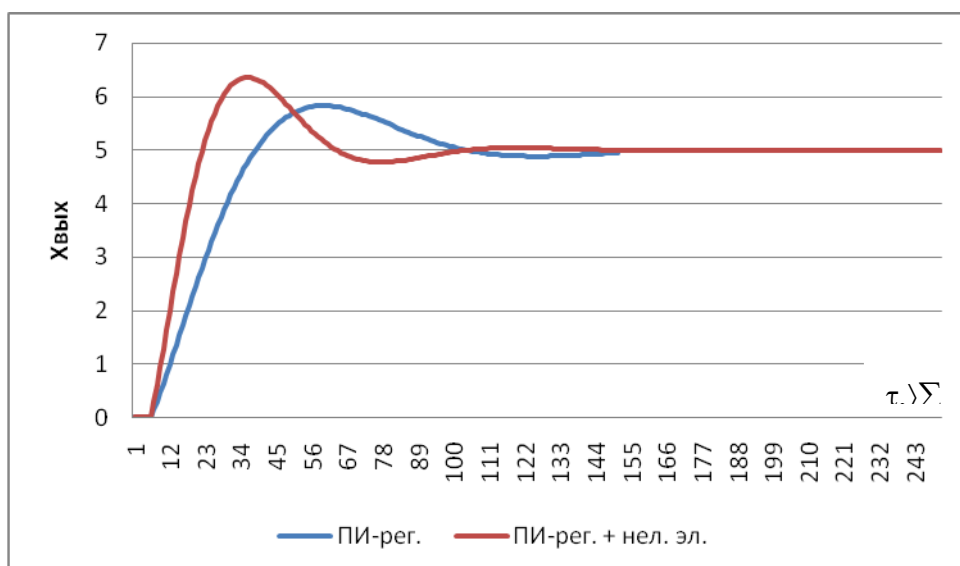


Д)

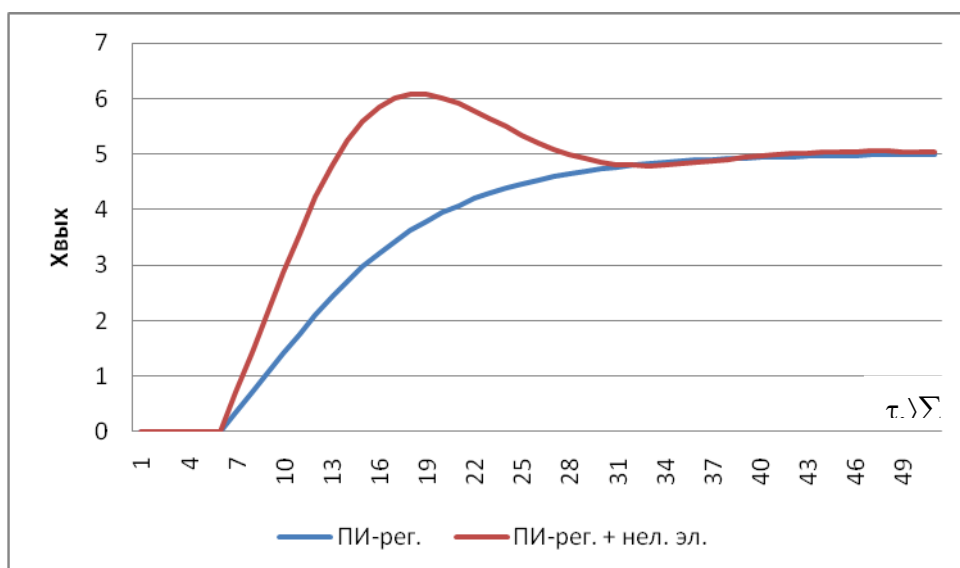
Рис. 5.7 Перехідні процеси з ПІ-регулятором і нелінійним елементом; стандартним ПІ-регулятором при $\tau/T=0.1$ (а), $\tau/T=0.2$ (б), $\tau/T=0.5$ (в), $\tau/T=0.8$ (г), $\tau/T=1$ (д) ($T=\text{const}$)



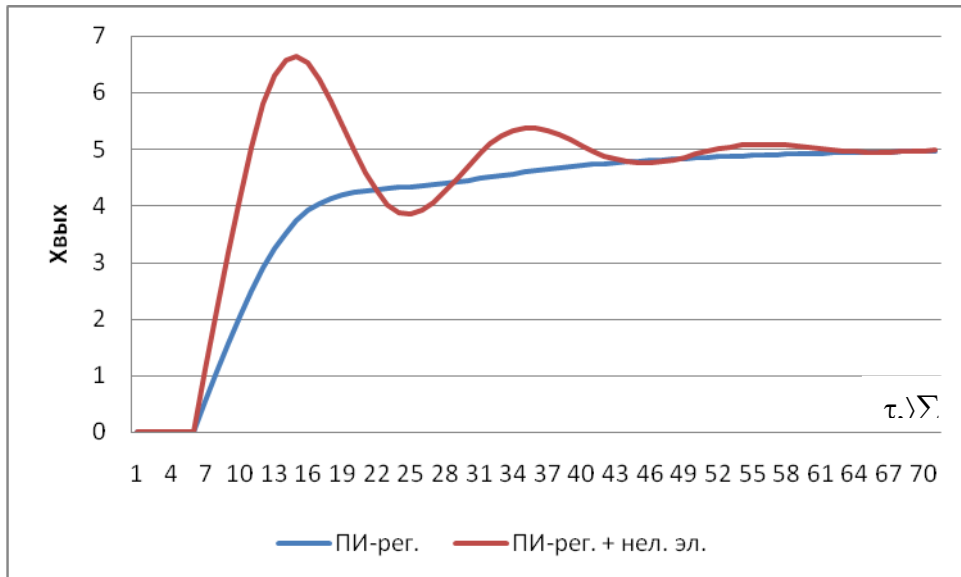
а)



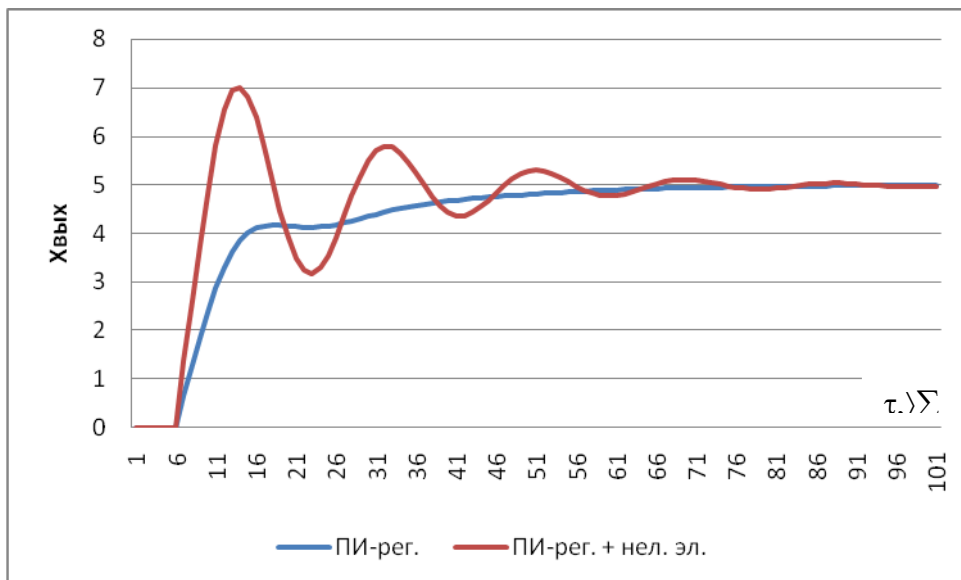
б)



в)



г)



д)

Рис. 5.8 Перехідні процеси з ПІ-регулятором і нелінійним елементом; стандартним ПІ-регулятором при $\tau/T=0.1$ (а), $\tau/T=0.2$ (б), $\tau/T=0.5$ (в), $\tau/T=0.8$ (г), $\tau/T=1$ (д) ($\tau = \text{const}$)

З рисунків 5.7 та 5.8 можна сказати, що введення нелінійного елемента призводить до того, що регулятор починає працювати як релейний і оптимальне якість регулювання спостерігається при відношенні $\tau/T \leq 0.2$. У цей діапазоні в порівнянні зі звичайним ПІ-регулятором зменшується динамічна помилка, а

при виході з цього діапазону виникають коливання і збільшується динамічна помилка.

5.3 Введення нелінійності в ПІД-регулятор

У пакеті Simulink програми Matlab була розроблена модель замкнутої системи управління, яка складається з об'єкта управління і ПІД-регулятора з послідовно включеним нелінійним елементом.

Передавальна функція об'єкта:

$$W_{об}(p) = \frac{1}{25p + 1} \cdot e^{-5p}$$

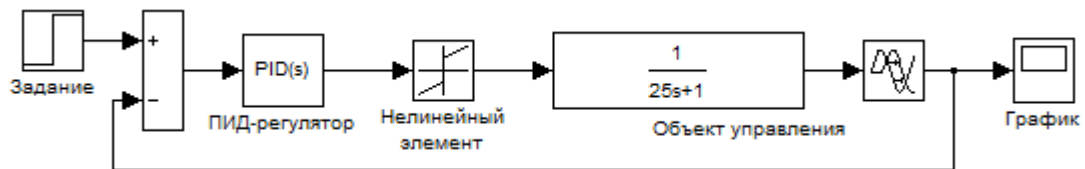


Рис. 5.9 Одноконтурна система з ПІД-регулятором і послідовно включеним нелінійним елементом

На малюнку 5.9 показана структурна схема моделі замкненої системи управління, яка складається з об'єкта управління і ПІД-регулятора з послідовно включеним нелінійним елементом. Об'єкт управління представлений у вигляді послідовно включених аперіодичного ланки першого порядку і ланки транспортного запізнювання.

У середині ПІД-регулятор має вигляд:

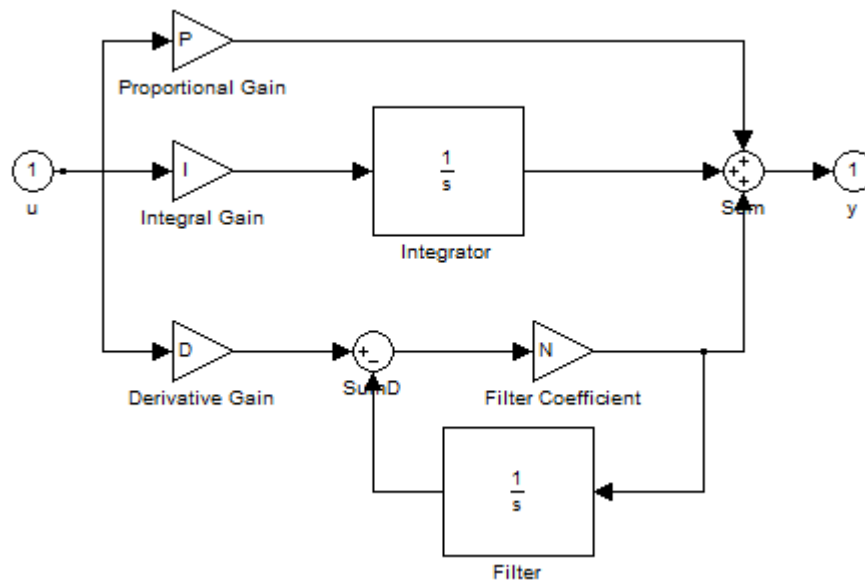


Рис. 5.10 ПІД-регулятор

Для нелінійного елемента, в якості якого виступає блок **Coulomb & Viscous Friction**, задамо коефіцієнт рівний 2. Від значення коефіцієнта і буде залежати кут нахилу кривої і як результат значення керуючого впливу.

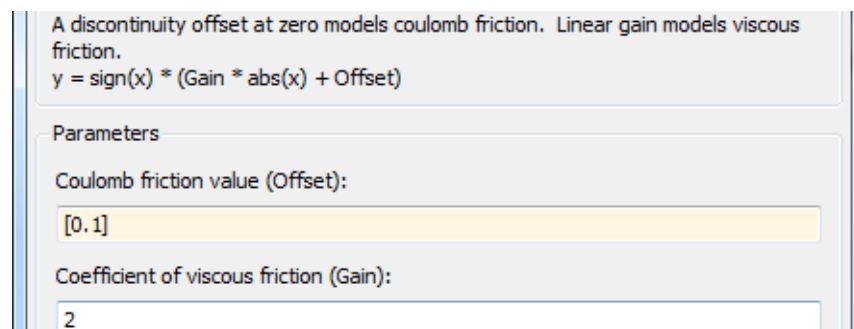
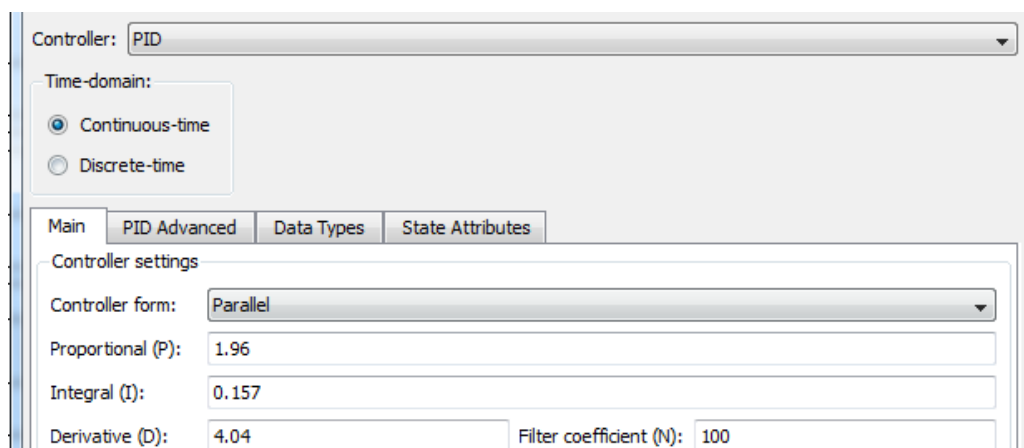
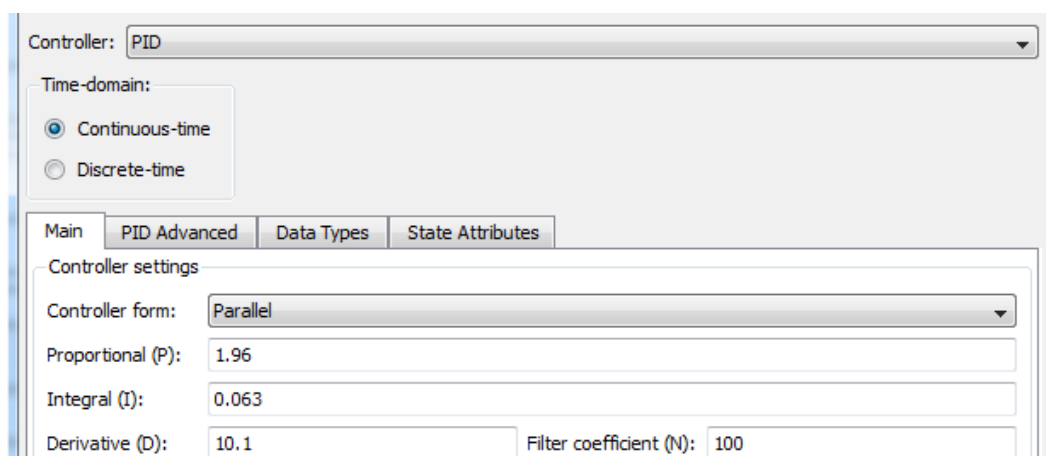


Рис. 5.11 Налаштування для нелінійного елемента

Значення параметрів налаштування для ПІД-регулятора: $K_p = 1.96$; $T_i = 0.157$; $T_d = 4.04$ ($\tau = \text{const}$) и $K_p = 1.96$; $T_i = 0.063$; $T_d = 10.1$ ($T = \text{const}$).



а)



б)

Рис. 5.12 Настройки для ПД-регулятора при $\tau=\text{const}$ (а) и $T=\text{const}$ (б)

Змінюючи по черзі один з параметрів об'єкта, а інший фіксуючи була отримана таблиця характеристик.

Таблиця 5.2 характеристик

	$\tau=\text{const}$ (5)					$T=\text{const}$ (25)				
τ/T	0.1	0.2	0.5	0.8	1	0.1	0.2	0.5	0.8	1
T	50	25	10	6.25	5	25				
τ	25					2.5	5	12.5	20	25
$\Delta x_{\text{вих}}^{\text{max}}$	0,74	2,476	–	–	–	1,577	5,937	–	–	–
$t_{\text{пт}}, \text{сек}$	50	114	–	–	–	120	36	–	–	–

У таблиці 5.2. представлені характеристики перехідного процесу для системи з ПД-регулятором і нелінійним елементом при різних значеннях відношення τ/T , а саме динамічна помилка і час перехідного процесу.

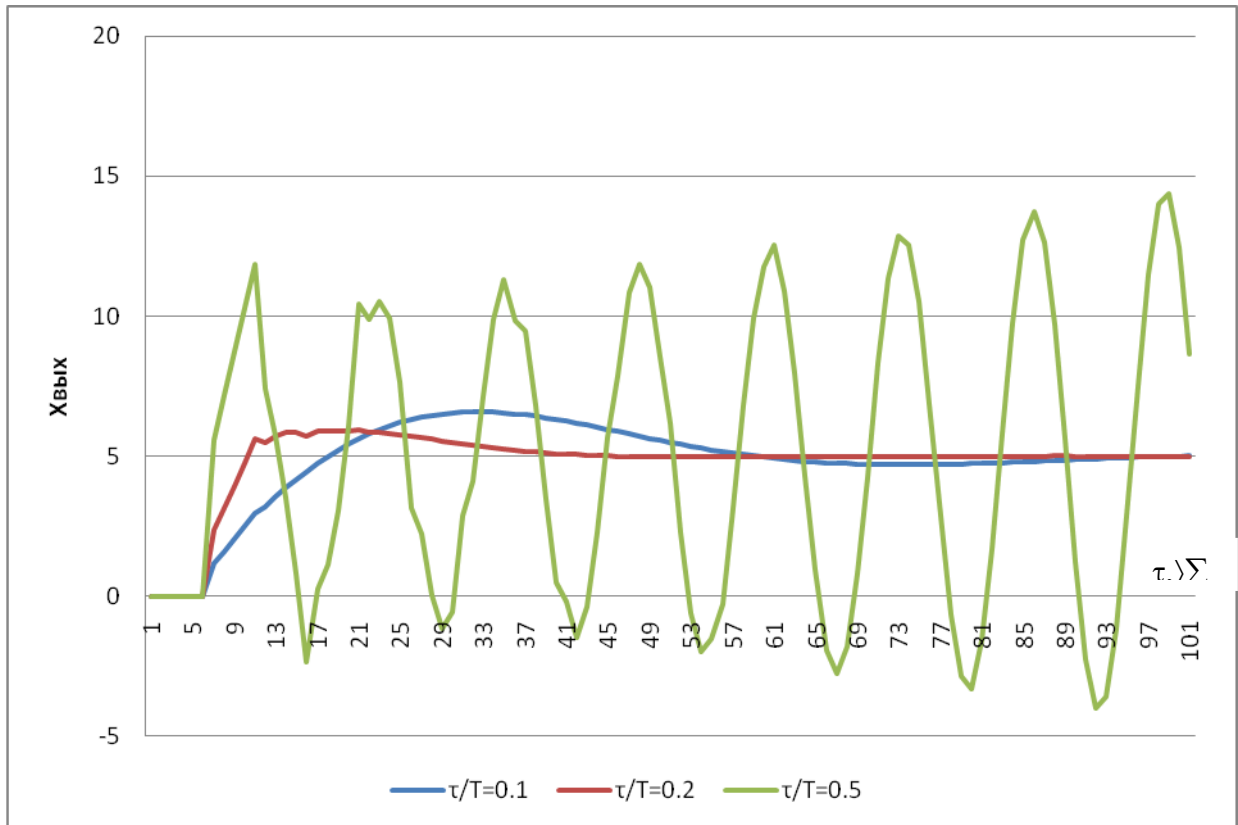


Рис. 5.13 Перехідні процеси для моделі з ПІД-регулятором і нелінійним елементом при різних значеннях відносин τ/T ($\tau=\text{const}$)

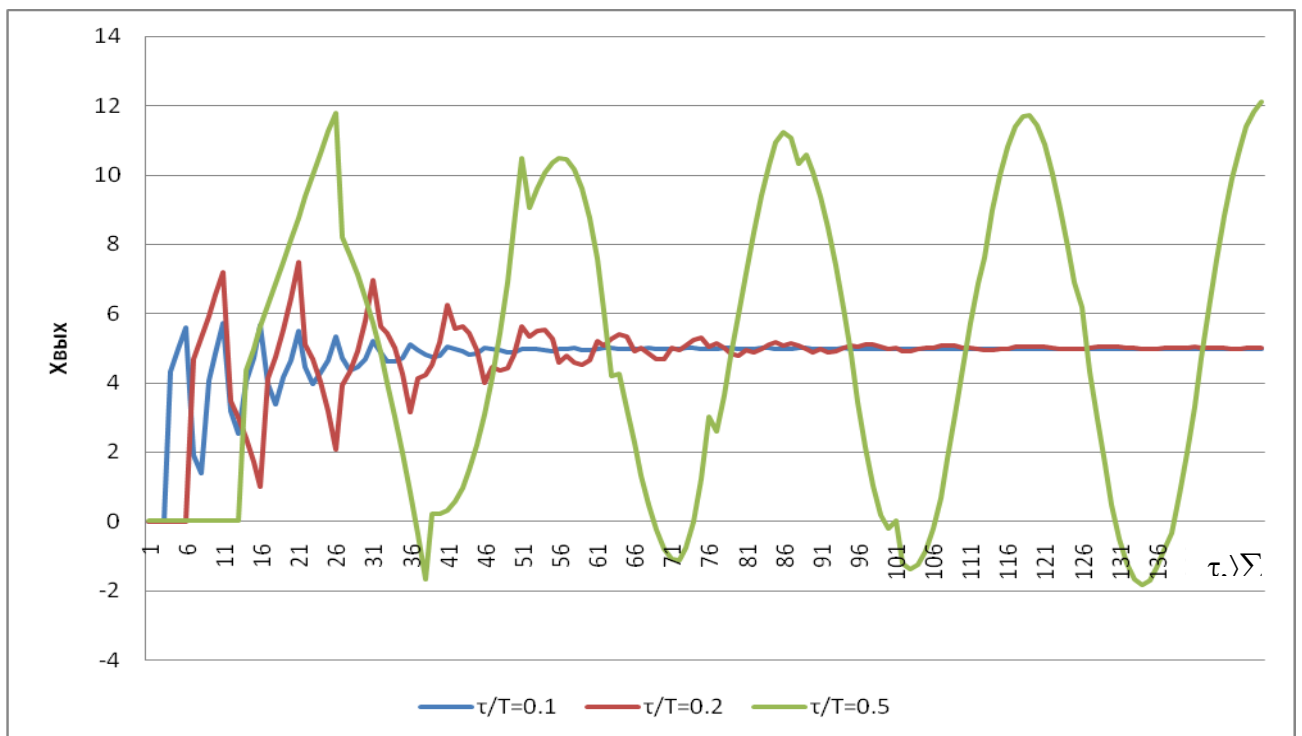
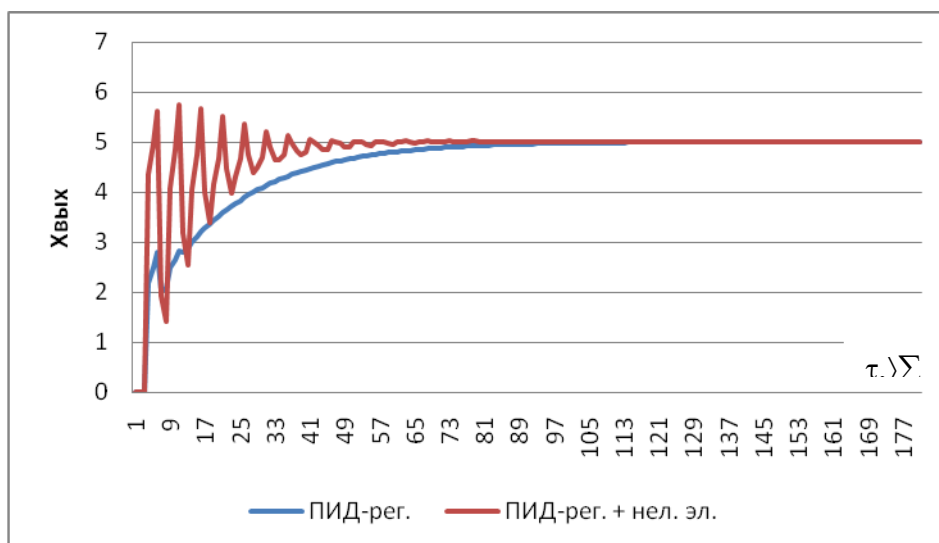


Рис. 5.14 Перехідні процеси для моделі з ПІД-регулятором і нелінійним елементом при різних значеннях відносин τ/T ($T=\text{const}$)

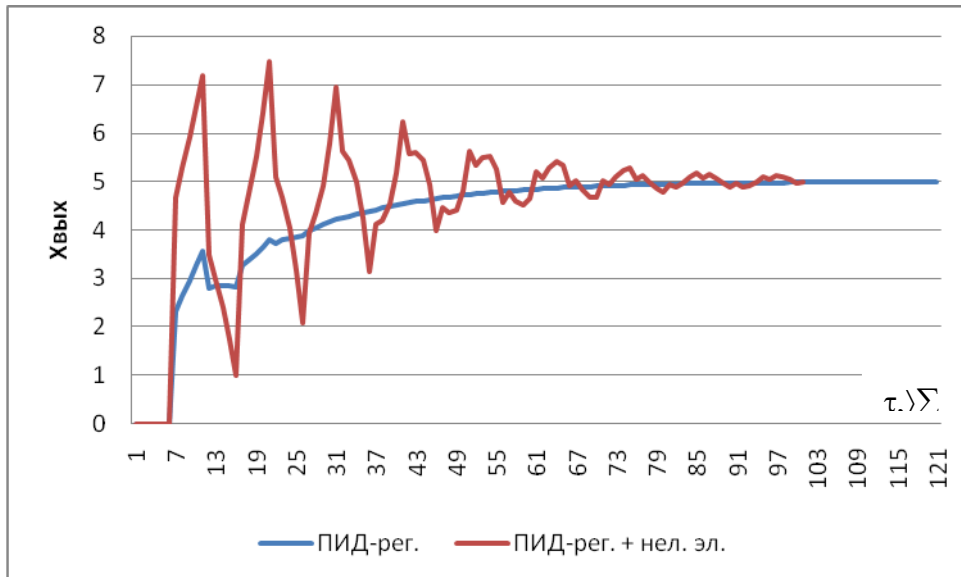
З рисунка 5.14 можна сказати, що після введення нелінійного елемента регулятор почав працювати як релейний і забезпечує задовільну якість регулювання лише при значенні відносини $\tau/T \leq 0.2$. При фіксованому значенні часу транспортного запізнювання при зменшенні постійної часу об'єкта значення відношення τ/T починає виходити з оптимального діапазону для релейного алгоритму регулювання і в системі збільшуються коливання, динамічна помилка і система навіть стає нестійкою. На рисунку 5.14 представлені перехідні процеси при фіксованому значенні постійної часу об'єкта. При мінімальних значеннях часу транспортного запізнювання тривалість перехідного процесу сама мінімальна, а при збільшенні запізнювання і коли значення відношення $\tau/T \geq 0.2$ в системі збільшуються коливання, динамічна помилка, час перехідного процесу і система стає нестійкою.

5.4 Порівняння якості перехідного процесу системи з ПІД-регулятором, ПІД-регулятором з нелінійним елементом у законі регулювання

Для порівняння якості перехідного процесу системи при ПІД-регуляторі з нелінійним елементом і стандартному ПІД-регулятору побудуємо графіки перехідних процесів для різних значень відносин τ/T .

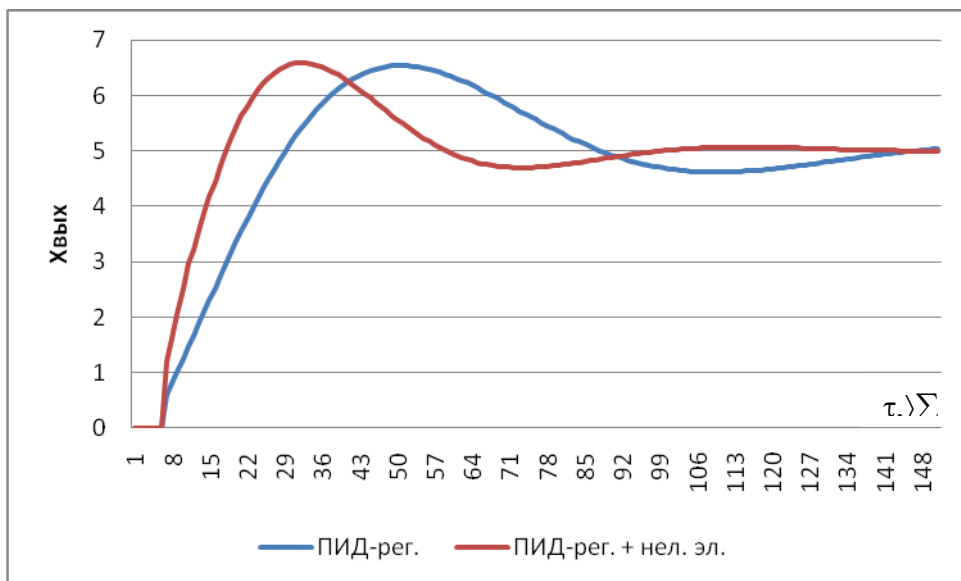


а)

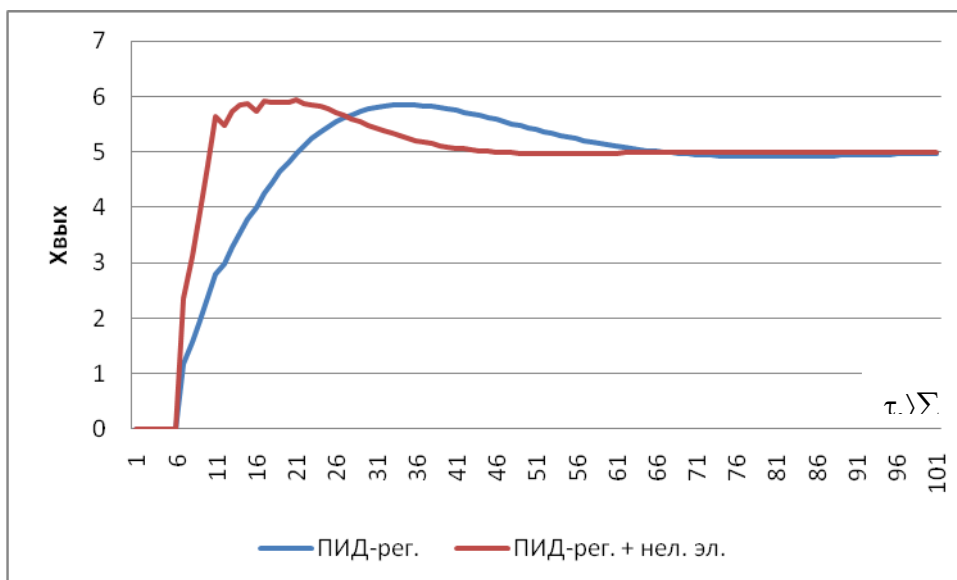


б)

Рис. 5.15 Перехідні процеси з ПІД-регулятором і нелінійним елементом; стандартним ПІ-регулятором при $\tau/T=0.1$ (а), $\tau/T=0.2$ (б) ($T=\text{const}$)



а)



б)

Рис. 5.16 Перехідні процеси з ПІД-регулятором і нелінійним елементом; стандартним ПІ-регулятором при $\tau/T=0.1$ (а), $\tau/T=0.2$ (б) ($\tau = \text{const}$)

З рисунків 5.15 та 5.16 можна сказати, що введення нелінійного елемента в більшості випадків дійсно покращує якість перехідного процесу, але тільки в діапазоні відносини τ/T при якому рекомендується використовувати релейні алгоритми регулювання. При виході з цього діапазону різко погіршується якість перехідного процесу і система стає нестійкою.

5.5 Висновки до розділу 5

1. Для підвищення робастності типових законів регулювання, таких як ПІ і ПІД закони в систему була введена нелінійність, яка автоматично виконує перемикання і при великих відхиленнях регулятор починає працювати як релейний, а при малих виконується звичайний закон регулювання. Досягається це шляхом включення нелінійного елемента послідовно з регулятором.

2. Введення нелінійного елемента призвело до того, що типові закони регулювання стали працювати як релейні, а отже забезпечують задовільну якість регулювання лише при значенні відносини $\tau/T < 0.2$, а при виході з цього діапазону погіршується якість регулювання і система стає нестійкою.

3. У діапазоні $\tau/T < 0.2$ нелінійний елемент покращує якість за рахунок зменшення часу перехідного процесу, але збільшує динамічну помилку і виникає коливальність в початковий момент часу, коли великий сигнал неузгодженості і регулятор працює як релейний.

6 АНАЛІЗ НЕЧТКИС СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ З ПОЗИЦІЇ ОЦІНКИ РОБАСТНОСТІ

Поняття "fuzzy-logic" (у перекладі з англійської - нечітка, розмита логіка) введено американським математиком Л.А. Заде (L.A. Zadeh), який запропонував теорію нечітких множин, на основі якої можна побудувати нечіткі аналоги всіх математичних понять і створити необхідний формальний апарат для моделювання людських міркувань і людського способу розв'язання задач. Нечітка множина (fuzzy set) - сукупність елементів довільної природи, щодо яких не можна з повною визначеністю стверджувати - чи належить той чи інший елемент даної сукупності чи ні.

В даний час спостерігається інтенсивний розвиток і практичне застосування нечітких систем для цілей управління і регулювання багатьох технічних об'єктів.

Переваги нечіткої логіки, які явно проявляються в нечіткому управлінні, полягають насамперед у тому, що нечітка логіка дозволяє вдало представити мислення людини, а саме способи прийняття рішень людиною, і способи моделювання складних об'єктів засобами природної мови.

6.1. Загальні відомості про нечіткі системи регулювання

У роботі [1] говориться, що теорія нечітких множин має справу з "людськими знаннями", які прийнято називати експертною інформацією. Характерним для нечіткого управління є безпосереднє застосування якісно сформульованих експертних знань для генерування керуючих впливів на об'єкт управління. Знання про взаємодію нечіткого регулятора з об'єктом (процесом) управління подаються у формі правил виду: **ЯКЩО** (вихідна ситуація), **ТО** (відповідна реакція). Такі правила відповідають простій формі людських взаємодій. При цьому аналізовані параметри розглядаються в якості лінгвістичних змінних, які оцінюються якісними термами.

В даний час спостерігається інтенсивний розвиток і практичне застосування нечітких систем для цілей управління і регулювання багатьох технічних об'єктів.

У ході прийняття рішення людина легко опановує ситуацією, розділяючи її на події, знаходить рішення в складних ситуаціях шляхом застосування для окремих подій відповідних правил прийняття рішення, на підставі минулого досвіду майстерно наділяє об'єкт відмітними ознаками і приходить до загального рішення. Рішення приймається не на основі уніфікованих вартісних критеріїв, а з використанням великої кількості вартісних критеріїв, нерідко суперечать один одному. У разі неповної інформації можлива допомога в ухваленні рішення з використанням висновків. У нечіткому управлінні вводяться подібні методи прийняття рішень, властиві людині, у формі розподілених по окремих станів і цілям правил управління і нечітких висновків. Людина в повсякденній діяльності ніколи не користується формальним моделюванням на основі математичних виразів; він не шукає однієї мови, що описує всі. Мова, яку використовує людина - це нечіткий природна мова. Отримана модель не є уніфікованою: вона або описує властивості фрагментів об'єкта, або є набором кількох локальних моделей, поставлених у певні умови. Самі локальні моделі не використовують числових значень. Володіючи деякою спільністю, вони прості для розуміння на якісному рівні. При нечіткому управлінні за цим зразком створюють модель дій оператора за допомогою висловлювань типу ЯКЩО-ТО, використовуючи звичайні слова і слова ці нечіткі. Замість того щоб вибудовувати ланцюжок числових значень, людина проводить нечіткі межі типу "малий", "середній", "великий" і т.п. Завдяки застосуванню нечітких слів можна легко уявити випадки з неповними даними [6].

Застосування теорії нечітких множин при проектуванні регуляторів дозволяє підвищувати їх "інтелект", компетентність, наблизивши до інтелекту людини. "Олюднення" нечітких регуляторів є однією з центральних проблем у сучасній теорії і техніці автоматичного управління [8].

Можна виявити три особливості нечіткого управління [6].

Перша полягає в тому, що правила нечіткого управління, будучи умовними висловлюваннями типу ЯКЩО-ТО є логічними. Використання правил здійснюється через механізм логічних висновків. Логічне управління означає, що логіку управління експерта легко уявити, і різноманітним передумов можна поставити у відповідність деякий дію. Для реального устаткування це не тільки використання при управлінні повної інформації на відміну від класичної теорії управління, але й зміна режимів керування залежно від умов, наприклад, часу і значень параметрів. У багатьох видах реального обладнання необхідно приділяти особливу увагу різним режимам роботи, наприклад, процедурою запуску. У цьому випадку для автоматизації зручно використовувати нечітке управління, оскільки можна описувати правила у формі ЯКЩО-ТО однаково чиним і для режиму запуску, і для режиму нормальної роботи.

Друга особливість - паралельне управління. Самі нечіткі методи управління істотно різняться. Традиційні методи управління - це або класичні, або сучасні методи, в яких узагальнене правило управління представляється за допомогою однієї формули, в той час як при нечіткому управлінні використовується велика кількість приватних правил. Кожне правило діє у певній галузі інформаційного простору, використовуваного при управлінні. Для кожної локальної області розподіленого інформаційного простору доцільно створювати окремі правила управління. Крім того, якщо є багато регульованих величин, для кожної з них можна створити окремі правила управління. Аналогічно, якщо є багато цілей управління, для кожної мети бажано створювати правила управління. Класичне управління істотно обмежувало теоретично можливі різновиди цілей у зв'язку з необхідністю представляти мету узагальненою функцією. При нечіткому управлінні необхідність в цільових функціях і у вирішенні завдань оптимального управління відпадає, тому можна успішно справлятися з усім різноманіттям цілей і навіть з взаємно суперечать цілями.

Третя особливість нечіткого управління полягає в тому, що з'являється можливість організувати управління у формі діалогу з оператором, оскільки правила управління записуються словами у вигляді виразів ЯКЩО-ТО.

Вихідною передумовою до формування системи управління на базі теорії нечітких множин є те, що стан складної системи та управляючі в САУ розглядаються як лінгвістичні змінні, що оцінюються якісними термами (засобами природної мови). Кожен терм розглядається як нечітка множина і формалізується за допомогою відповідної функції належності. Формування керуючого впливу здійснюється на підставі певного набору правил (лінгвістичні правила управління), що встановлюють засобами природної мови зв'язок між станом динамічної системи та керуючим впливом в САУ. Визначення конкретного значення керуючого впливу здійснюється шляхом реалізації процедури переходу від результуючої функції належності, яка описує лінгвістичну змінну керуючий вплив, до конкретного числового значення. У результаті неточність (нечіткість) опису динамічного поведінки об'єкта компенсується більш високим за рівнем алгоритмом управління завдяки обліку, в тому числі, і якісних ознак динамічної поведінки об'єкта управління [8].

Очевидно, що для реалізації управління на базі теорії нечітких множин та нечіткої логіки необхідно пристрій, що формує керуючі впливи на об'єкт управління - нечіткий регулятор (регулятор, що працює на базі нечіткої логіки). У деяких джерелах управління на базі теорії нечітких множин та нечіткої логіки розглядають у контексті методології штучного інтелекту. У роботі [7] розглядається структура інтелектуальної системи управління з нечітким регулятором. Відзначається, що основу проектування інтелектуальних нечітких регуляторів становить конструювання знань з використанням методів представлення та пошуку знань. Тому пропонується створення нечітких промислових регуляторів здійснювати на засадах теорії штучного інтелекту.

У роботі [9] нечіткі регулятори розглядаються як одна з базових моделей регуляторів інтелектуальних систем управління (поряд з нейронними регуляторами і генетичними алгоритмами). При цьому наголошується, що

значним обмеженням практичного застосування регуляторів інтелектуальних систем управління є відсутність формальних підходів, властивих теорії автоматичного управління, для вирішення завдань аналізу і синтезу систем управління. Проте відзначається, що нечіткі регулятори мають найбільші "здібностями" до формалізації процесів проектування.

Існує підхід, в рамках якого, управління на базі теорії нечітких множин та нечіткої логіки не розглядається в контексті методології штучного інтелекту. У роботі [12] зазначено, що існує деяка аналогія між правилами ЯКЦО-ТО штучного інтелекту і нечіткою логікою. Але штучний інтелект, зазначається далі, є процес обробки символів, а нечітка логіка - ні. У штучному інтелекті нейронна мережа є сукупність даних і висновків у вигляді спеціальних структур. Кожній вхідній величиною призначається відносний, дискретний ваговий коефіцієнт. Зважені дані точно визначеним способом формують мережу для прийняття рішень. На відміну від цього в нечіткій логіці вагові функції безперервно визначені на множині значень приналежності. У багатьох випадках регулятор на базі нечіткої логіки здатний виробляти рішення швидше, ніж експертна система на основі правил ЯКЦО-ТО.

Між тим, все більший інтерес представляє можливість розробки так званих гібридних інтелектуальних систем управління [13,14]. У цих системах, іменованих ще нейро-фазі системами, об'єднані властивості штучних нейронних мереж до навчання і наочність нечіткої логіки (фазі-логіки). Характерними особливостями цих систем є: можливість комбінування числових даних і нечітких знань, здатність до навчання, можливість інтерпретації як нечіткої моделі, додаткова оптимізація опису, яка базується на правилах з використанням даних.

6.2 Принцип роботи нечіткого регулятора

Функціональна схема системи автоматичного керування на базі нечіткої логіки (системи керування з нечітким регулятором або системи фазі-управління) наведена на рисунку 6.2.1.

Схема складається з пристрою порівняння, нечіткого регулятора НР, об'єкта управління ОУ і ланцюга зворотного зв'язку. Нечіткий регулятор (фазі-регулятор, fuzzy-controller) включає три основні блоки - блок фаззифікації (fuzzyfication), блок формування логічного рішення (inference) і блок дефаззифікації (de-fuzzyfication).

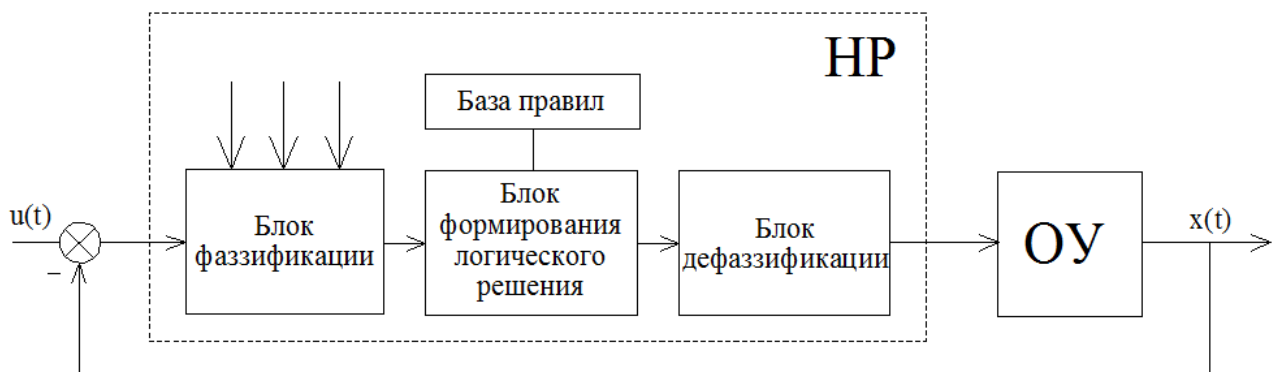


Рис. 6.2.1 Функціональна схема системи автоматичного керування на базі нечіткої логіки

У блоці фаззифікації вхідні лінгвістичні змінні якісно характеризуються терм-множинами (лінгвістичними величинами), такими як негативна, негативна середня, негативно мала, нульова, позитивно мала, позитивно середня, позитивна, які описуються на універсальній множині U функціями належності (ФП). ФП визначає ступінь приналежності кожного елемента u безлічі U числом між 0 і 1, яке називають ступенем істинності розглянутої лінгвістичної змінної даному терму. Діапазони зміни вхідних змінних і поточні значення вхідних змінних перераховуються (відображаються) на єдину універсальний множину. Як правило, кількість термів для кожної лінгвістичної змінної вибирається одним і тим же. Таким чином, для кожного поточного значення

вхідний зміною визначається ступінь приналежності (величина істинності) до тих терм (нечіткі підмножини), які характеризують конкретну лінгвістичну змінну. Оскільки ФП звичайно перекривають один одного, то для однієї і тієї ж вхідний змінної кілька ФП можуть повідомляти різні величини істинності, що відрізняються від нуля.

У блоці формування логічного рішення на основі матриці знань (бази правил) записуються лінгвістичні правила виду ЯКЩО (вихідна ситуація), ТО (відповідна реакція), які разом зазвичай називають робочим правилом. Взаємодія між вхідними і вихідними ФП типу ЯКЩО-ТО позначається як імплікація (логічна зв'язка). Імплікація (активізація) - це етап нечіткого висновку, що представляє собою процедуру знаходження ступеня істинності кожного з підзаключень логічних правил виду ЯКЩО-ТО, які є нечіткими лінгвістичними висловлюваннями у формі лінгвістичних змінних. Частина ЯКЩО (передумови або умови) означає сполучення логічних операцій, а частина ТО (рішення, висновок, висновок) зазвичай є просте зазначення лінгвістичної величини для вихідного впливу (керуючого впливу на об'єкт управління) нечіткого регулятора. Відповідним формулюванням правил досягається результат, при якому для будь-якої лінгвістичної величини керуючого впливу, як мінімум, одне з правил виявляється прийнятним. У нашому випадку будемо використовувати "Мінімакс" (Max-Min Inference) метод логічного вирішення, коли спочатку ФП частини ТО кожного з правил об'єднуються з величиною істинності частини ЯКЩО (при цьому ФП частини ТО обмежується величиною істинності частини ЯКЩО-це "міні" - операція), а потім з обмежених ФП частини ТО шляхом взаємного накладення вибирається результуюча ФП з максимальною величиною істинності ("максі"-операція). Ця результуюча ФП визначає собою поточний вплив бази правил. Процедура обробки бази правил з формуванням результуючої ФП є логічне рішення для розрахунку вихідної величини НР.

Нечіткий висновок займає центральне місце у нечіткій логіці і системах нечіткого управління. Процес нечіткого виведення являє собою деяку

процедуру або алгоритм отримання нечітких висновків на основі нечітких умов або передумов з використанням понять нечіткої логіки. Цей процес поєднує в собі всі основні концепції теорії нечітких множин: функції приналежності, лінгвістичні змінні, нечіткі логічні операції, методи нечіткої імплікації та нечіткої композиції.

6.3 Побудова та дослідження систему автоматичного управління з нечітким ПІ-регулятором

В останні роки в системи автоматизації технологічних процесів і виробництв почали активно впроваджуватися моделі, методи і технічні засоби, засновані на теорії нечітких множин. Широкому поширенню fuzzy-систем управління в чималому ступені сприяє програмна система MATLAB, у складі якої є пакет програм з fuzzy-логіки. Fuzzy Logic Toolbox дозволяє створювати і редагувати fuzzy-системи управління з нечіткою логікою, звані в термінах програмної системи MATLAB - Fuzzy Inference System або FIS. Ці системи можна створювати, використовуючи як графічні інструменти, так і команди робочого вікна MATLAB.

У пакеті Simulink системи MATLAB була змодельована схема одноконтурною системи автоматичного регулювання з нечітким ПІ-регулятором.

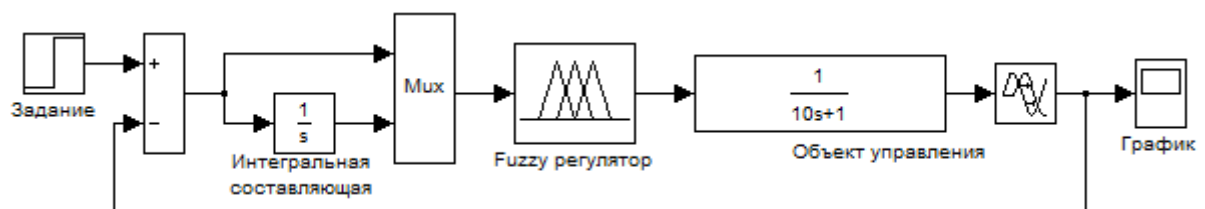


Рисунок. 6.3.1 Модель одноконтурної системи автоматичного регулювання з ПІ-подібним fuzzy-регулятором

З рисунка 6.3.1 видно, що об'єкт управління являє собою послідовне з'єднання типових ланок автоматики: аперіодичного ланки першого порядку і

ланки чистого запізнювання. Таким чином, передатна функція об'єкта управління має вигляд:

$$W_{об}(p) = \frac{1}{10p + 1} \cdot e^{-5p}$$

Бібліотека системи Simulink містить блок fuzzy-регулятора. Сформуємо модель одноконтурної системи автоматичного регулювання з використанням даного блоку, причому реалізуємо ПІ-закон регулювання. Для формування вхідних сигналів використовуємо блок Integral. Для кожної складової сигналу ПІ-регулятора задані відповідні коефіцієнти. Таким же способом можна задати коефіцієнти для входів fuzzy-регулятора, використовуючи блок Gain (підсилювач). Причому значення параметра Gain блоків Gain в лініях пропорційної і інтегральної складових сигналу відповідають Р і І налаштувань аналогового ПІ-регулятора (тобто 0.706 і 0.07). Проте кількісне завдання складових сигналу за допомогою блоків Gain не рекомендується використовувати, оскільки це захаращує схему. Тому поставимо діапазони зміни змінних безпосередньо при синтезі нечіткої системи.

Тепер за допомогою інструментів графічного інтерфейсу користувача (GUI) пакета "Fuzzy Logic Toolbox" створимо нечітку систему, що реалізовує типової аналоговий ПІ-регулятор. За допомогою пакету "Fuzzy Logic Toolbox" можна будувати нечіткі системи двох типів - Мамдані та Сугено. Ми зупинимося на системі типу Мамдані. Командою fuzzy у вікні MATLAB викликаємо вікно Редактора фазі-інференційної системи (Fuzzy Inference System Editor), вибираємо тип системи - Мамдані, задаємо два входи - для пропорційної і інтегральної складових і називаємо вхідні змінні р і і, а вихідну - output1.

З даного вікна викликаємо вікно Редактора функцій приналежності (Membership Function Editor) подвійним клацанням миші по зображенню змінної р або за допомогою меню Edit. Тут для лінгвістичного опису кожної

змінної виберемо сім трикутних умов (NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB). Терми вихідної змінної краще вибирати непересічними. Це підвищить чіткість регулювання. У цьому ж вікні задамо діапазони зміни змінних:

- Для вхідних змінних регулятора рекомендуються симетричні діапазони зміни, при цьому $p \in [-10; 10]$ та $i \in [-14.29; 14.29]$;
- Для вихідної змінної регулятора діапазон зміни рекомендується брати у вигляді $output1 \in [0; C]$, де верхня межа C при одиничному східчастому вплив варіюється в таких межах, щоб вихідний сигнал регулятора міг компенсувати це обурення. У міру збільшення значення C зменшується динамічна помилка, але зростають час регулювання і число коливань перехідного процесу. У нашому випадку прийmemo C рівне 10, коли спостерігається оптимальне співвідношення між величиною динамічної помилки, часу регулювання і кількістю коливань.

Тепер необхідно сформулювати базу правил fuzzy-регулятора. В основу покладено спосіб, запропонований у літературі. Лінійний безперервний ПІ-регулятор з передатною функцією $y(t) = k_d \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_E} \cdot \varepsilon(t)$ (1) можна замінити близьким за стратегією та логікою управління fuzzy-регулятором, якщо в якості його вихідної змінної розглядати прирощення керуючого впливу Δy . Тоді закон регулювання (1) можна представити в такій диференціальній формі:

$$\frac{dy(t)}{dt} = k_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{1}{T_E} \cdot \varepsilon(t),$$

$$\Delta y(k) = y(k) - y(k-1) = k_d \cdot \Delta \varepsilon(k) + \frac{\Delta t}{T_E} \cdot \varepsilon(k).$$

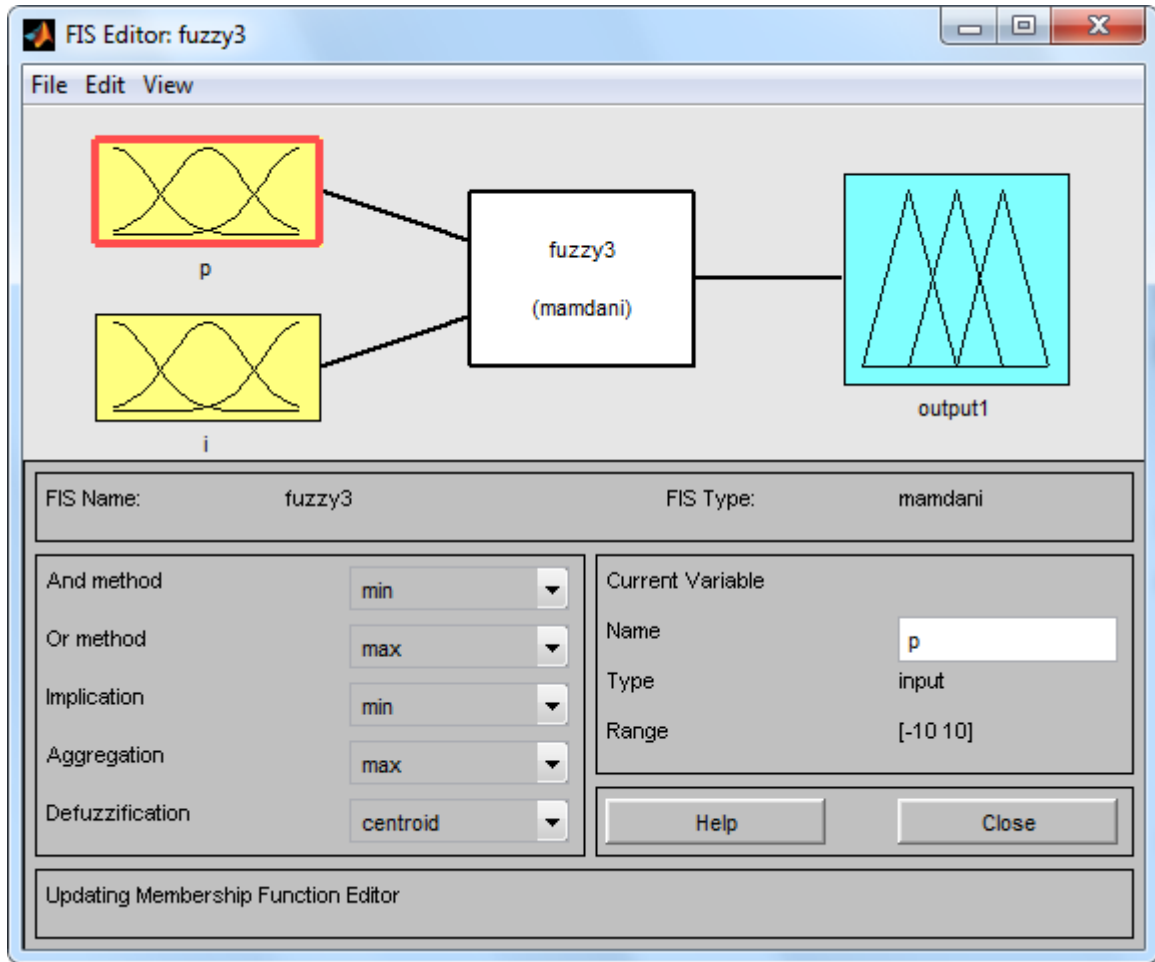
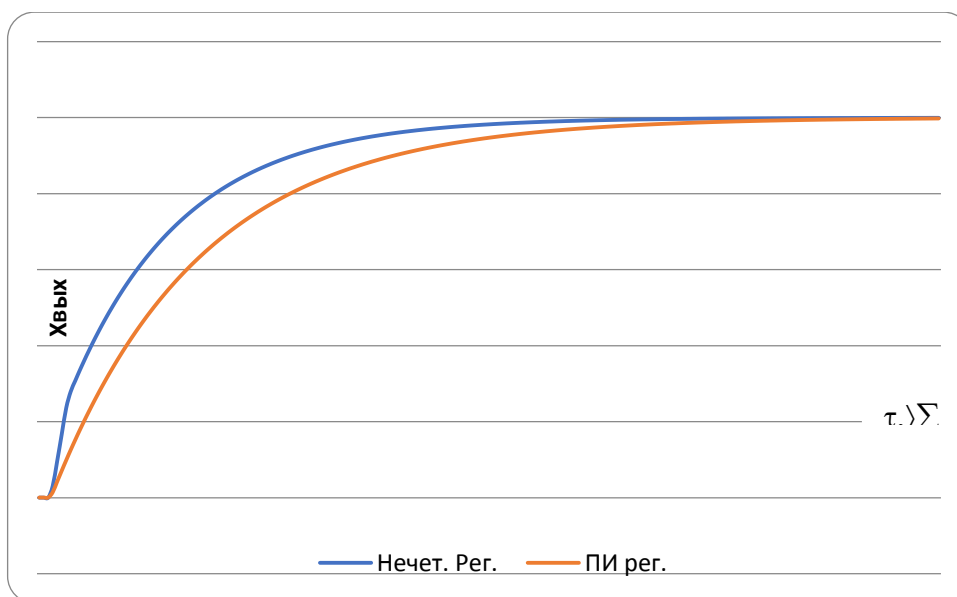


Рисунок. 6.3.2 Головне вікно редактора пакету «Fuzzy Logic Toolbox»

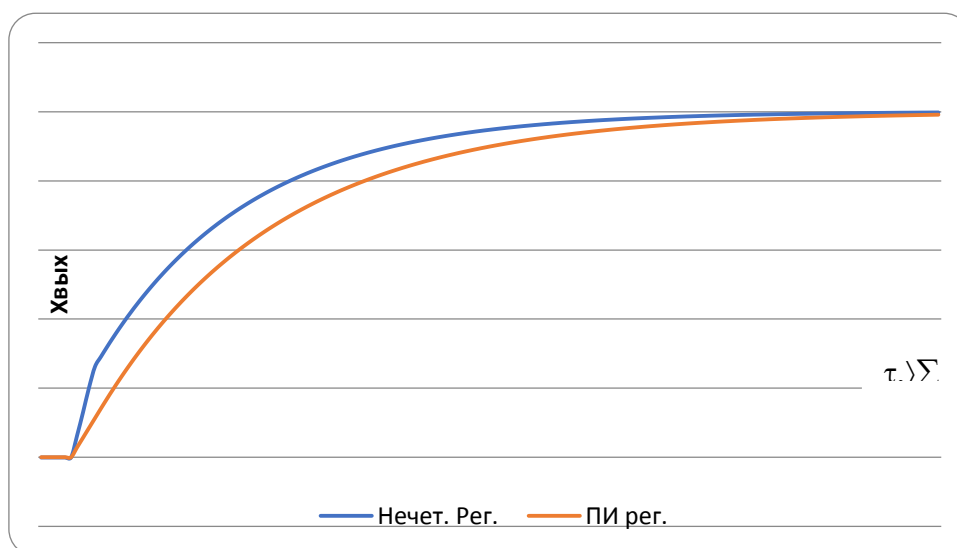
Характерними особливостями цих систем є: можливість комбінування числових даних і нечітких знань, здатність до навчання, можливість інтерпретації як нечіткої моделі, додаткова оптимізація опису, яка базується на правилах з використанням даних.

6.4 Порівняння якості перехідного процесу системи з ПІ-регулятором, нечітким ПІ-регулятором

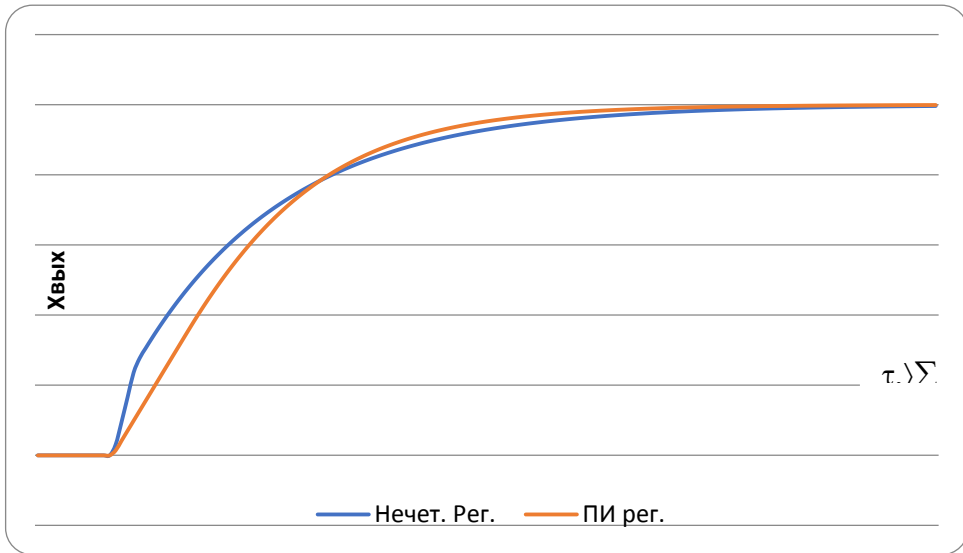
Для порівняння якості перехідного процесу системи з розробленим нечітким ПІ-регулятором і стандартним ПІ-регулятором побудуємо графіки перехідних процесів для різних значень відносин τ/T з нечітким ПІ-регулятором і стандартним ПІ-регулятором.



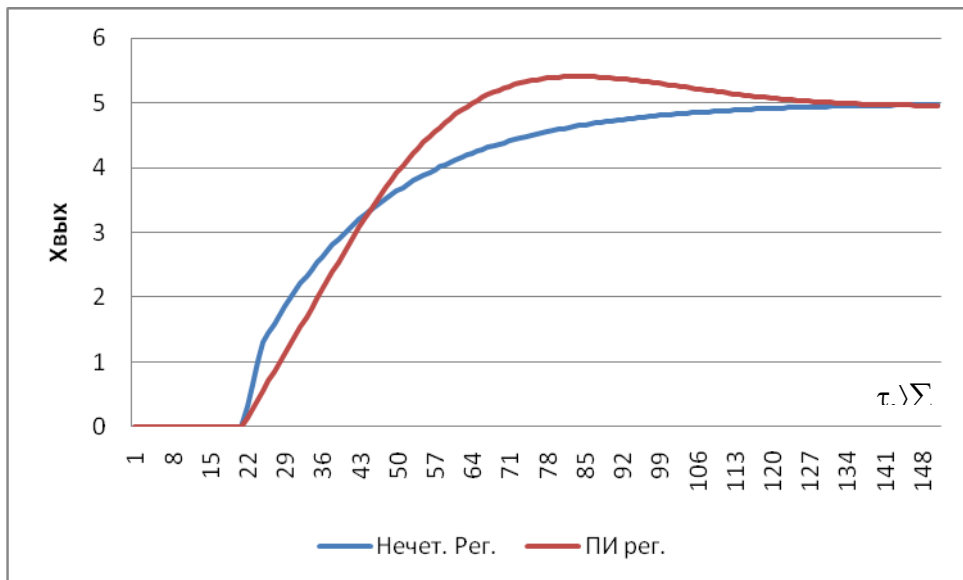
а)



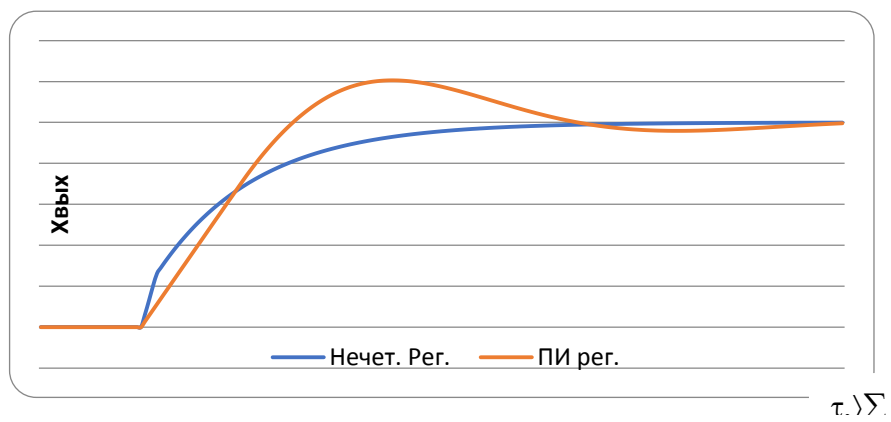
б)



В)



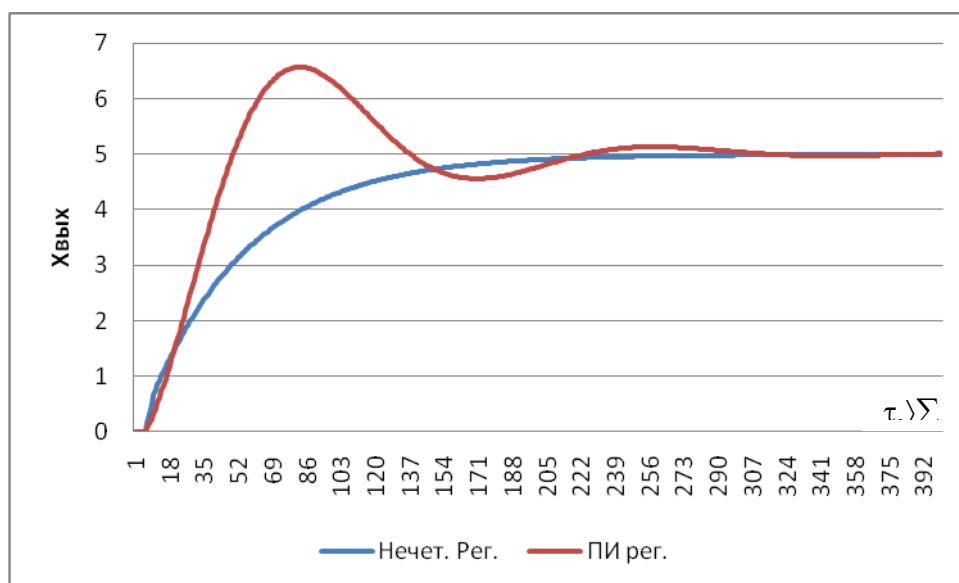
Г)



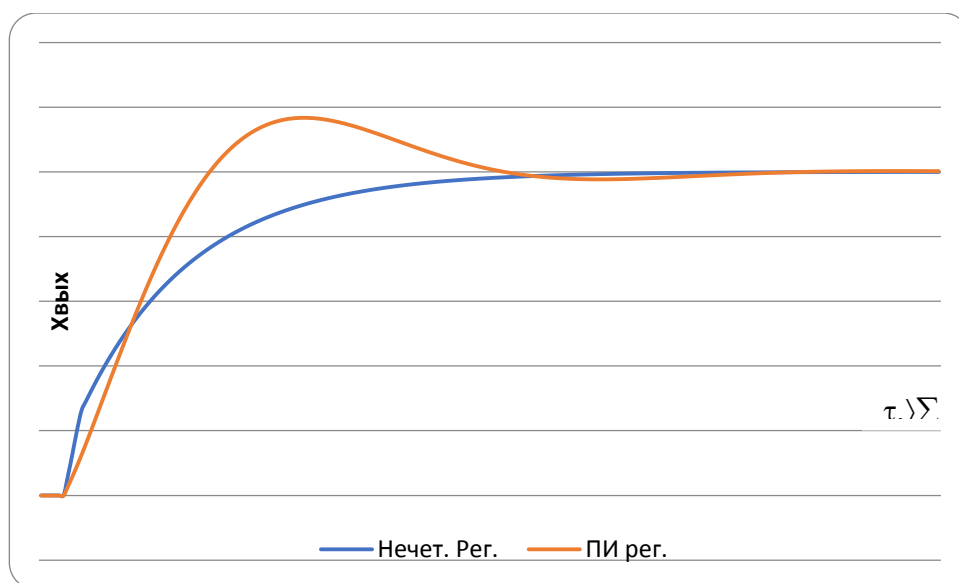
Д)

Рисунок. 6.4.1 Перехідні процеси з нечітким ПІ-регулятором і стандартним ПІ-регулятором при $\tau/T=0.1$ (а), $\tau/T=0.2$ (б), $\tau/T=0.5$ (в), $\tau/T=0.8$ (г), $\tau/T=1$ (д)

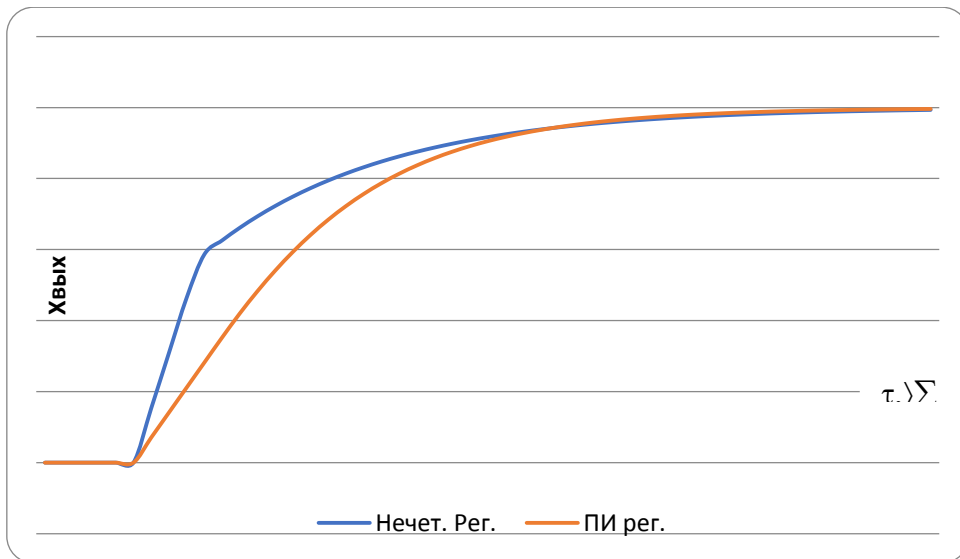
($T=\text{const}$)



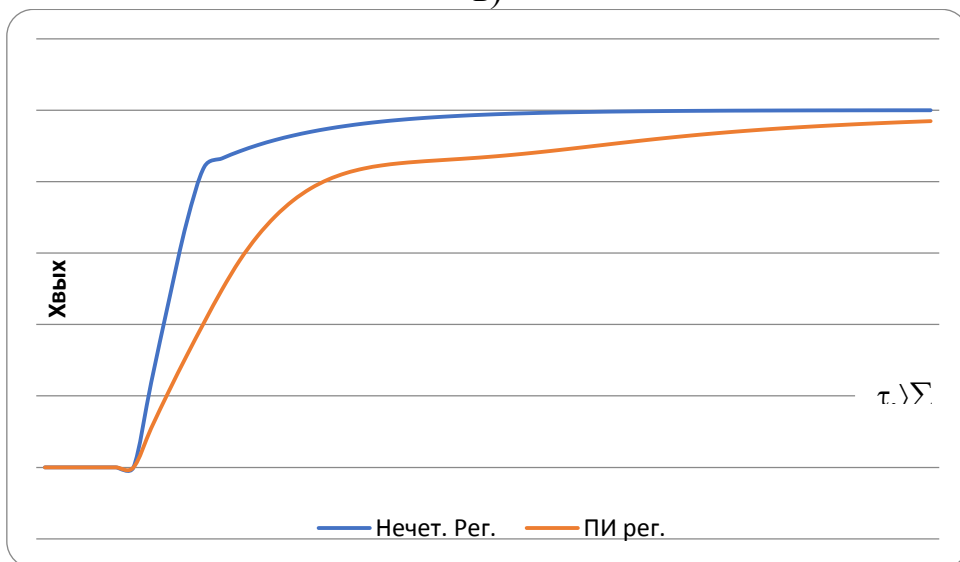
а)



б)



в)



г)

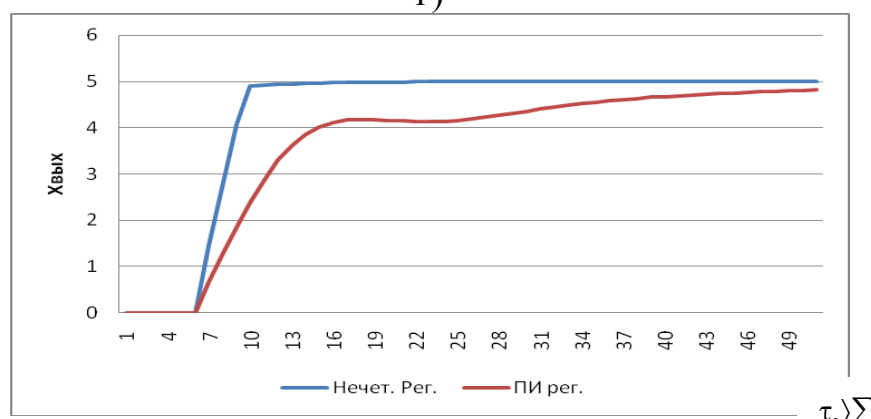


Рис. 6.4.2 Перехідні процеси з нечітким ПІ-регулятором і стандартним ПІ-регулятором при $\tau/T=0.1$ (а), $\tau/T=0.2$ (б), $\tau/T=0.5$ (в), $\tau/T=0.8$ (г), $\tau/T=1$ (д) ($\tau = \text{const}$)

З рисунків 6.4.1 та 6.4.2 можна сказати, що в обох випадках - при фіксованому значенні часу транспортного запізнювання або фіксованому

значенні постійної часу об'єкта нечіткий регулятор забезпечує нульову динамічну помилку і найменший час перехідного процесу в порівнянні зі звичайним ПІ-регулятором. Тривалість перехідного процесу залежить тільки від значення постійної часу об'єкта.

6.5 Висновки до розділу 6

1. Для аналізу нечітких систем була сформована модель одноконтурної системи автоматичного регулювання з використанням блоку fuzzy-регулятора програмного пакету MATLAB, причому реалізуємо ПІ-закон регулювання. Для кожної складової сигналу ПІ-регулятора задані відповідні коефіцієнти.

2. Оцінка робастності проводилася шляхом порівняння чутливості тривалості перехідного процесу і динамічної помилки до зміни параметрів об'єкта. За отриманими результатами можна сказати, що нечіткий ПІ-регулятор показав кращі результати ніж звичайний ПІ-регулятор. Це пов'язано з тим, що для нечітких систем не потрібно математичний опис.

3. Нечіткий ПІ-регулятор забезпечує нульову динамічну помилку і порівняно невеликий час перехідного процесу, що залежить тільки від постійної часу об'єкта і не залежить від часу транспортного запізнювання.

4. Переваги нечіткої логіки, які явно проявляються в нечіткому управлінні, полягають насамперед у тому, що нечітка логіка дозволяє вдало представити мислення людини, а саме способи прийняття рішень людиною, і способи моделювання складних об'єктів засобами природної мови.

7 ПОРІВНЯННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДЛЯ ВСІХ ЗАКОНІВ РЕГУЛЮВАННЯ ПРИ РІЗНИХ ЗНАЧЕННЯХ ВІДНОШЕННЯ τ/T

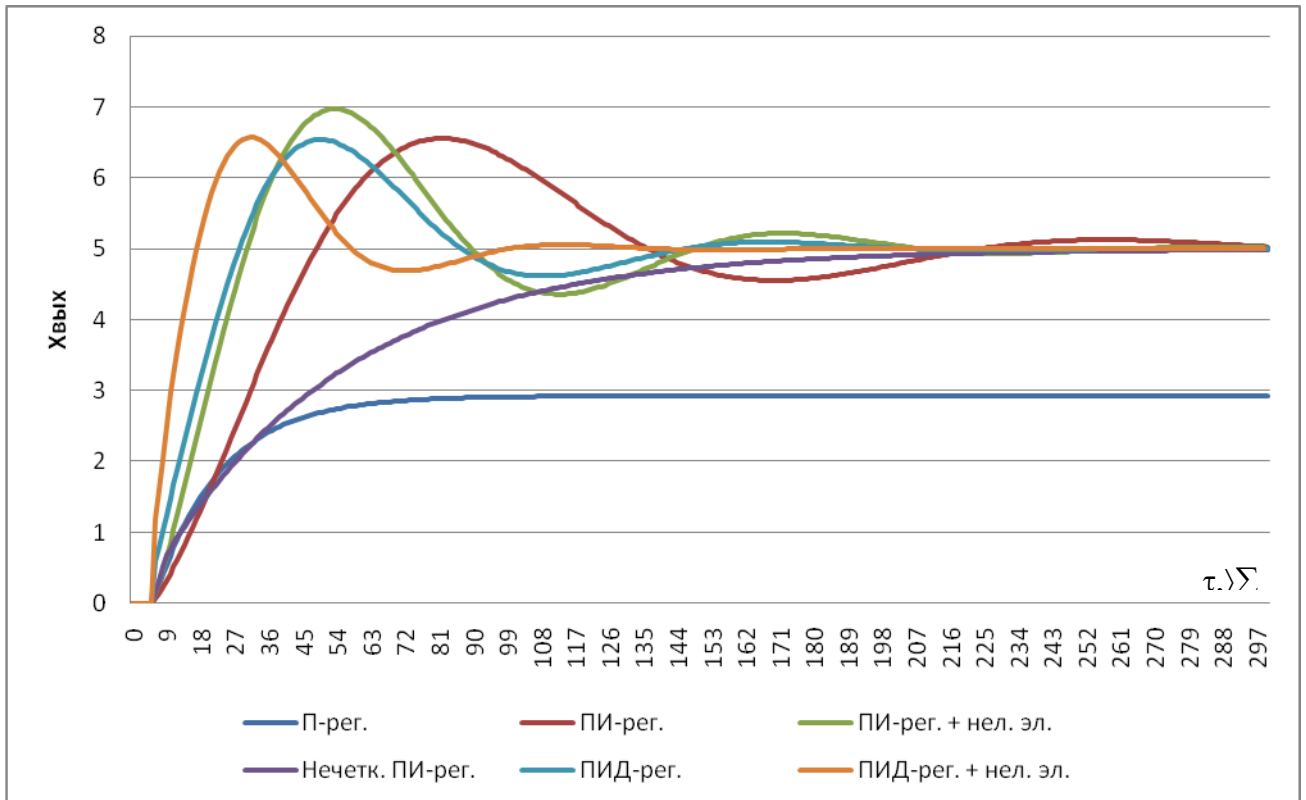
Для порівняння результатів, які були одержані для систем при різних законах регулювання, побудуємо графіки перехідних процесів. На кожному графіку криві для конкретного відношення τ/T для всіх графіків. Це дозволить візуально порівняти результати.

Оцінку робастності різних систем зробимо шляхом порівняння чутливості тривалості перехідного процесу і динамічної помилки до зміни параметрів. За отриманими результатами будуть побудовані графіки та прийняті відповідні висновки.

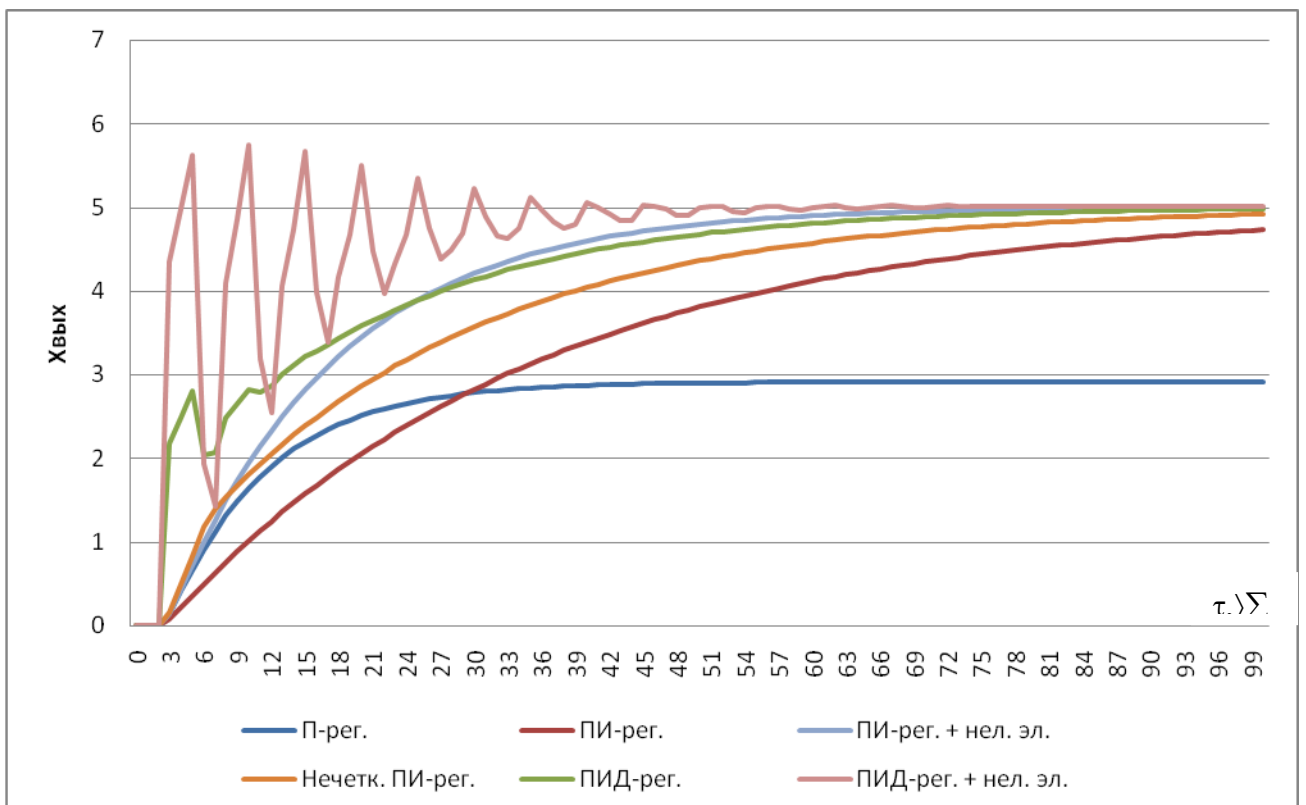
7.1 Перехідні процеси при типових законах регулювання

Для порівняння результатів, які були одержані для систем при різних законах регулювання, побудуємо графіки перехідних процесів. На кожному графіку криві для конкретного відношення τ/T для всіх графіків. Це дозволить візуально порівняти результати.

Оцінку робастності різних систем зробимо шляхом порівняння чутливості тривалості перехідного процесу і динамічної помилки до зміни параметрів. За отриманими результатами будуть побудовані графіки та прийняті відповідні висновки.

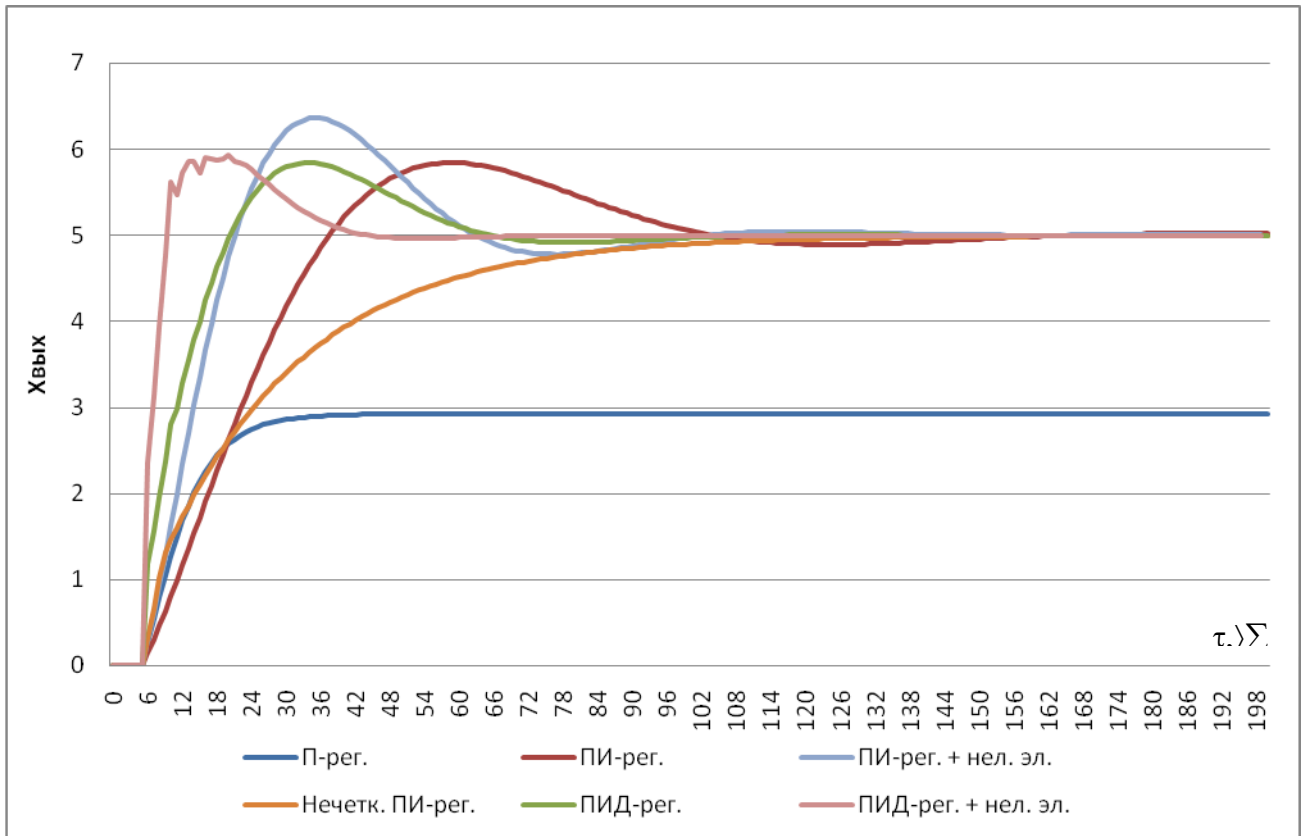


а)

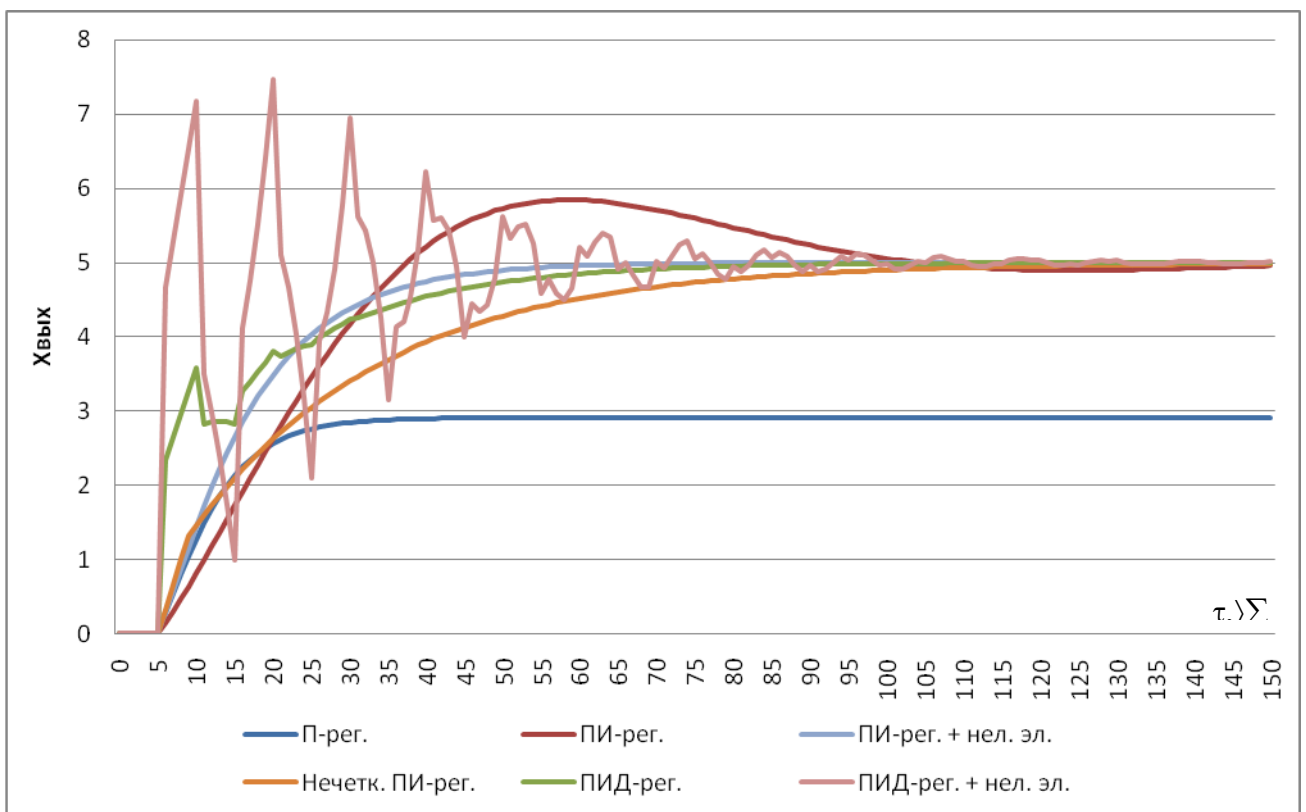


б)

Рисунок. 7.1.1 Перехідні процеси для систем з типовими законами регулювання при відношенні $\tau/T=0.1$ при $\tau=\text{const}$ (а) и $T=\text{const}$ (б)

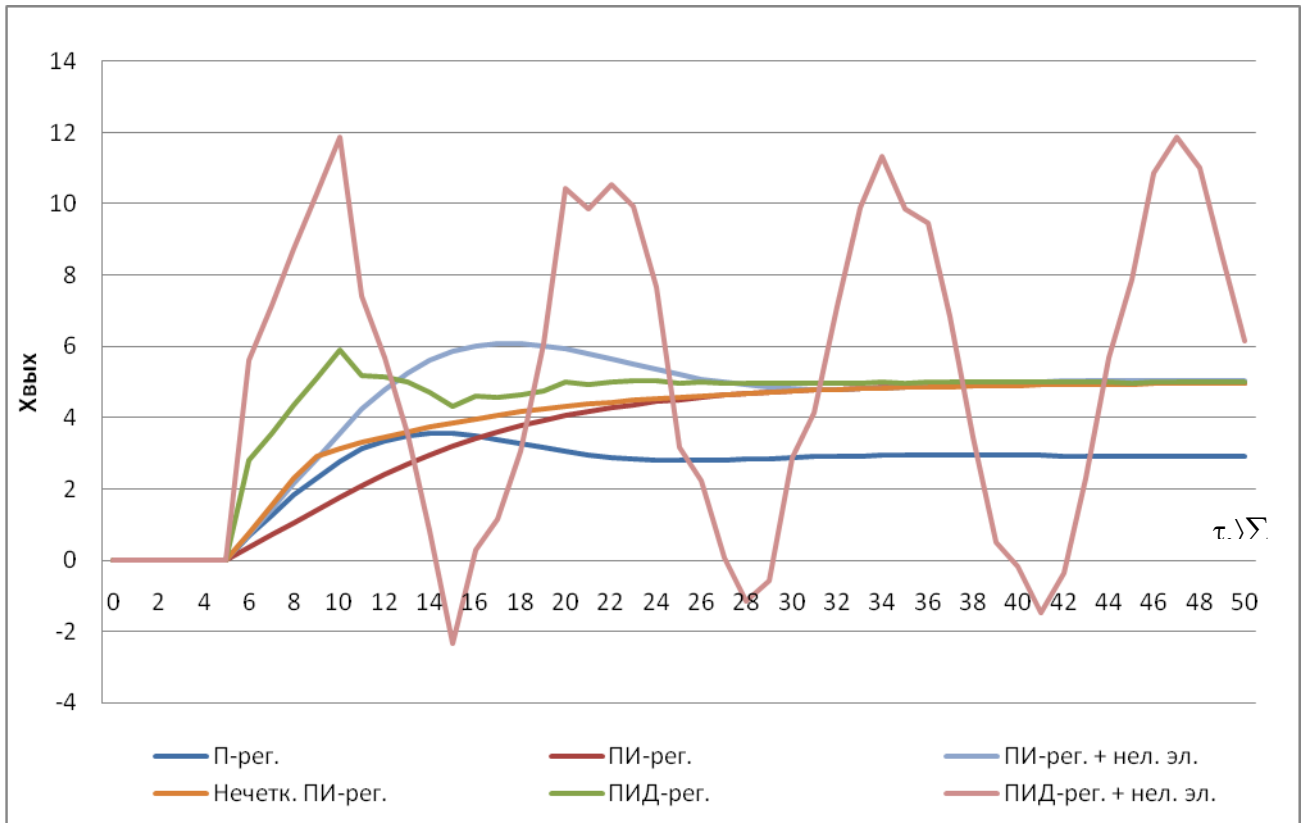


а)

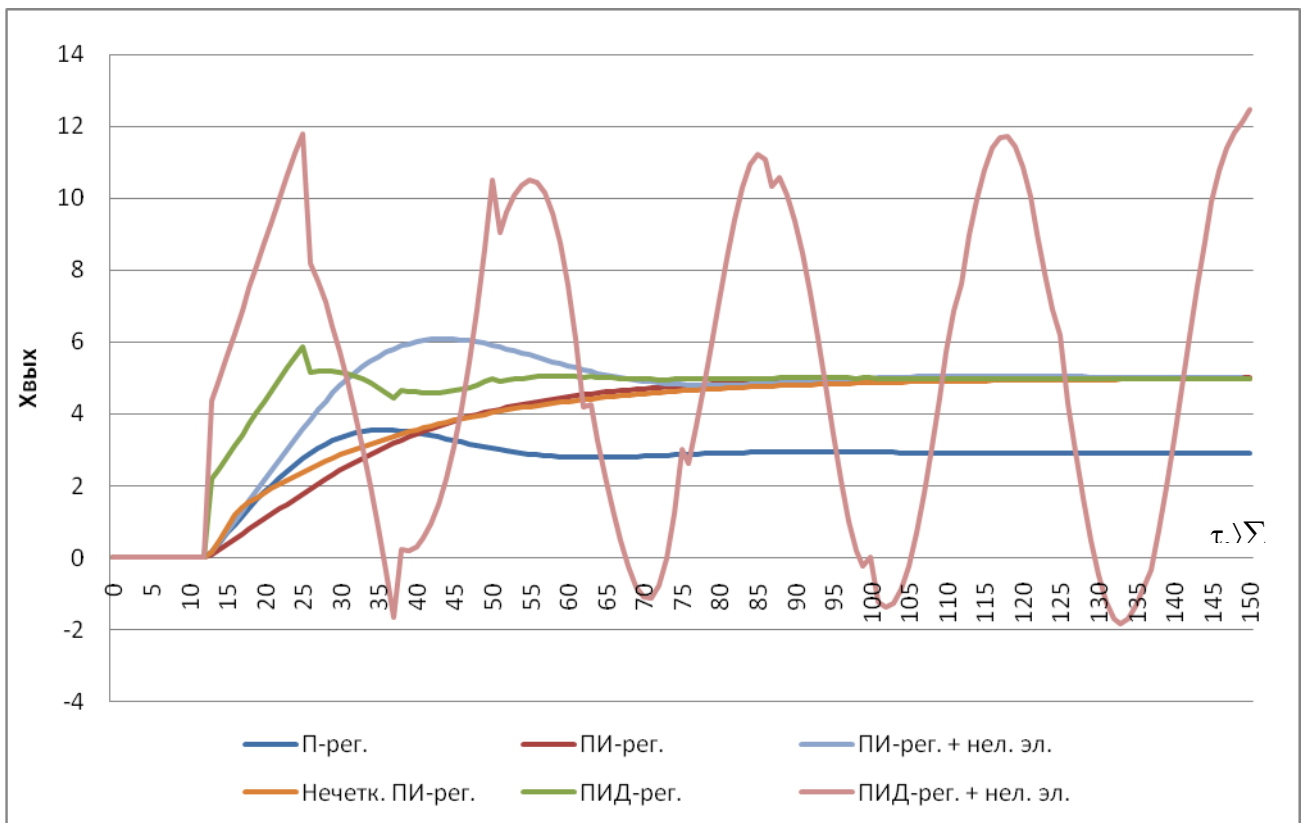


б)

Рисунок. 7.1.2 Перехідні процеси для систем з типовими законами регулювання при відношенні $\tau/T=0.2$ при $\tau = \text{const}$ (а) и $T = \text{const}$ (б)

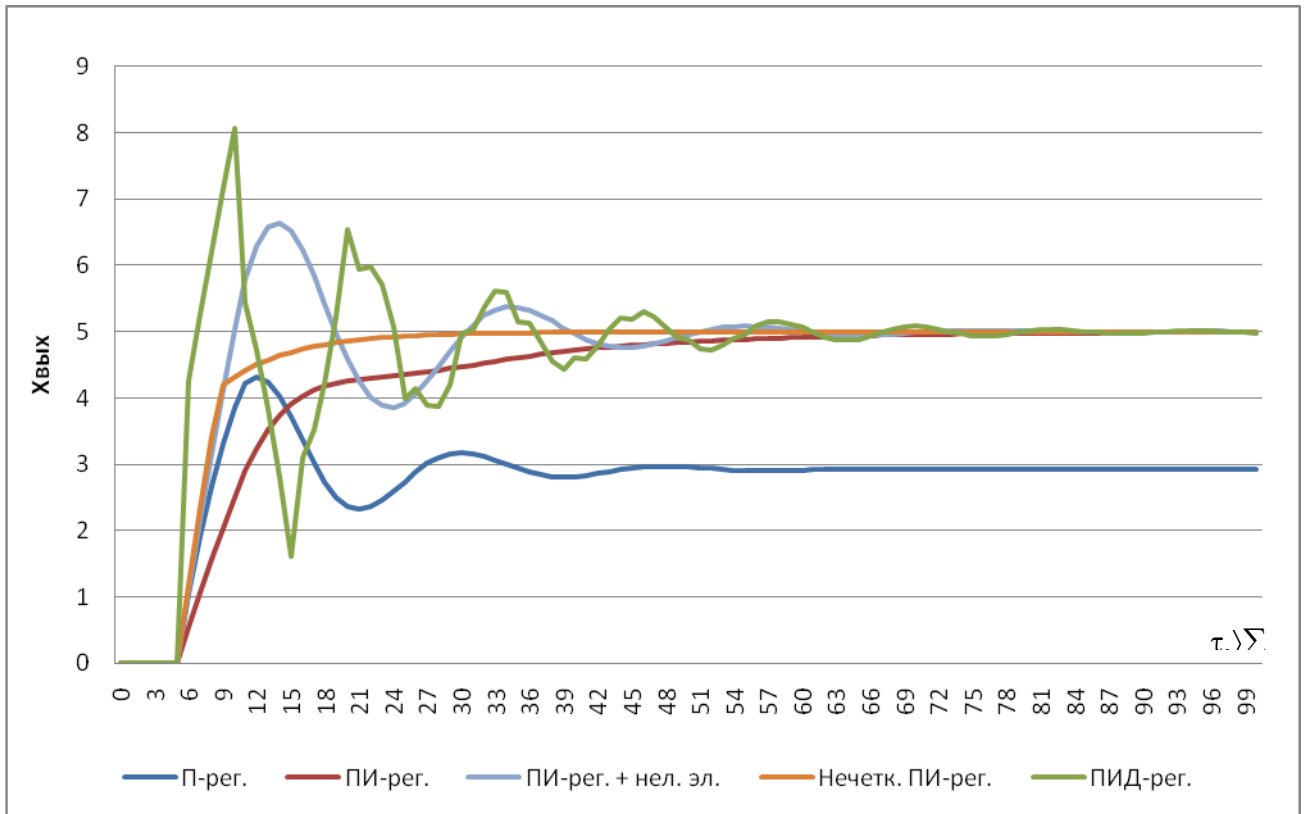


а)

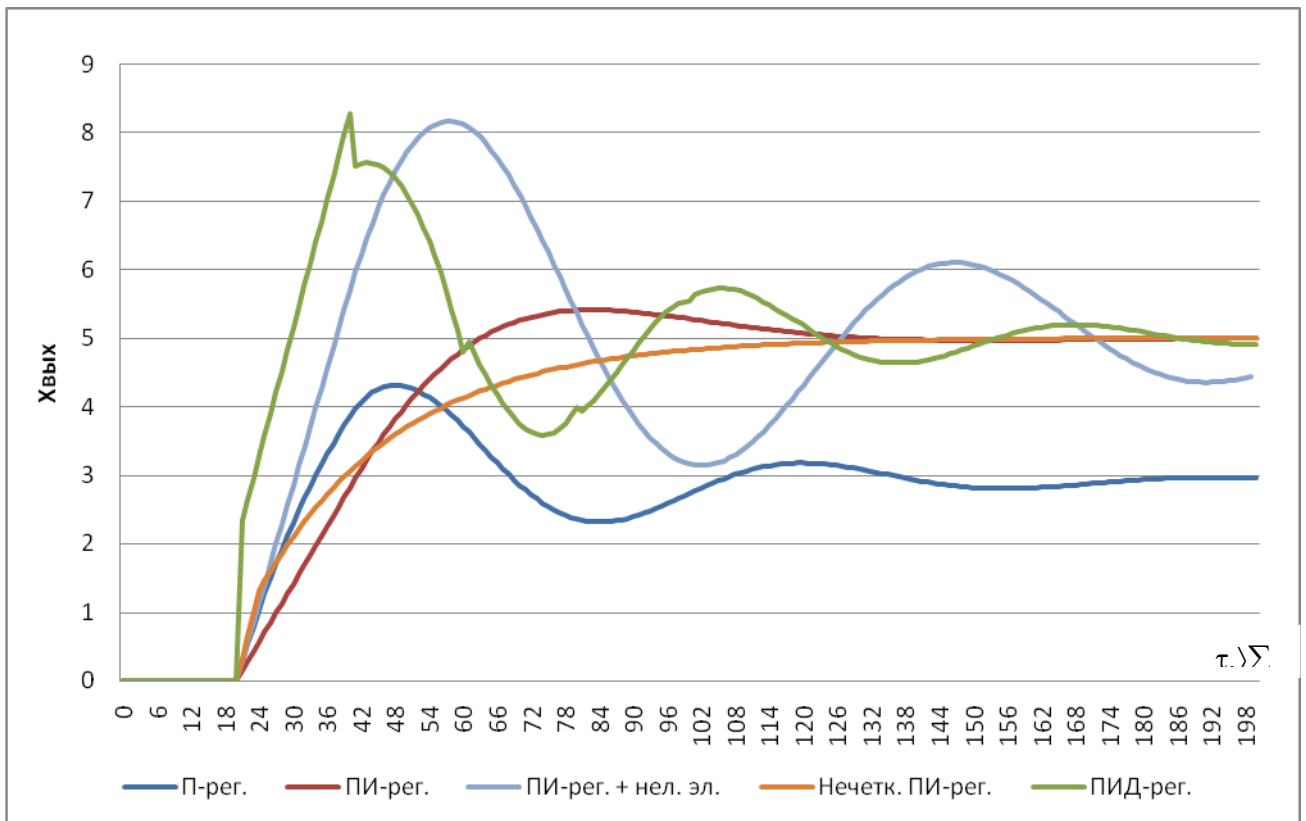


б)

Рисунок. 7.1.3 Перехідні процеси для систем з типовими законами регулювання при відношенні $\tau/T=0.5$ при $\tau = \text{const}$ (а) и $T = \text{const}$ (б)

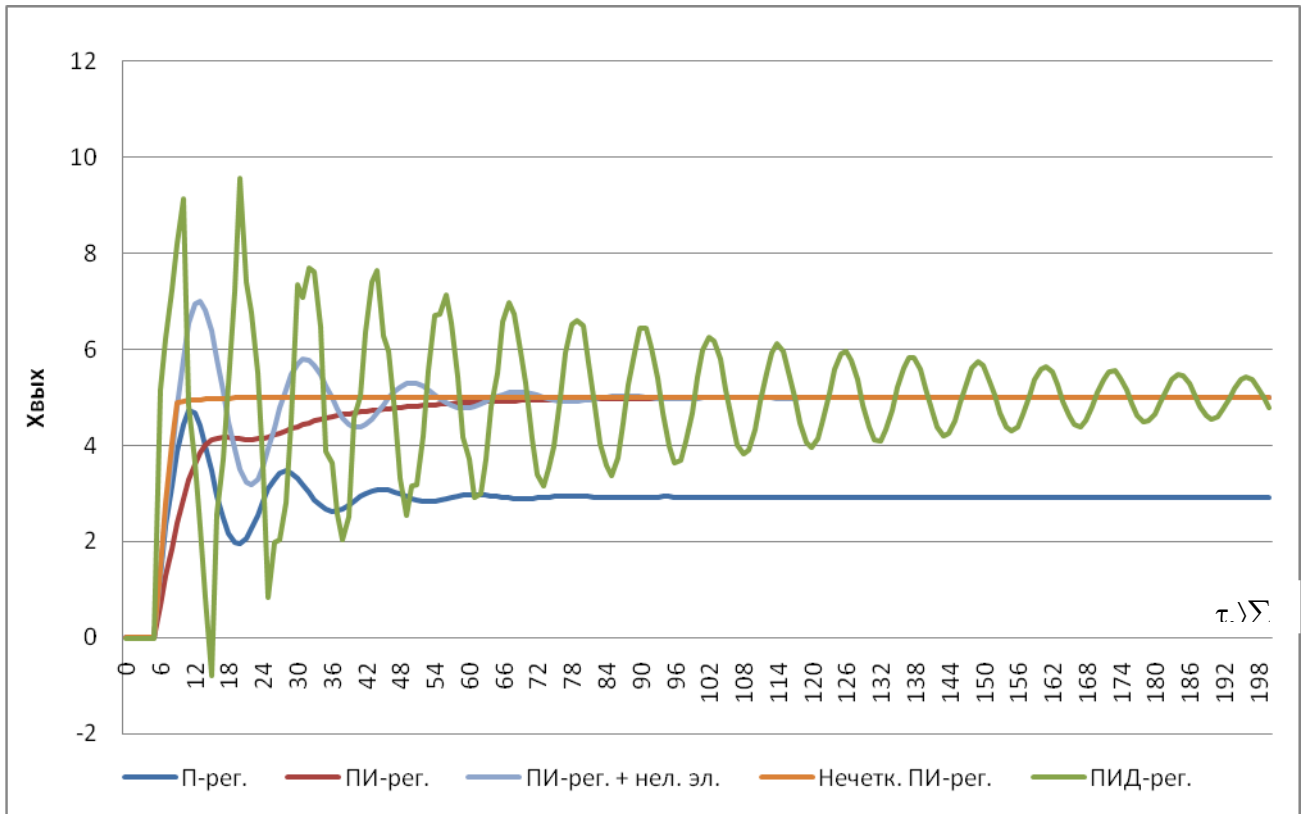


а)

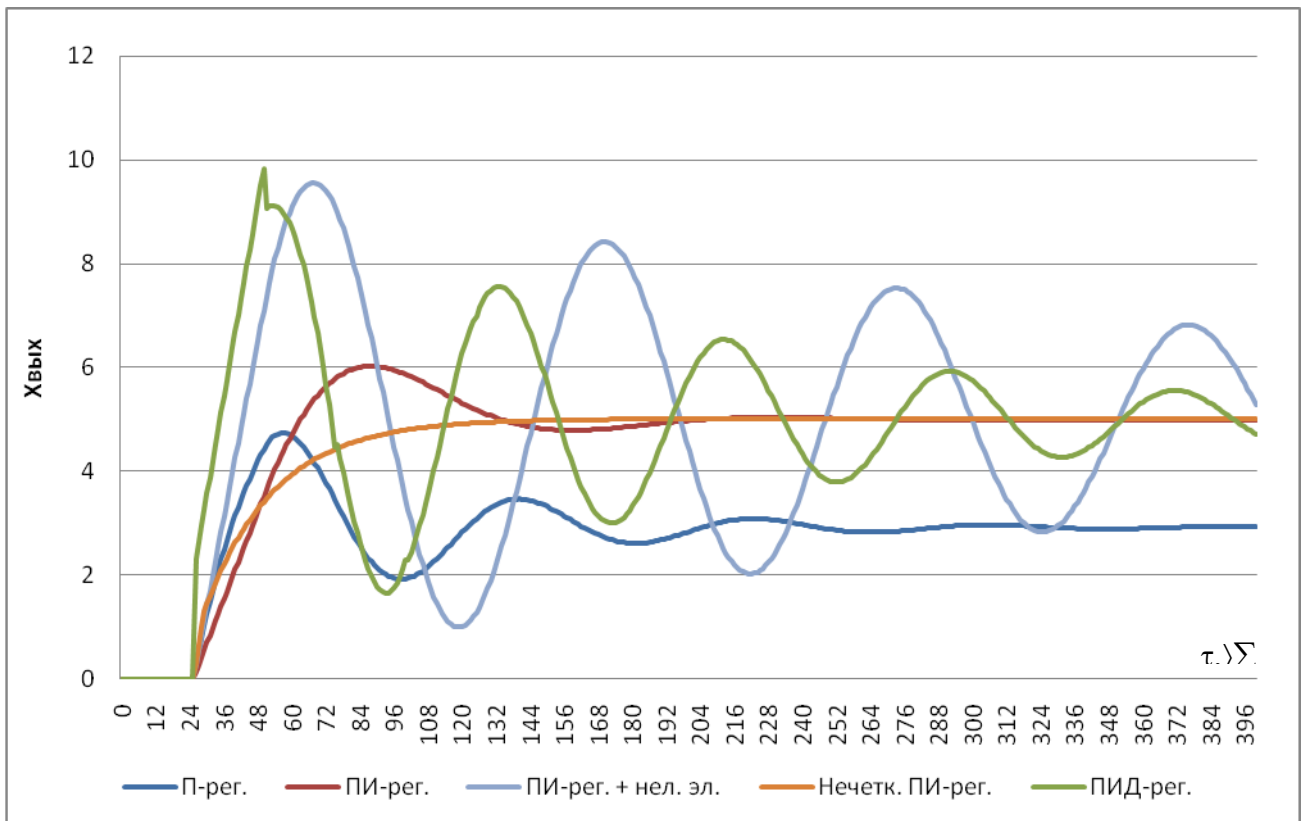


б)

Рисунок. 7.1.4 Перехідні процеси для систем з типовими законами регулювання при відношенні $\tau/T=0.8$ при $\tau=\text{const}$ (а) и $T=\text{const}$ (б)



а)



б)

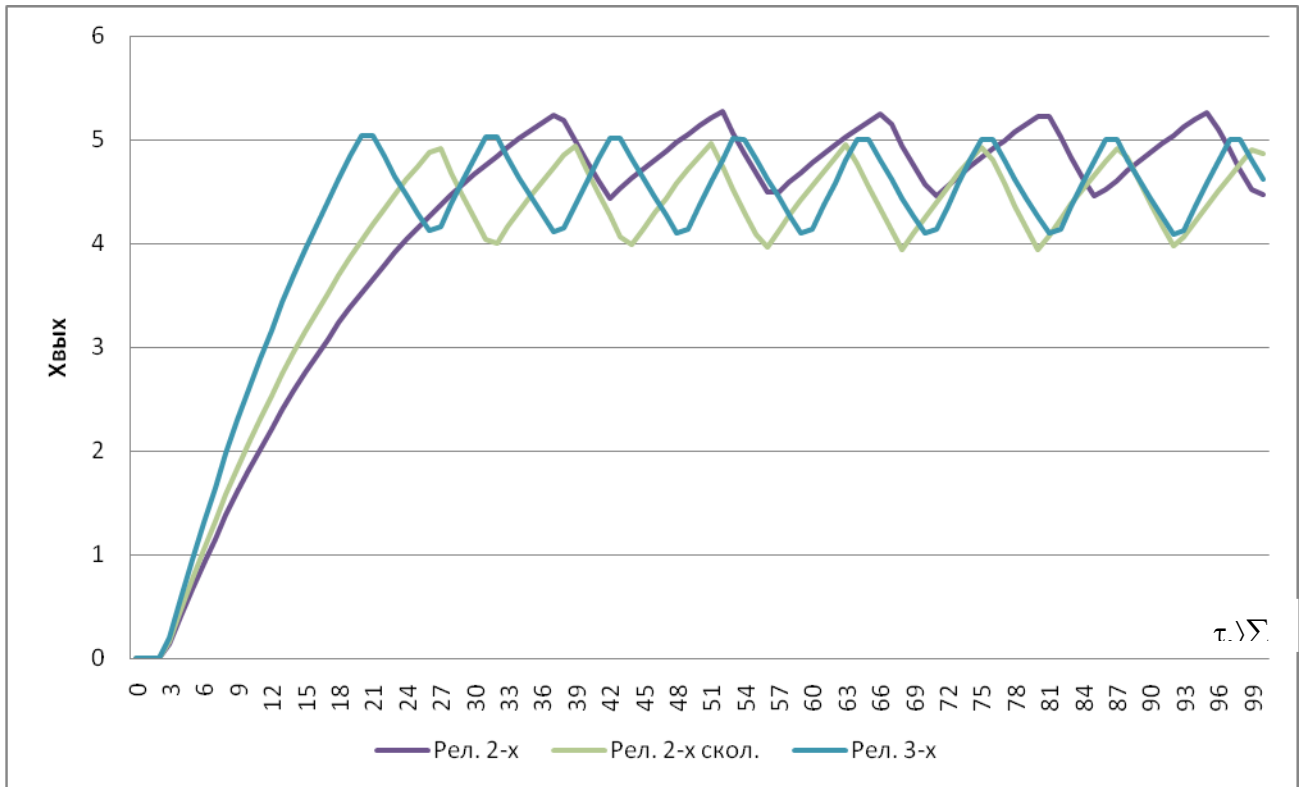
Рисунок. 7.1.5 Перехідні процеси для систем з типовими законами регулювання при відношенні $\tau/T=1$ при $\tau = \text{const}$ (а) и $T = \text{const}$ (б)

На рисунках 7.1.1-7.1.5 (а) показані перехідні процеси для систем з типовими законами регулювання при різних відносинах τ/T при фіксованому значенні часу транспортного запізнювання. При зменшенні постійної часу об'єкта збільшується відношення τ/T , в системі починають з'являтися коливання і збільшується час перехідного процесу. При фіксованому значенні постійної часу об'єкта (рис. 7.1.1-7.1.5 (б)) при збільшенні часу транспортного запізнювання в системі з'являються коливання, збільшується динамічна помилка і час перехідного процесу, а в разі використання деяких алгоритмів система виходить із стану рівноваги.

7.2 Перехідні процеси при релейних законах регулювання

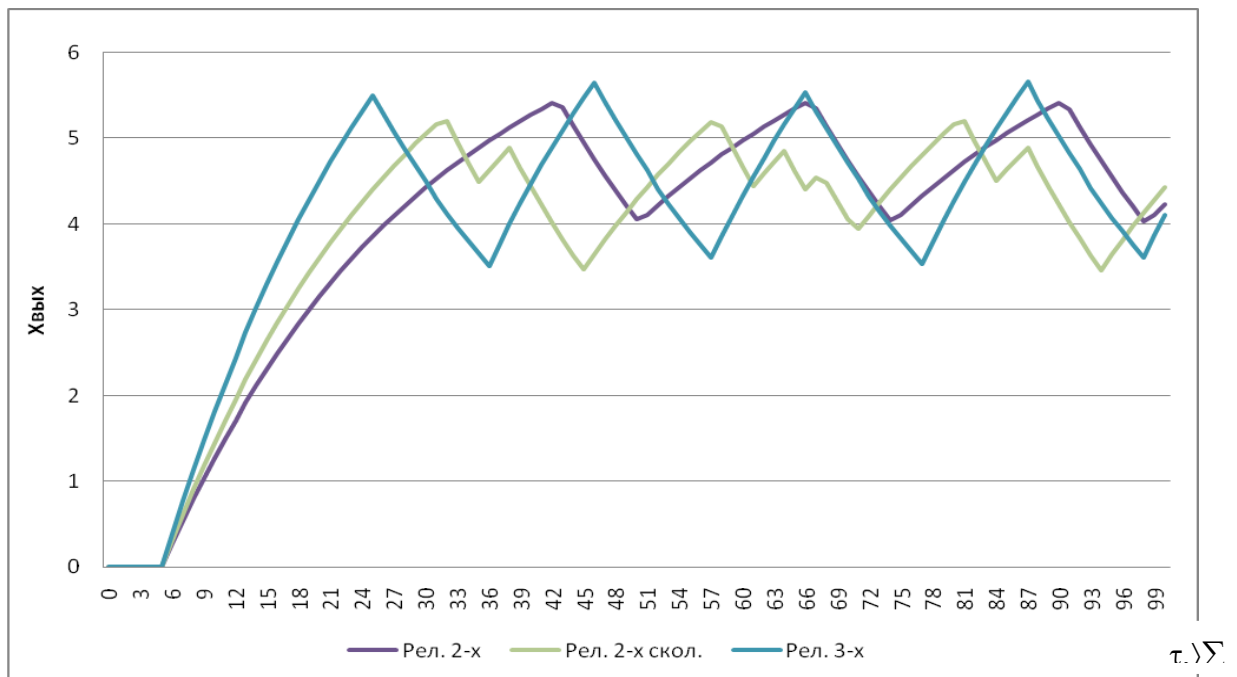


а)

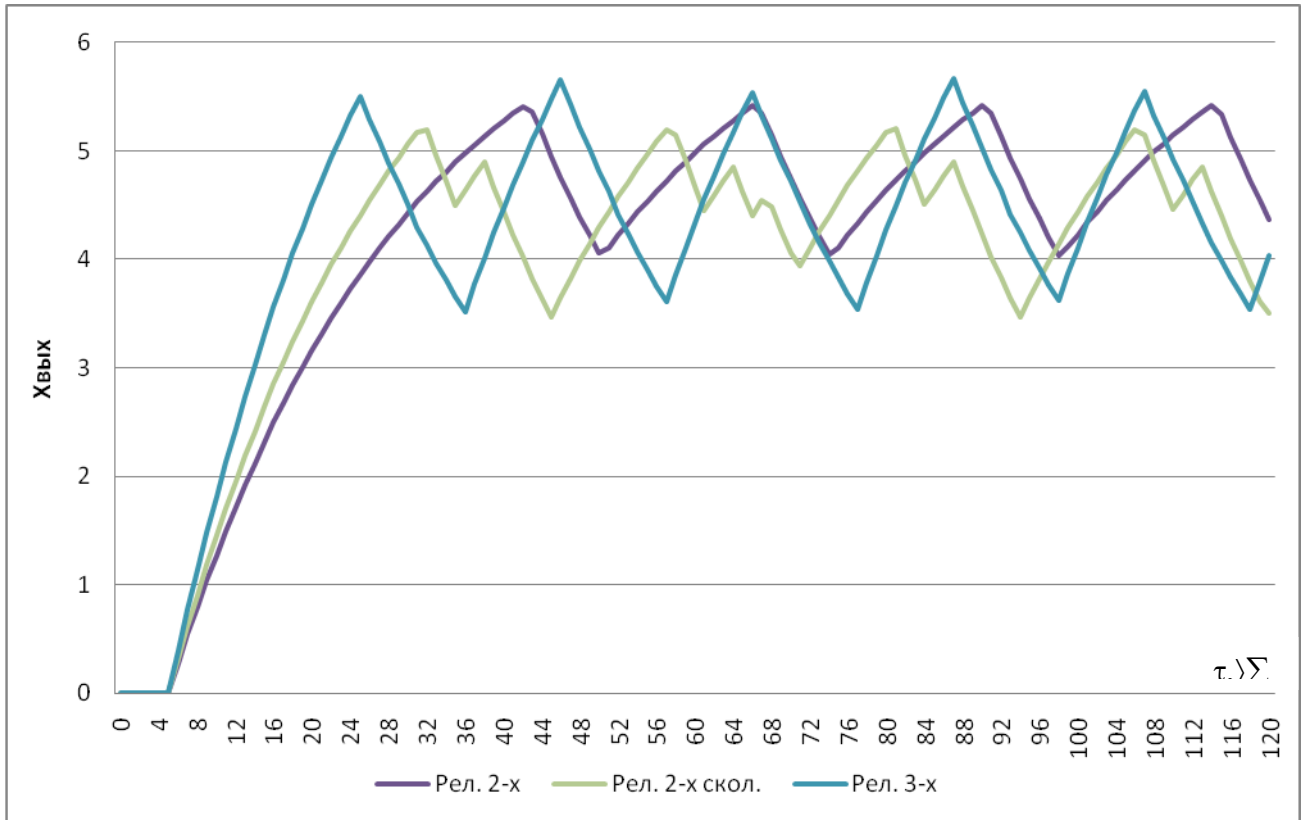


б)

Рисунок. 7.2.1 Перехідні процеси для систем з релейними законами регулювання при відношенні $\tau/T=0.1$ при $\tau = \text{const}$ (а) и $T = \text{const}$ (б)

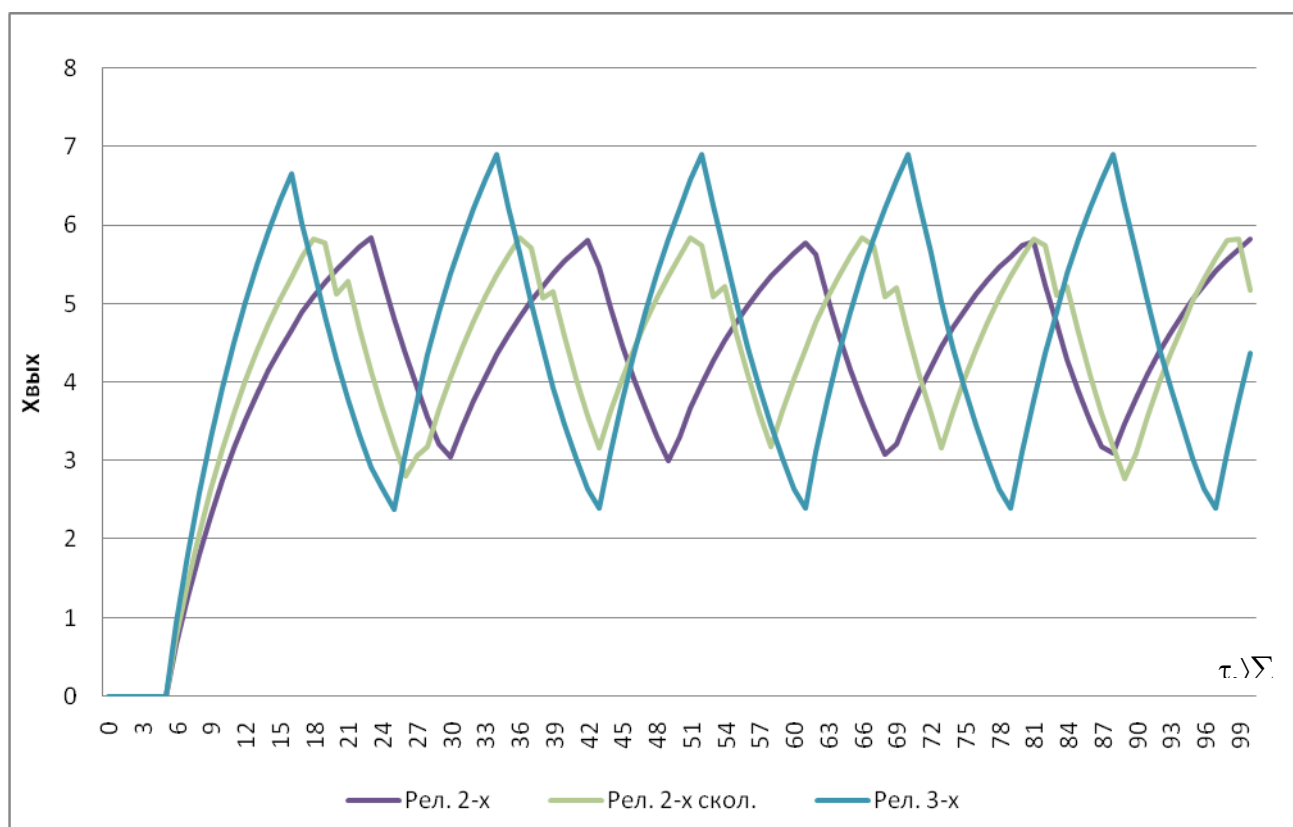


а)

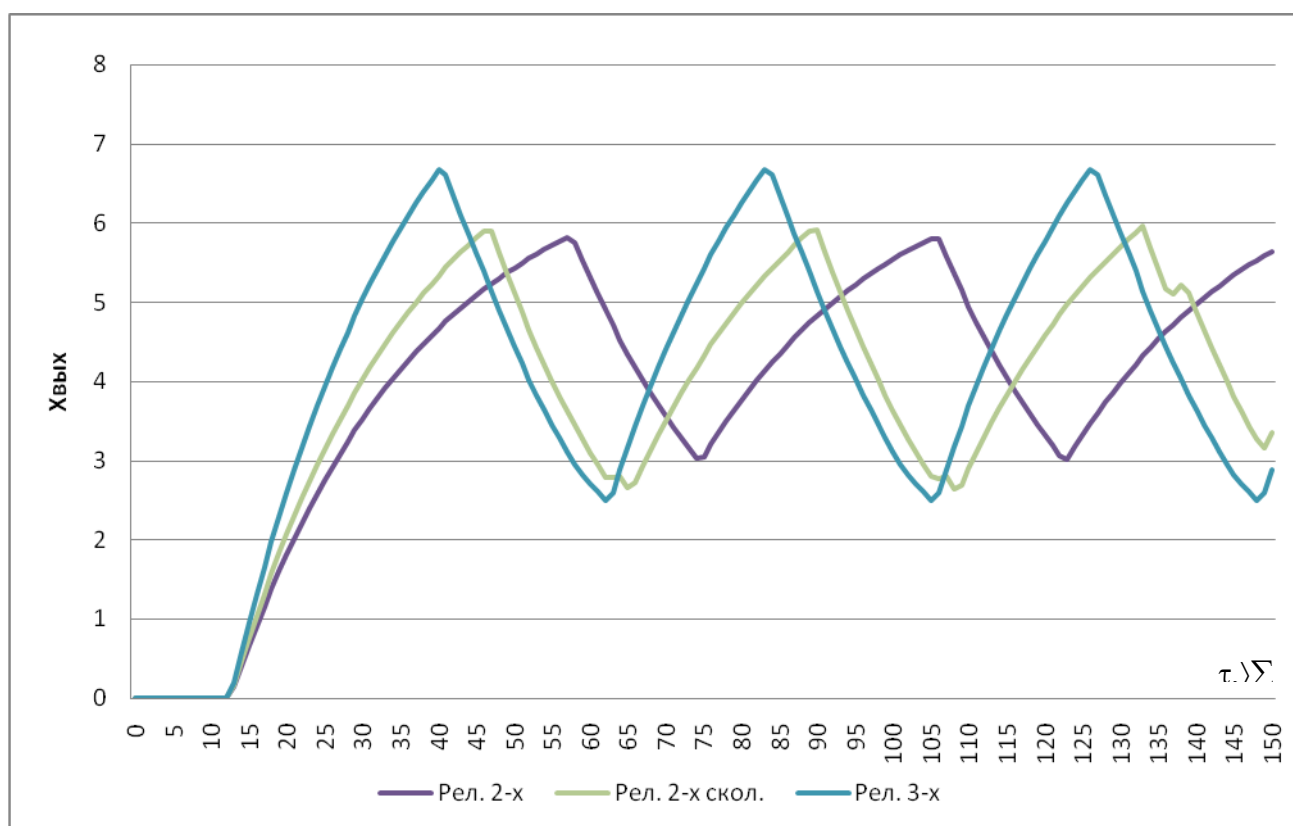


б)

Рисунок. 7.2.2 Перехідні процеси для систем з релейними законами регулювання при відношенні $\tau/T=0.2$ при $\tau = \text{const}$ (а) и $T = \text{const}$ (б)

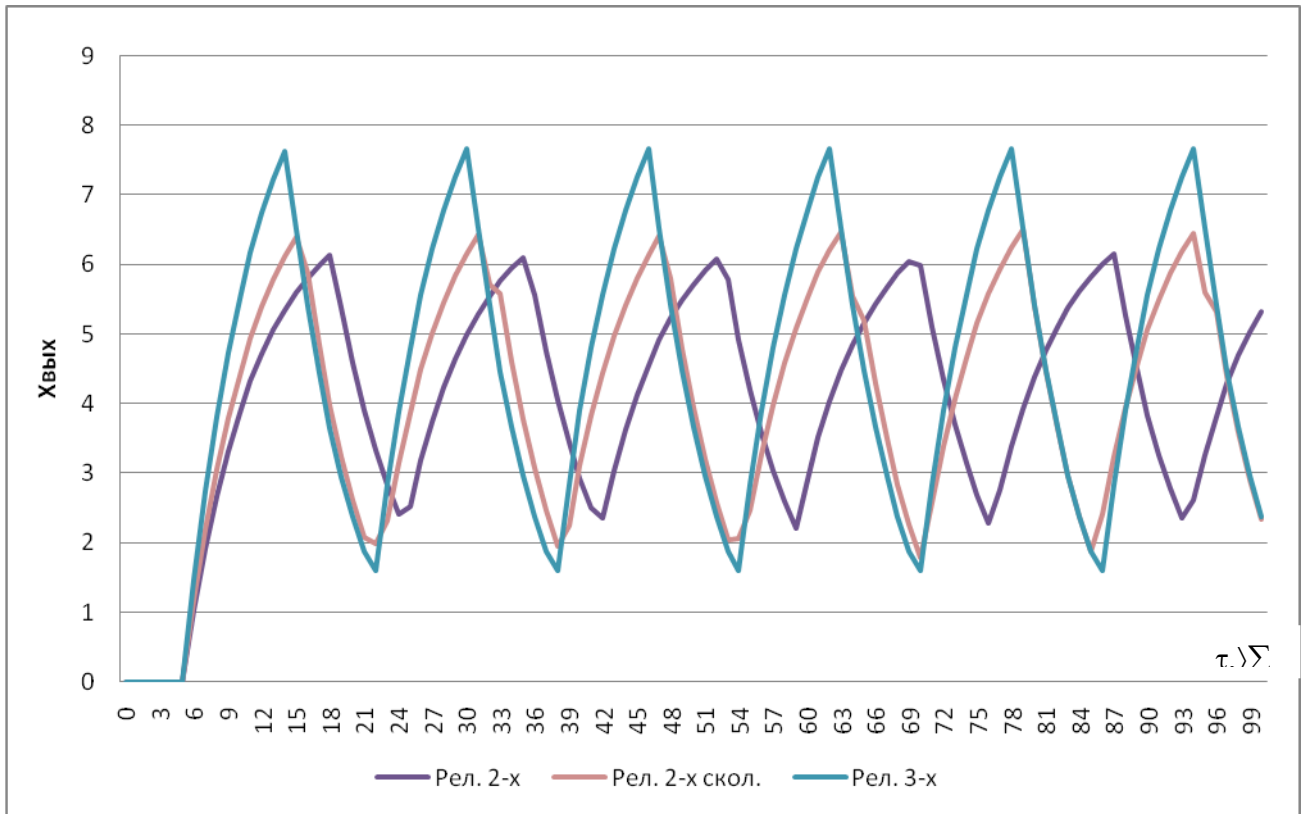


а)

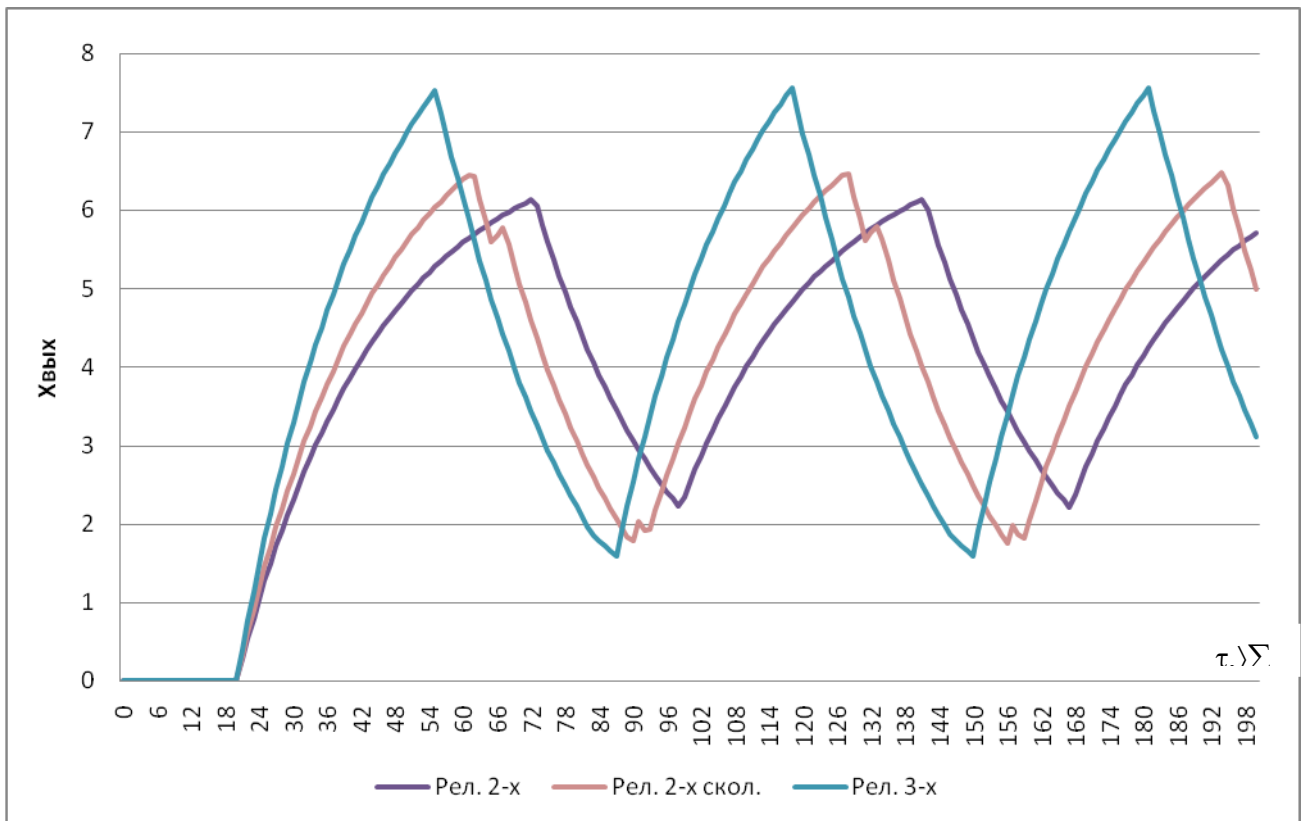


б)

Рисунок. 7.2.3 Перехідні процеси для систем з релейними законами регулювання при відношенні $\tau/T=0.5$ при $\tau = \text{const}$ (а) и $T = \text{const}$ (б)

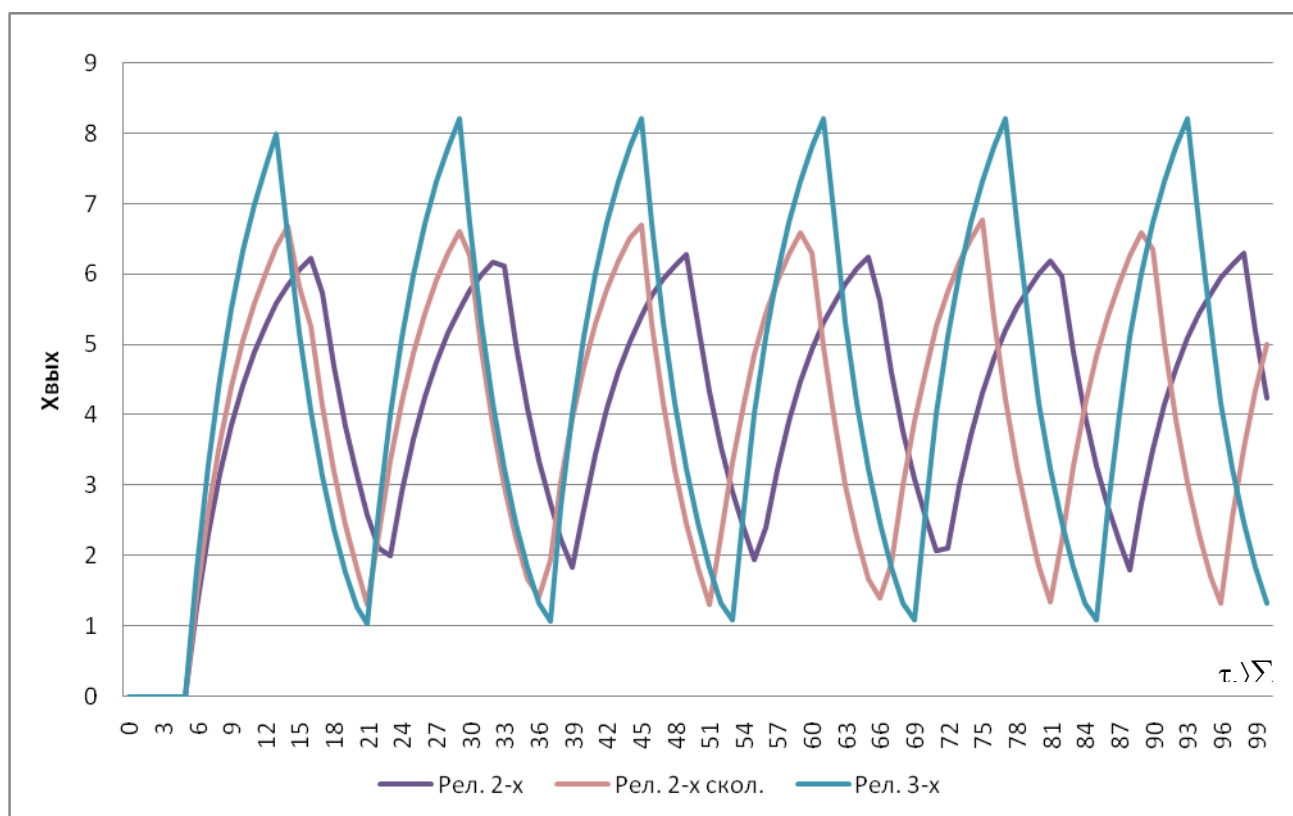


а)

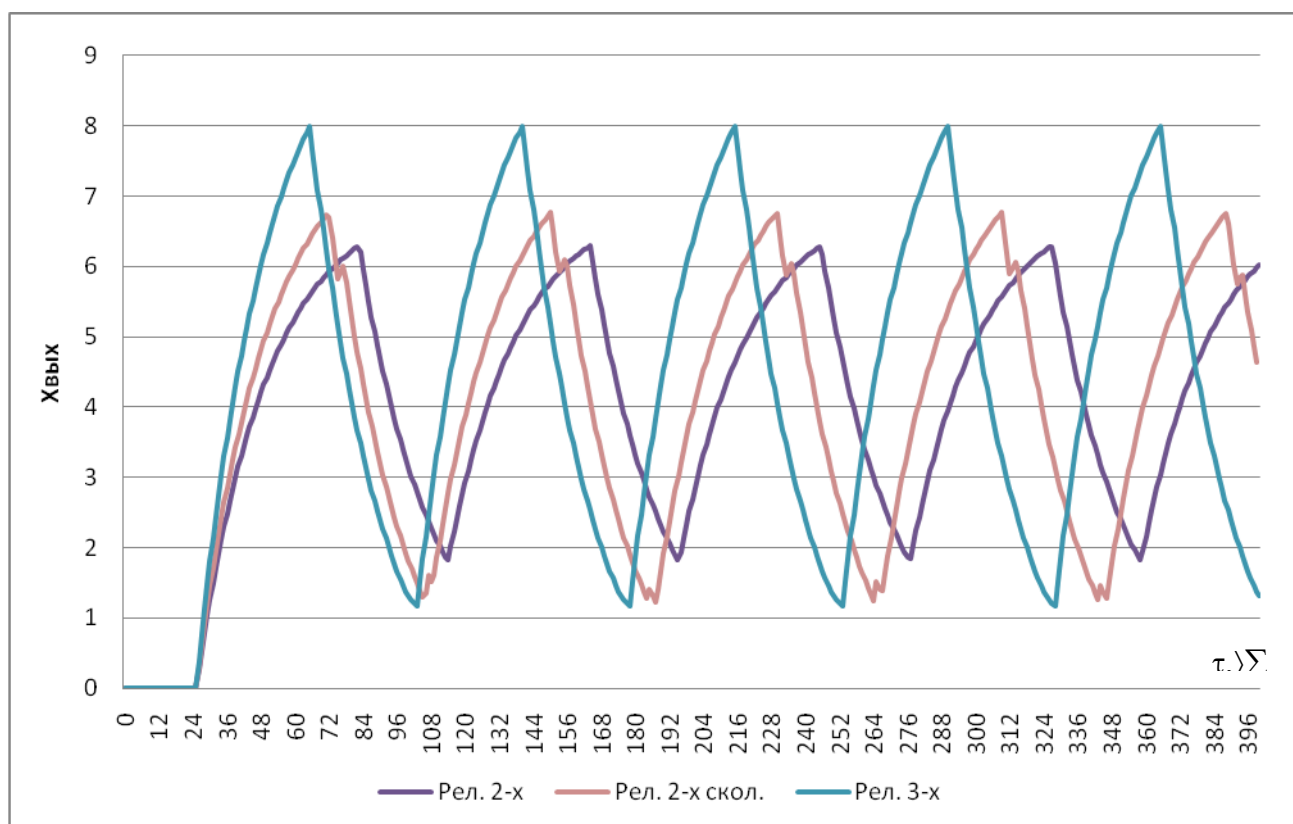


б)

Рисунок. 7.2.4 Перехідні процеси для систем з релейними законами регулювання при відношенні $\tau/T=0.8$ при $\tau = \text{const}$ (а) и $T = \text{const}$ (б)



а)



б)

Рисунок. 7.2.5 Перехідні процеси для систем з релейними законами регулювання при відношенні $\tau/T=1$ при $\tau = \text{const}$ (а) и $T = \text{const}$ (б)

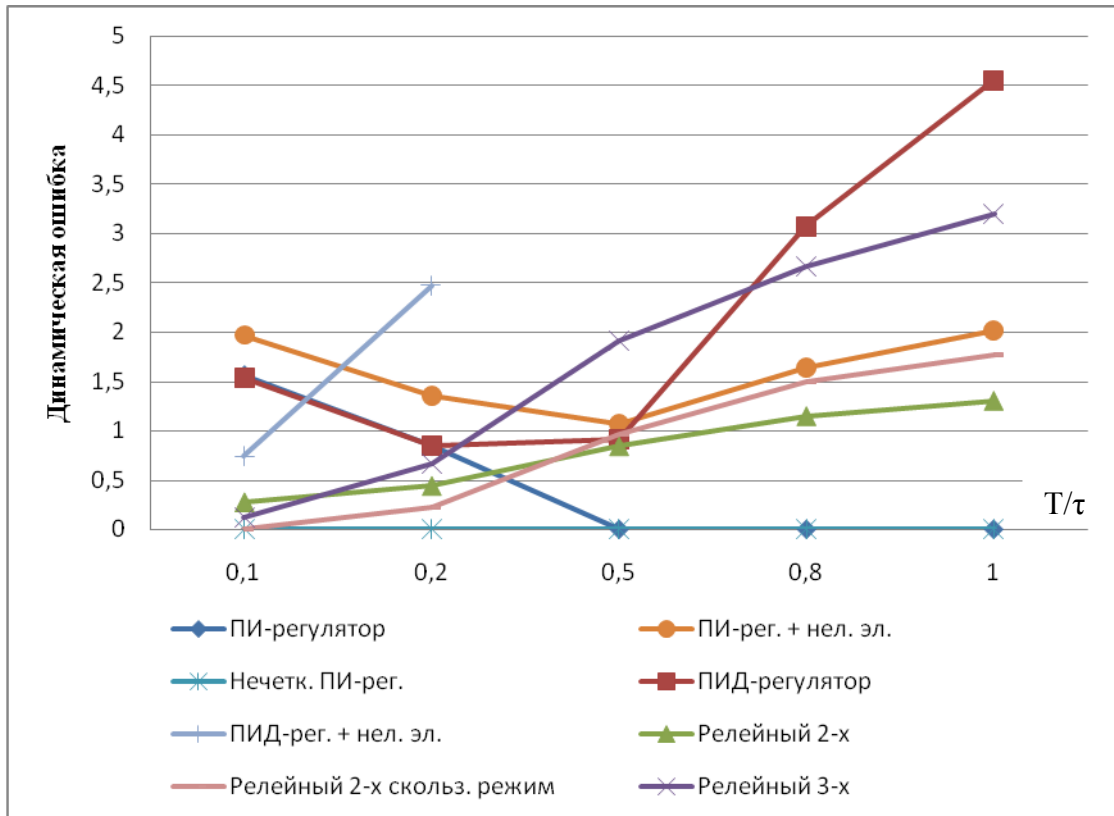
На рисунках 7.2.1-7.2.5 показані перехідні процеси для систем з релейними законами регулювання. В обох випадках, при фіксованому значенні часу транспортного запізнювання або постійної часу об'єкта, при збільшенні значення відносини τ/T збільшується динамічна помилка і коливальність в системі. Найкраща якість перехідного процесу для релейних систем спостерігається при значенні $\tau/T < 0.2$.

7.3 Порівняння робастності для всіх перехідних процесів

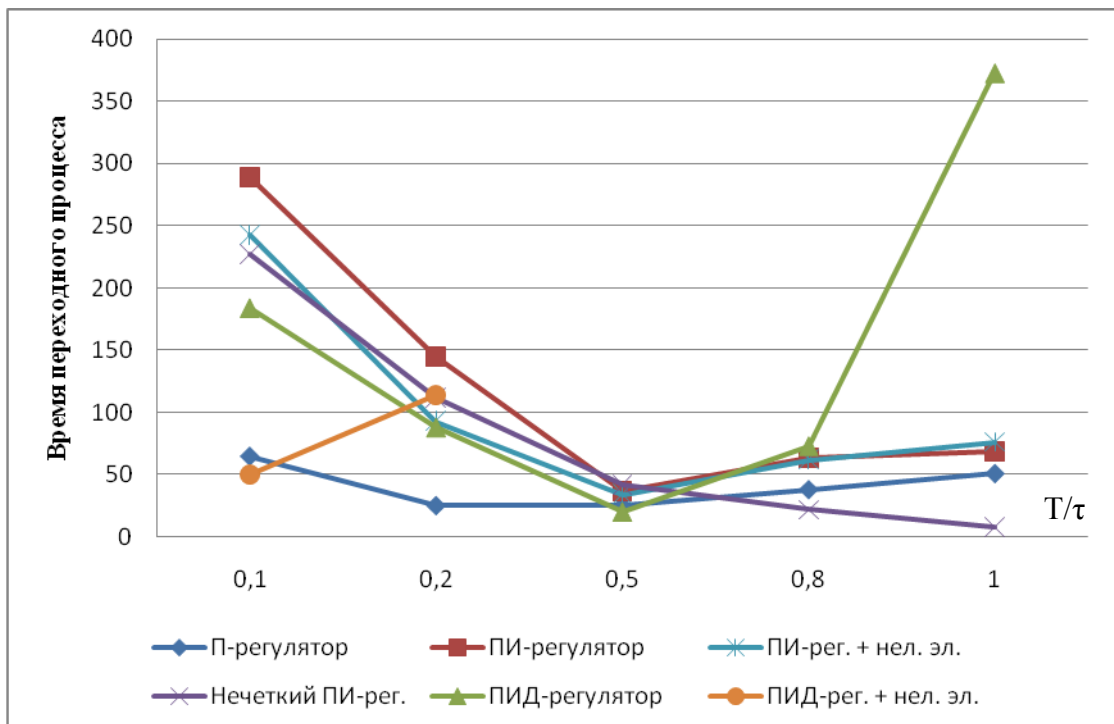
Оцінювати робастність отриманих перехідних процесів будемо шляхом порівняння чутливості тривалості перехідного процесу і динамічної помилки до зміни параметрів об'єкта управління. Для кожного перехідного процесу обчислимо динамічну помилку і час перехідного процесу.

Динамічна помилка розрахована для всіх перехідних процесів крім системи з П-регулятором, так як П-регулятор не забезпечує вихід поточного значення на завдання і оцінювати якість для даної системи можна тільки по часу перехідного процесу. Час перехідного процесу розраховано для всіх систем, крім тих в яких регулювання здійснювалося релейним елементом, який забезпечує постійні автоколивання і виходить коливальний перехідний процес.

Отримані значення якості перехідних процесів, які описуються значенням динамічної помилки і тривалості перехідного процесу, представлені на малюнках 7.3.1 та 7.3.2. На графіках представлені результати для кожного алгоритму регулювання при різних значеннях відношення τ/T від значення якого в більшості випадків і рекомендується здійснювати вибір алгоритму регулювання. Кожен алгоритм показав задовільні результати у відповідному для нього діапазоні, а при виході з цього діапазону погіршується якість перехідного процесу і система навіть може вийти зі стану рівноваги.

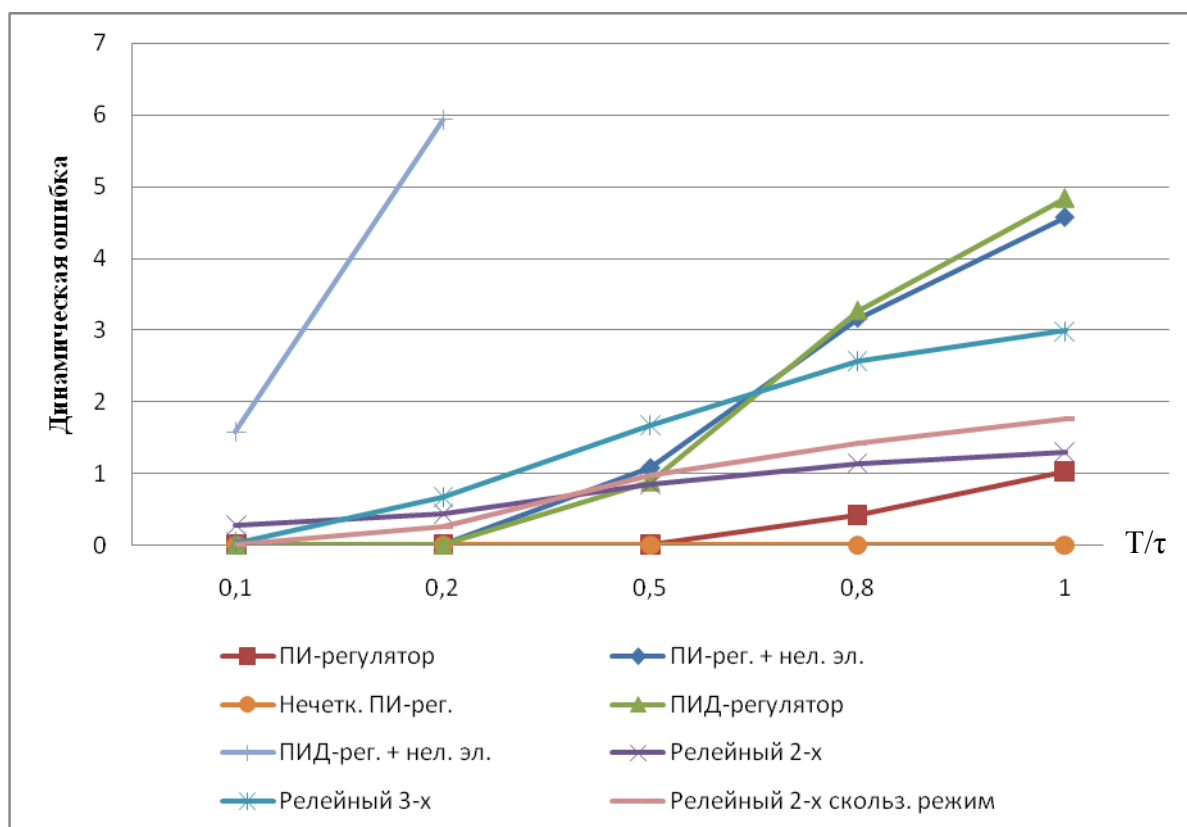


а)

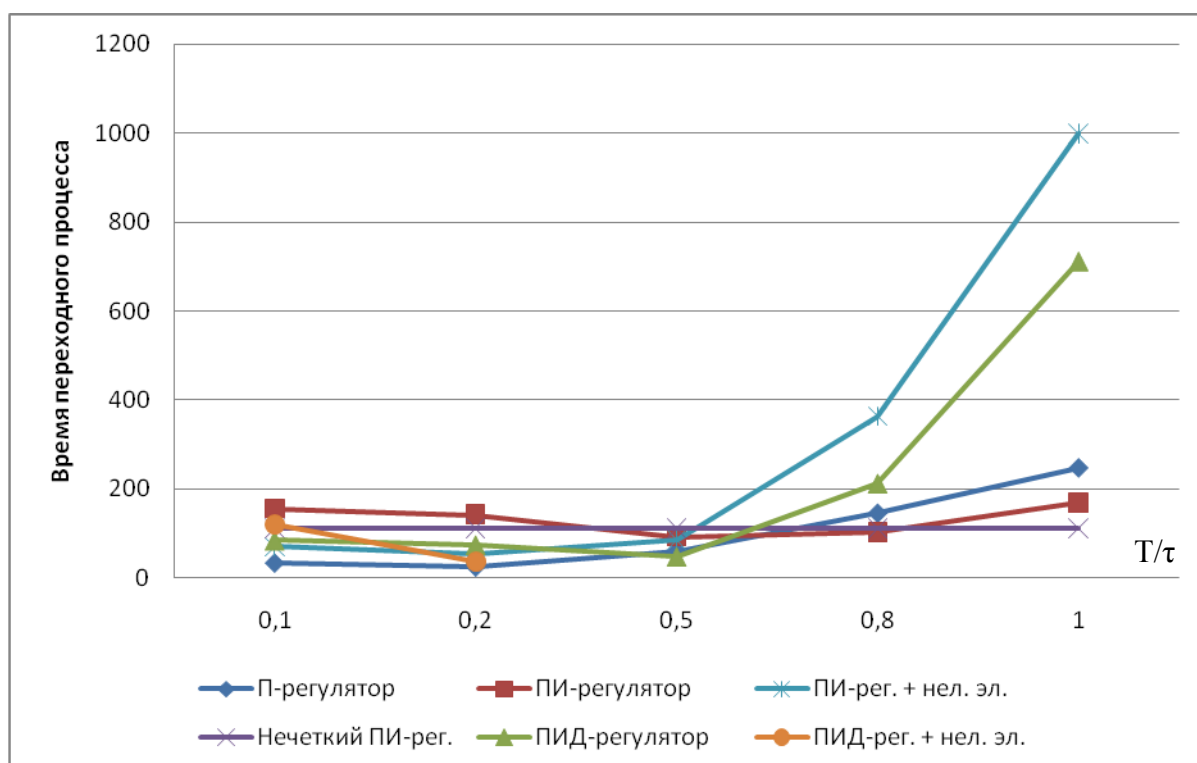


б)

Рисунок. 7.3.1 Динамічна помилка (а) і час переходного процесу (б) для систем з різними законами регулювання при різних значеннях відношення τ/T ($\tau=\text{const}$)



а)



б)

Рисунок. 7.3.2 Динамічна помилка (а) і час переходного процесу (б) для систем з різними законами регулювання при різних значеннях відношення τ/T ($T=\text{const}$)

7.4 Висновки до розділу 7

1. Кожен алгоритм забезпечує робастність, але в певному досить вузькому діапазоні зміни параметрів об'єкта управління і ці діапазони не збігаються один з одним.

2. Самою невеликий робастність до зміни параметрів об'єкта показав ПД-регулятор. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням запізнювання в системі різко зростають негативні фазові зрушення, що знижує ефект дії диференціальної складової регулятора, збільшуються динамічна помилка і час перехідного процесу. Тому якість роботи ПД-регулятора для систем з великим запізненням стає порівнянною з якістю роботи П-регулятора.

3. ПД регулятори дозволяють для об'єктів постійної часу об'єкта (інерційністю) T і з малим транспортним запізнюванням $\tau/T < 0.2$ забезпечити гарну якість регулювання: неузгодженість регулювання $E < 1\%$ (від заданої точки), достатня малий час виходу на режим і невисоку чутливість до зовнішніх збурень.

4. Релейні регулятори показують досить непогані показники якості, які можна оцінити тільки динамічної помилкою, але у вузькому діапазоні відносини τ/T , а саме $\tau/T < 0.2$. Для поліпшення якості релейних систем також проводилося моделювання з використанням ковзаючого режиму. У цьому режимі частота перемикання релейного регулятора прагне до нескінченності. Введення ковзаючого режиму дозволяє здійснити лінеаризацію релейного системи.

5. Одні з найкращих результатів показав нечіткий П-регулятор. Це пов'язано з тим, що в ньому відсутня будь-яка математична модель. Даний регулятор забезпечує нульову динамічну помилку і порівняно невеликий час перехідного процесу, що залежить тільки від постійної часу об'єкта і не залежить від часу транспортного запізнювання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев : Радиоаматор, 2008. 972с.
2. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. Пер. с англ. Б. И. Копылова. – Москва: Лаборатория базовых знаний. 2002. – 832с.
3. Пупков К.А., Егунов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Синтез регуляторов систем автоматического управления. Том 3. – Москва: Изд-во МГТУ. 2004. – 616с.
4. Смирнов Н.И., Сабанин В.Р. Робастная настройка двухконтурных автоматических систем регулирования. Теплоэнергетика. 2007.-№7-С.52-60
5. Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. - СПб: Наука. 2002. - 282с.
6. К. Асаи, Д. Ватада, С. Иван. Прикладные нечеткие системы. Пер с япон. - Москва: Мир. 1993. - 368с.
7. Алиев Р.А., Захарова Э.Г., Ульянов С.В. Нечеткие регуляторы и интеллектуальные промышленные системы управления. Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибернетика. Том 32. - Москва: ВИНТИ АН СССР. 1991. – 313с.
8. Алиев Р.А., Захарова Э.Г., Ульянов С.В. Нечеткие модели управления динамическими системами. Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. Том 29. - Москва: ВИНТИ. 1990. – 201с.
9. Сироджа И. Б., Соколов А. Ю., Калинин В. В. Иерархические интеллектуальные системы управления с нечеткой логикой. *Системный анализ, управление и информационные технологии. Вестник Харьковского государственного политехнического университета* : сборник научных трудов. 1999. Вып. 70. С. 187 - 193.
10. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. - Москва: Наука. 2002. - 303с.
11. Веремей Е.И. Введение в современные методы оптимизации систем управления. Exponenta Pro Математика в приложениях. Научн. практ. журн. 2003.-№3-С.27-31.

12. Олссон Г., Пиани Дж. Цифровые системы автоматизации и управления. - СПб: Невский Диалект. 2001. - 557с.
13. Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Грабовский Г.Г., Рюмшин Н.А. Нейронные сети в системах автоматизации. - К.: Техника. 1999. - 364с.
14. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю., Антонов В.Н. Неиросетевые системы управления. - СПб: Издательство С.-Петербургского университета. 1999. - 265с.
15. Афлятунов Р. М., Джарагян М. А., Фокин А. Л. Робастное управление линейным инерционным объектом с запаздыванием. Автоматизация и современные технологии. 2004.-№10-С.36-43.
16. Фокин А.Л., Сыроквашин В.В., Бороздин П.А. Робастное управление технологическими процессами: учебное пособие. - СПб.: СПбГТИ(ТУ). 2007. - 201с.
17. Бороздин П.А., Сыроквашин В.В. Робастное управление линейным объектом. Тез. докл. межвуз. научно-техн. конф. Системы управления и передачи информации. Санкт-Петербург. 2007. - С.44-45.
18. Бороздин П.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. Уменьшение чувствительности системы к неопределенности в задании запаздывания. Тез. докл. Межд. конф. Математические методы в технике и технологиях. Ярославль. ЯГТУ. 2007.-№2-С.121-123.
19. Загашвили Ю. В. Учет требований к показателям качества при синтезе систем управления с максимальной степенью устойчивости. Известия РАН Теория и системы управления. 2002.-№ 2- С.31-34.
20. Фокин АЛ, Сыроквашин В.В., Бороздин П.А., Рудакова И.В. Синтез робастных систем стабилизации технологических процессов на основе расширенной модели динамики. - ГОУ ВПО СПбГТИ(ТУ). 2008. - 264с.
21. Фокин А.Л., Харазов В.Г. Управление линейным объектом с запаздыванием. Автоматизация и современные технологии. 2002.-№5- С.13-17.
22. Бороздин П.А., Сыроквашин В.В. Робастное управление линейным объектом. Тез. докл. межвуз. научно-техн. конф. Системы управления и передачи информации. Санкт-Петербург. 2007.-С.44-45.
23. Бороздин П.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. Параметрический синтез робастного регулятора для объекта с запаздыванием. Тез. докл. Межд. конф. Математические методы в технике и технологиях. Ярославль. 2007.-№2-С.124-126.

24. Бороздин П.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. Синтез робастного регулятора для инерционного объекта. Тез. докл. Межд. конф. Математические методы в технике и технологиях. Ярославль. 2007.-№2-С.123-124.

25. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. - Москва: Мир. 1977. - 650с.

26. Афлятунов Р.М., Фокин А.Л., Харазов В.Г. Робастная стабилизация теплового режима работы трубчатых нагревательных печей нефтеперерабатывающей промышленности. Автоматизация в промышленности. 2004.-№7-С.25-28.

27. Фокин А.Л. Метод разделения движений и синтез робастной системы регулирования. Изв. вузов. Приборостроение. 2002.-№4- С.11-16.

28. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. - Москва: Москва. 1966. - 371с.