

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

тема роботи:

**«Розробка псевдолінійного регулятора для підвищення якості
систем автоматичного керування нестационарними об'єктами»**

Виконав студент гр. АКІТР-23ск _____ Кулинич Д. С.

Керівник _____ Маринич І. А.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 26 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТР-23ск Кулинич Дмитру Сергійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Розробка псевдолінійного регулятора для
підвищення якості систем автоматичного керування нестационарними
об'єктами»

затверджено наказом по університету № 172с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка, презентація у
Microsoft PowerPoint в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Маринич І. А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>05.06.26</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р.

Керівник _____ / Маринич І. А./

7. **Запевнення:** Я, Кулинич Дмитро Сергійович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Кулинич Д. С./

АНОТАЦІЯ

Кулинич Д. С. Розробка псевдолінійного регулятора для підвищення якості систем автоматичного керування нестационарними об'єктами: кваліфікаційна робота бакалавра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 72 с.

Метою роботи є підвищення якості систем автоматичного керування нестационарними об'єктами шляхом розробки, дослідження та впровадження псевдолінійного регулятора з амплітудним подавленням.

У першому розділі в розглянуто теоретичні основи побудови систем автоматичного керування з псевдолінійними регуляторами. Показано, що псевдолінійні пристрої поєднують ефективність лінійних фільтрів із можливістю адаптації, забезпечуючи високу точність, стабільність і швидкодію управління. Це дозволяє обґрунтовано вибрати оптимальну структуру регулятора для систем із змінними та невизначеними параметрами об'єкта.

У другому розділі проведена було дослідження роботу псевдолінійного регулятора для об'єктів управління у складі системи автоматичного регулювання. Дослідження властивостей коригуючих пристроїв та САР здійснювалось із використанням програмних пакетів Matlab та MathCad, а програмна реалізація псевдолінійного регулятора для систем автоматичного регулювання об'єктами виконана в середовищі STEP 7 на мові FBD.

Результати дослідження показали ефективність розробленого псевдолінійного регулятора для систем автоматичного регулювання об'єктами.

КОРЕКТУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, ПСЕВДОЛІНІЙНИЙ РЕГУЛЯТОР, ЯКІСТЬ КЕРУВАННЯ, MATLAB, STEP 7

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Кулинич Д. С.			АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Маринич І. А.								3	1
								АКНТ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ З ПСЕВДОЛІНІЙНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ.....	9
1.1 Структура та принципи побудови систем управління.....	9
1.2 Структура та принципи побудови адаптивних систем із коригуючим пристроєм, що підлаштовується	12
1.3 Аналіз коригуючих пристроїв.....	13
1.3.1 Лінійні коригуючі пристрої.....	13
1.3.2 Нелінійні та псевдолінійні коригуючі пристрої.....	15
1.3.2.1 Нелінійні коригуючі пристрої.....	15
1.3.2.2 Псевдолінійні коригуючі пристрої.....	16
1.4 Вибір псевдолінійного коригуючого пристрою.....	17
1.5 Класичний ПІД-регулятор та оцінка якості керування.....	24
Висновки за розділом:.....	26
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПСЕВДОЛІНІЙНОГО РЕГУЛЯТОРУ САК.....	28
2.1 Огляд засобів моделювання	28
2.2 Розробка систем керування з псевдолінійним регулятором з адаптивною структурою в середовищі MATLAB.....	34
2.3 Програмна реалізація адаптивного коректуючого пристрою на контролері Simatic S7-400.....	52

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Кулинич Д. С.			ЗМІСТ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Маринич І. А.								4	2
								АКНТ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

2.3.1 Реалізація амплітудного каналу.....	52
2.3.2 Реалізація ПД-регулятора.....	54
2.3.3 Реалізація об'єкта другого порядку.....	56
Висновки за розділом:.....	59
ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	64
ДОДАТОК А. Лістинг m-файлу «step1212» блоку S-Function у середовищі Simulink.....	66
ДОДАТОК Б. Лістинг m-файлу «err22» блоку S-Function у середовищі Simulink.....	68
ДОДАТОК В. Лістинг m-файлу «errT1» блоку S-Function у середовищі Simulink	69

ВСТУП

Системи автоматичного керування (САК) є невід'ємною складовою сучасних технологічних процесів у промисловості, енергетиці, транспорті та інших галузях, де необхідне точне та своєчасне регулювання параметрів об'єкта. Якість роботи таких систем безпосередньо впливає на ефективність виробництва, безпеку технологічних процесів та економію ресурсів. Зазвичай при проєктуванні САК передбачається, що характеристики об'єкта управління та параметри зовнішніх впливів відомі і залишаються стабільними або змінюються в обмежених межах. Проте на практиці часто виникають ситуації, коли об'єкт управління проявляє непередбачувану поведінку через зміни його внутрішніх властивостей, вплив зовнішніх факторів або появу додаткових завад. Такі зміни можуть призводити до відхилень процесу регулювання від очікуваного результату, погіршення показників точності та стабільності системи, а також до зростання ризику аварій та втрат у технологічних процесах.

Одним із перспективних напрямів підвищення якості САК є використання спеціальних коригуючих пристроїв, які дозволяють адаптувати характеристики регулятора до реальних умов експлуатації. Псевдолінійні регулятори є ефективним прикладом таких пристроїв, оскільки вони поєднують переваги класичних ПД-регуляторів, відомих своєю простотою та надійністю, із можливістю гнучко реагувати на непередбачувані зміни параметрів об'єкта. Це робить їх особливо актуальними для управління нестаціонарними об'єктами різного порядку, де класичні методи регулювання можуть виявитися недостатньо ефективними.

Актуальність даної роботи обумовлена сучасними вимогами до підвищення точності та стабільності САК у умовах непередбачуваних змін об'єкта управління. Розробка та впровадження псевдолінійного регулятора

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Кулинич Д. С,			ВСТУП			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Маринич І. А,								6	2
								АКНТ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

дозволяє поліпшити показники якості регулювання, знизити час переходу системи до заданого стану, зменшити перерегулювання та коливання вихідних величин. Такі покращення є особливо важливими для об'єктів, що піддаються частим зовнішнім впливам, зміні параметрів середовища або технічним несправностям. Ефективна реалізація псевдолінійного регулятора сприяє підвищенню надійності та стабільності технологічних процесів, зменшенню витрат енергоресурсів і матеріалів, а також зниженню ймовірності аварійних ситуацій, що робить її актуальною для промислових підприємств, енергетичних систем та транспортних об'єктів.

Об'єкт дослідження – системи автоматичного керування нестационарними об'єктами різного порядку, що характеризуються зміною параметрів в процесі роботи та непередбачуваними зовнішніми впливами.

Предмет дослідження – псевдолінійний регулятор та його вплив на показники якості регулювання, стабільність та адаптивність систем автоматичного керування.

Мета роботи полягає у підвищенні якості систем автоматичного керування нестационарними об'єктами шляхом розробки, дослідження та впровадження псевдолінійного регулятора з амплітудним придушенням.

Для досягнення поставленої мети передбачається виконати такі завдання:

- Проаналізувати сучасні методи підвищення якості систем автоматичного керування та визначити переваги використання псевдолінійних коректорів у порівнянні з класичними методами.
- Вибрати псевдолінійний коректор з амплітудним придушенням і розробити його математичну модель для різних типів об'єктів управління.
- Дослідити динамічні властивості розробленого регулятора в складі системи автоматичного регулювання, оцінити його ефективність у різних режимах роботи та умовах змінних параметрів об'єкта.

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Реалізувати програмну модель псевдолінійного регулятора у програмних пакетах Matlab, а також у середовищі STEP 7 на мові FBD для практичної апробації.

– Проаналізувати результати досліджень та зробити висновки щодо доцільності застосування псевдолінійного регулятора для підвищення стабільності та точності управління нестационарними об'єктами.

Практична значимість дослідження полягає в тому, що розроблений псевдолінійний регулятор може застосовуватися для підвищення ефективності класичних ПІД-регуляторів при роботі з об'єктами, що мають непередбачувані зміни параметрів.

Запропонована модель дозволяє поліпшити якість управління, забезпечити стабільність процесів та підвищити надійність систем автоматичного керування. Вона може бути використана як база для подальших досліджень і впровадження в промислових технологічних процесах, енергетичних системах та транспортних об'єктах, де важлива точність та адаптивність регулювання.

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ З ПСЕВДОЛІНІЙНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

1.1 Структура та принципи побудови систем управління

Існує кілька підходів, які забезпечують вирішення завдань управління об'єктами з змінними та невизначеними параметрами. Перший підхід базується на використанні регулятора, структура та параметри якого не змінюються з часом; у його основі лежить властивість зворотного зв'язку. Другий підхід полягає у виборі такої структури системи та параметрів, при яких система матиме мінімальну чутливість до зміни властивостей об'єкта управління; у цьому випадку використовуються «грубі» (робастні) системи [1]. Третій підхід полягає у використанні принципу, який називається адаптивним управлінням [2,4].

Основна ідея адаптивного управління – компенсація впливу нестабільності та невизначеності ОК шляхом введення в регулятор іншої спеціально організованої нестабільності.

Адаптивна система управління – це система, у якій для досягнення потрібної якості процесу управління, при наявності у ОК нестабільності параметрів, автоматично здійснюється цілеспрямована зміна структури та параметрів регулятора на основі робочої інформації. Таким чином, адаптивна система пристосовується до зміни параметрів ОК.

Адаптивна САУ має структуру, представлену на рисунку 1.1. На рисунку використані такі позначення: БА – блок адаптації; Р – регулятор; ОК – об'єкт керування; $g(t)$ – задаючий вплив; $u(t)$ – керуючий вплив; $y(t)$ – вихідний параметр ОК; $q(t)$ – нестабільність параметрів ОК; $z(t)$ – збурюючий вплив

					<i>КНУ КРБ.174.26.03.01.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>РОЗДІЛ 1</i>		
Розроб.		Кулинич Д. С.					
Перевір.		Маринич І. А.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затверд.		Маринич І.А.			<i>АКНТ АКІТР-23ск</i>		
						Літ.	Арк.
							9
							15

. $k(t)$ – вектор впливів для синтезу параметрів регулятора.

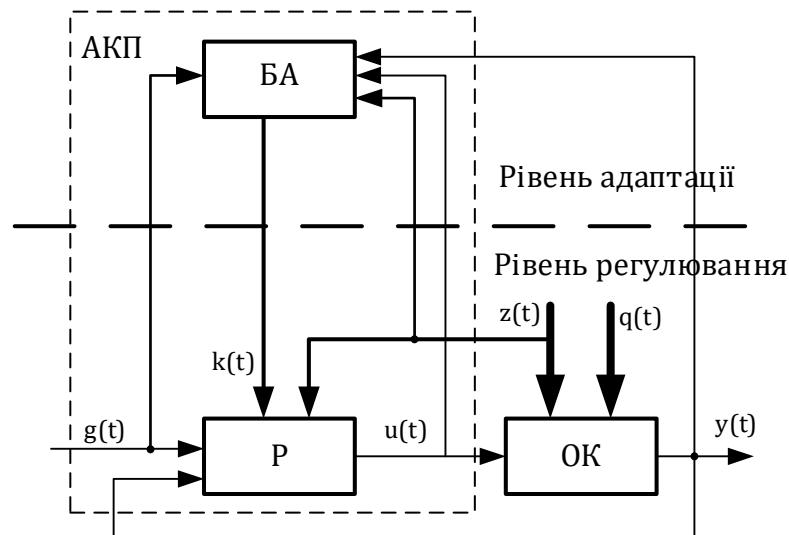


Рисунок 1.1 – Структура адаптивної САК

Адаптивна система є ієрархічною, у ній присутні, як мінімум, два рівні.

На нижньому рівні вирішуються завдання управління. Ці завдання, залежно від характеру задаючого впливу, поділяються на три види: стабілізації, програмного управління та слідкування.

Завдання верхнього рівня полягає у стабілізації або оптимізації характеристик основного контуру САУ за умов зміни динамічних властивостей ОУ.

При побудові контуру адаптації використовуються два основних принципи: ідентифікаційний [5] та безідентифікаційний (прямого дії) [3].

Структура адаптивної системи з ідентифікатором представлена на рисунку 1.2.

Ідентифікатор (І) – пристрій, який за спостережуваними вхідними та вихідними сигналами ОК автоматично будує модель. Ідентифікатор може бути окремим пристроєм або частиною програми.

Блок адаптації в такій системі складається з ідентифікатора та обчислювально-виконавчого пристрою (ОВП).

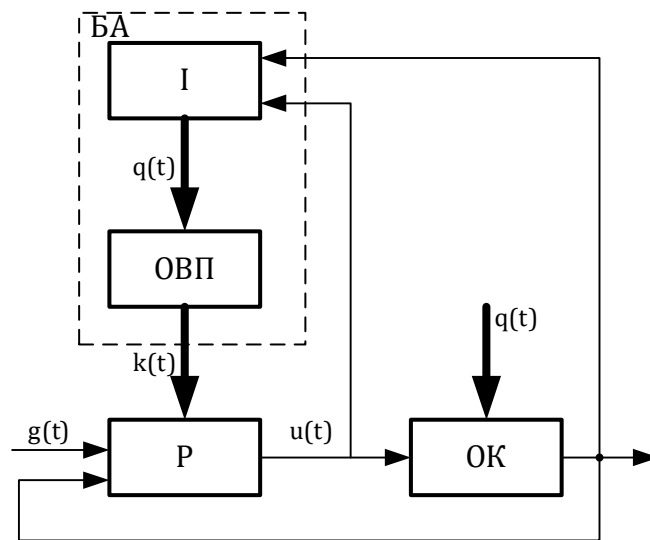


Рисунок 1.2 - Структура адаптивної системи з ідентифікатором

У більшості випадків здійснюється параметрична ідентифікація. За отриманою моделлю ОУ в режимі реального часу здійснюється синтез регулятора.

Адаптивна система прямого дії має вигляд, представлений на рисунку 1.3.

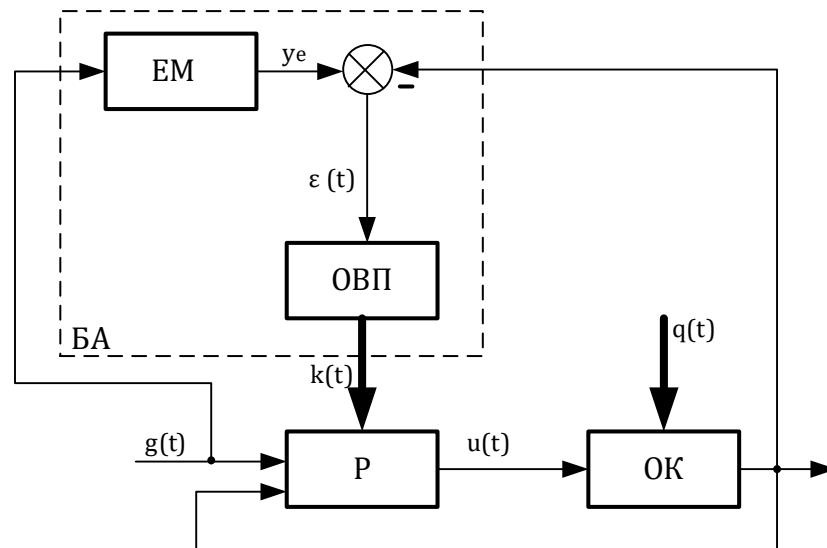


Рисунок 1.3 – Структура адаптивної системи прямої дії

Класичним прикладом системи прямого дії є система з еталонною моделлю (ЕМ) [4]. Блок адаптації містить еталонну модель, яка за своїми динамічними характеристиками є еталоном для основного контуру системи. ЕМ і основний контур з'єднані паралельно, вихідні сигнали порівнюються, і їхня

різниця $e(t)$ використовується для налаштування параметрів регулятора. Метою самонастроювання є зведення $e(t)$ до нуля.

1.2 Структура та принципи побудови адаптивних систем із коригуючим пристроєм, що підлаштовується

В основу побудови адаптивної системи з коригуючим пристроєм, що підлаштовується покладені такі принципи:

- Принцип підлаштування КП з постійним налаштуванням регулятора.
- Принцип багаторежимності роботи блока адаптації.
- Принцип оцінки якості управління за векторним критерієм.
- Принцип структурної та параметричної адаптації.
- Принцип автоматичного вибору типу пробного впливу.

Принцип підлаштування коригуючого пристрою полягає в тому, що перед запуском системи в роботу проводиться ідентифікація об'єкта управління, визначення параметрів налаштування регулятора, визначення структури коригуючого пристрою та його налаштування. У процесі роботи системи параметри регулятора не змінюються. Під час роботи системи відбувається оцінка стану системи управління та зміна за закладеним алгоритмом параметрів активного коригуючого пристрою, тобто того коригуючого пристрою, який забезпечує потрібні показники якості САУ.

Принцип багаторежимності роботи блока адаптації полягає в тому, що блок адаптації може працювати у різних режимах. До таких режимів належить режим роботи з ідентифікуючим впливом, який полягає у подачі на об'єкт управління пробного сигналу, та режим роботи без додаткового впливу на об'єкт управління. При цьому тип режиму може задаватися під час запуску системи в роботу або обиратися автоматично в процесі роботи системи з урахуванням її поточного стану.

					КНУ КРБ.174.26.03.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Принцип оцінки якості управління за векторним критерієм полягає в тому, що під час роботи на заданому часовому відрізку визначається не лише значення інтегрального критерію якості, а й ряд інших показників, які характеризують якість системи. Знання цих показників дозволяє розрахувати значення узагальненого скалярного критерію та визначити тип необхідного активного коригуючого пристрою та його параметри.

Принцип структурної та параметричної адаптації полягає в тому, що в процесі роботи визначаються не лише параметри активного коригуючого пристрою, а й обирається його тип, а отже і структура.

Принцип автоматичного вибору типу та параметрів пробного впливу полягає в тому, що за достатнім запасом стійкості характер та параметри пробного впливу обираються з умови, що вони надають такий вплив на вихід об'єкта управління, при якому аналіз цього впливу та визначення кількісних показників не викликає особливих труднощів. При наближенні до межі стійкості подача цих впливів або припиняється, або їхня амплітуда зменшується. Реалізація цього принципу дозволяє уникнути погіршення якості управління при знаходженні системи поблизу межі стійкості.

1.3 Аналіз коригуючих пристроїв

Для зміни динамічних та статичних характеристик систем автоматичного управління застосовуються лінійні коригуючі пристрої (ЛКП), нелінійні коригуючі пристрої (НКП) та псевдолінійні коригуючі пристрої (ПКП) [1, 3, 7].

1.3.1 Лінійні коригуючі пристрої

Питання синтезу лінійних коригуючих пристроїв, що застосовуються при синтезі САУ, розглянуті у великій кількості робіт [5, 7, 9].

При синтезі ЛКП можуть використовуватися різні підходи. Класичним є підхід, заснований на використанні бажаних логарифмічних частотних

					КНУ КРБ.174.26.03.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

характеристик, за якими визначаються частотні характеристики послідовного або паралельного коригуючого пристрою [5, 9].

В інших випадках, залежно від мети використання коригуючого пристрою, можуть застосовуватися пристрої певного типу.

Як такими пристроями можуть використовуватися наступні типові ланки: інтегруюча ланка першого порядку, пропорційно-диференційна ланка першого порядку, аперіодична ланка, інтегро-диференційна ланка [9, 11].

Інтегруючі ланки використовуються для підвищення точності управління за рахунок збільшення ступеня астатизму. Коригуючі ланки з диференціальною складовою (пропорційно-диференційна, інтегро-диференційна) застосовуються при необхідності підвищити запас стійкості. Аперіодичну ланку можна розглядати як низькочастотний фільтр. Ця ланка використовується для фільтрації високочастотних перешкод.

Можливості лінійних коригуючих пристроїв на сьогодні досить добре вивчені, але вони суттєво обмежені.

Недоліком лінійних коригуючих пристроїв є те, що при зміні параметрів таких пристроїв змінюються як АЧХ, так і ФЧХ. У цьому випадку, отримавши необхідну АЧХ, можна отримати небажану ФЧХ і навпаки. Це пояснює принципову суперечність між коливальністю та швидкодією [3].

Проте, незважаючи на обмежені можливості лінійних коригуючих пристроїв, вони здатні у багатьох випадках помітно покращити якість систем управління. Особливо це стосується лінійних коригуючих пристроїв, яким надано властивість адаптації. У цьому зв'язку актуальною є розробка механізмів адаптації на основі сучасного математичного апарату, зокрема на базі апарату нечіткої логіки [7].

Слід зазначити, що при використанні лінійних коригуючих пристроїв у системі управління лінійним об'єктом спрощується процедура синтезу та дослідження властивостей системи управління. Методи аналізу та синтезу лінійних систем управління наразі досить добре розроблені та мають високу

точність. При використанні нелінійної корекції доводиться користуватися наближеними методами.

1.3.2 Нелінійні та псевдолінійні коригуючі пристрої

1.3.2.1 Нелінійні коригуючі пристрої. Призначення коригуючих пристроїв у системах автоматичного управління полягає у забезпеченні необхідного запасу стійкості та потрібної якості. У [7] показано, що найбільш бажаними коригуючими пристроями є ті, частотні характеристики яких мають вигляд, представлений на рисунку 1.4.

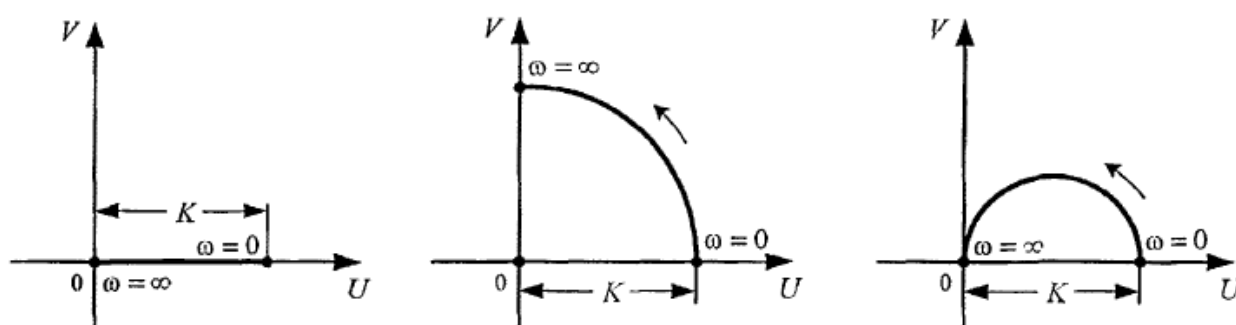


Рисунок 1.4 – Вид частотних характеристик корегуючих пристроїв

Пристрій з амплітудно-фазовою характеристикою, наведеною на рисунку 1.4,а, забезпечує придушення підсилення з ростом частоти без зміни фази, а з частотною характеристикою, показаною на рисунку 1.4,б, забезпечує збільшення фазового випередження з ростом частоти без зміни підсилення. Коригуючий пристрій з частотною характеристикою, показаною на рисунку 1.4,в, забезпечує ослаблення підсилення, супроводжуване збільшенням фазового випередження з ростом частоти.

Нелінійна корекція має ширші можливості порівняно з лінійною [3, 7, 9]. Вона володіє більш різноманітними за формою частотними характеристиками і забезпечує можливість їх зміни залежно від величини вхідного сигналу.

Нелінійні коригуючі пристрої формуються шляхом включення в пряму ланку системи управління або в ланки зворотних зв'язків. Частотні

характеристики таких пристроїв залежать як від частоти, так і від амплітуди вхідного гармонічного сигналу.

Комбіновані коригуючі пристрої складаються як з нелінійних, так і з псевдолінійних.

1.3.2.2 Псевдолінійні коригуючі пристрої. Серед нелінійних пристроїв, що використовуються для корекції систем автоматичного управління, виділяють клас пристроїв, еквівалентні амплітудно-фазові частотні характеристики яких не залежать від амплітуди вхідного сигналу [10, 14]. Такі пристрої прийнято називати псевдолінійними [12].

Зазвичай у псевдолінійних коригуючих пристроїв відсутній взаємозв'язок між амплітудною та фазовою частотними характеристиками. Псевдолінійні коригуючі пристрої складаються з лінійних фільтрів, що створюють фазове випередження або запізнення, та блоків, які виконують різні математичні операції, такі як взяття модуля, визначення знаку, множення, ділення.

Псевдолінійні коригуючі пристрої можуть бути реалізовані у вигляді двох- та трьохканальних нелінійних фільтрів, у яких канали для амплітуди та фази є незалежними.

Вихідний сигнал у цих коригуючих пристроях формується у вигляді добутку сигналів з виходу кожного з каналів. Канал із блоком абсолютної величини формує амплітудні співвідношення, а канал з релейним блоком формує фазові співвідношення. Для підбору відповідних значень амплітудних і фазових співвідношень застосовуються лінійні фільтри.

Найбільше поширення отримали наступні псевдолінійні коригуючі пристрої [14]:

- Коригуючий пристрій з амплітудним придушенням.
- Коригуючий пристрій з фазовим випередженням.
- Коригуючий пристрій з роздільними каналами для амплітуди та фази.

1.4 Вибір псевдолінійного коригуючого пристрою

На сьогодні в теорії автоматичного управління найвідомішим алгоритмом регулювання є ПІД-регулювання [1]. Однак ПІД-регулятор має ряд недоліків, основними з яких є наявність фазового запізнення та висока чутливість до перешкод у вимірювальному каналі, тому він не завжди може забезпечити хорошу якість регулювання.

Для усунення цих недоліків використовують різні способи, наприклад, у регулятор вводять фазове випереджувальне фільтрування [3], або застосовують негативний гістерезис і інтегратор Клегга [2], а також здійснюють псевдолінійну корекцію властивостей ПІД-регулятора [5].

У даній роботі наведені результати дослідження роботи системи автоматичного регулювання (САР) об'єктом управління (ОУ) другого порядку з використанням псевдолінійного регулятора.

До складу цього регулятора входять наступні ланки: псевдолінійна ланка з амплітудним придушенням, пропорційна ланка, диференціальна ланка, інтегруюча ланка на основі інтегратора Клегга та псевдолінійна фазовипереджувальна ланка. Структурна схема псевдолінійного регулятора представлена на рисунку 1.

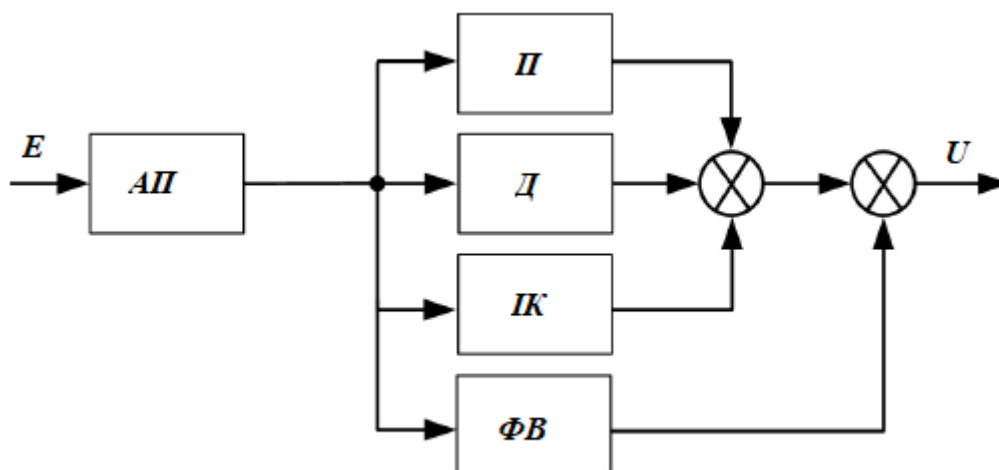


Рисунок 1.5 – Структурна схема псевдолінійного регулятора

На рис. 1.5 наведені такі позначення: АП – псевдолінійна ланка з амплітудним придушенням; П – пропорційна ланка; Д – диференційна ланка; ІК – інтегратор Клегла; ФО – псевдолінійна ланка з фазовим випередженням.

Структурна схема інтегратора Клегла представлена на рисунку 1.6.

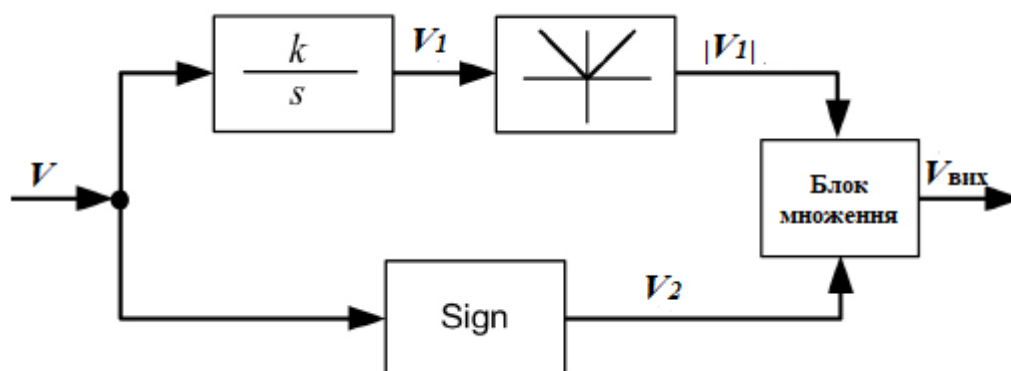


Рисунок 1.6 - Структурна схема інтегратора Клегла

Інтегратор складається з блока інтегрування, блока визначення модуля, оператора Sign та пристрою множення. Перевагою цього інтегратора є невелике фазове запізнення, що вноситься в систему.

Структурна схема псевдолінійної ланки з амплітудним придушенням представлена на рисунку 1.7.

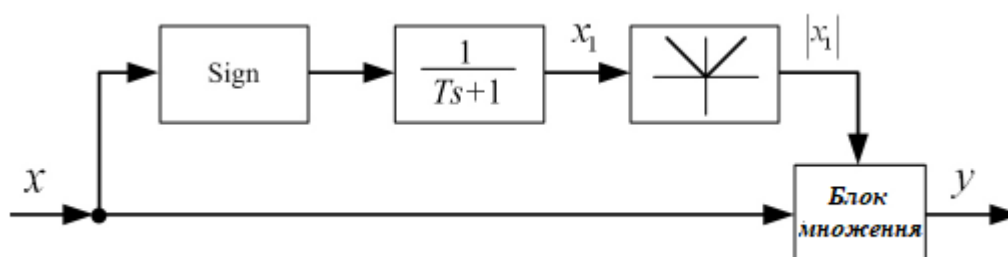


Рисунок 1.7 - Структурна схема псевдолінійної ланки з амплітудним придушенням

Ланка складається з оператора Sign, низькочастотного фільтра, блока визначення модуля та пристрою множення. Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) ланки, отримана в результаті гармонічної лінеаризації, має вигляд:

$$W(j\omega) = a + jb$$

$$a = \frac{8}{\pi^2 \cdot \sqrt{1 + T^2 \omega^2}} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cos(2\theta)\right)$$

$$b = \frac{8}{\pi^2 \cdot \sqrt{1 + T^2 \omega^2}} \cdot \left(\frac{1}{3} \sin(2\theta)\right)$$

$$\theta = -\arctg(\omega T)$$

де ω – кутова частота гармонійних коливань

Аналізуючи наведену вище АФЧХ, можна показати, що при зміні частоти амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) цієї ланки змінюється від значення, рівного 1, до нуля.

Зміна фазової частотної характеристики при різних параметрах коригуючого фільтра відбувається не більше ніж на -20° , тоді як максимальний фазовий зсув аперіодичної ланки першого порядку може досягати -90° .

Ланка працює наступним чином: при виникненні у САР коливань вихідної величини ОК автоматично зменшується коефіцієнт передачі ланки.

Щоб краще зрозуміти, як змінюється сигнал через кожен модуль у структурі коригуючих пристроїв з амплітудним ослабленням, була побудована модель у MATLAB SIMLINK, показана на рисунку 2.3.

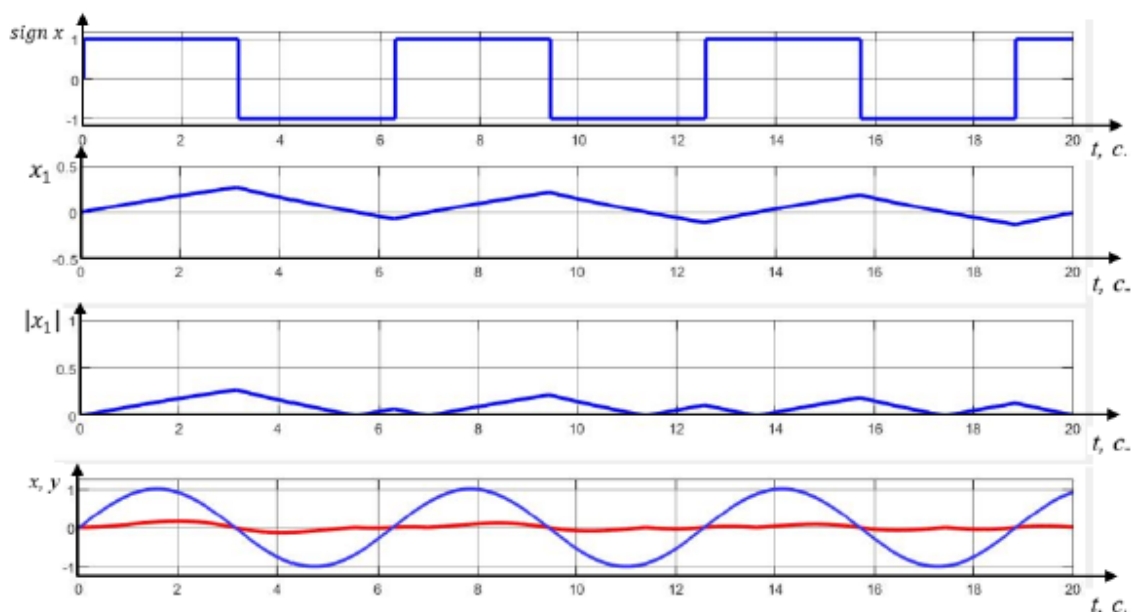


Рисунок 1.8 – Форма сигналу ПКП з амплітудним придушенням при $T=10\text{с}$

Відповідно до даних робіт [2], у пакеті MathCad для параметра амплітудного каналу $T = 0 \div 500$ та постійних значень коефіцієнта k побудовані ряди ЛАЧХ і ФЧХ.

$$T = [0.001, 0.1, 0.5, 5, 10, 50, 100, 300, 500], k = 1$$

Коефіцієнти гармонічної лінеаризації та графіки ЛАЧХ і ФЧХ з амплітудним придушенням показані на рисунках 1.9 – 1.10.

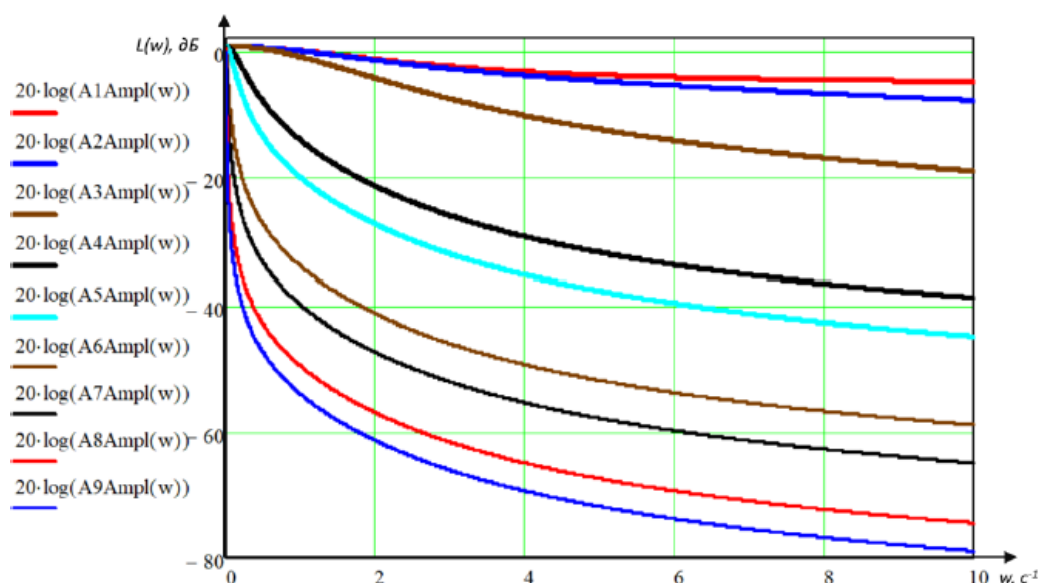


Рисунок 1.9 – ЛАЧХ КП з амплітудним придушенням при різних значеннях параметру T



Рисунок 1.10 – ФЧХ КП з амплітудним придушенням при різних значеннях параметру T

Дослідження показали, що чим більше значення параметра ТПКП з амплітудним придушенням, тим сильніше придушується амплітуда вхідного сигналу. При цьому фаза перехідного процесу збільшується на $19,6^\circ$. Це призводить до збільшення часу перехідного процесу та часу наростання.

Структурна схема псевдолінійної фазовипереджувальної ланки представлена на рисунку 1.11.

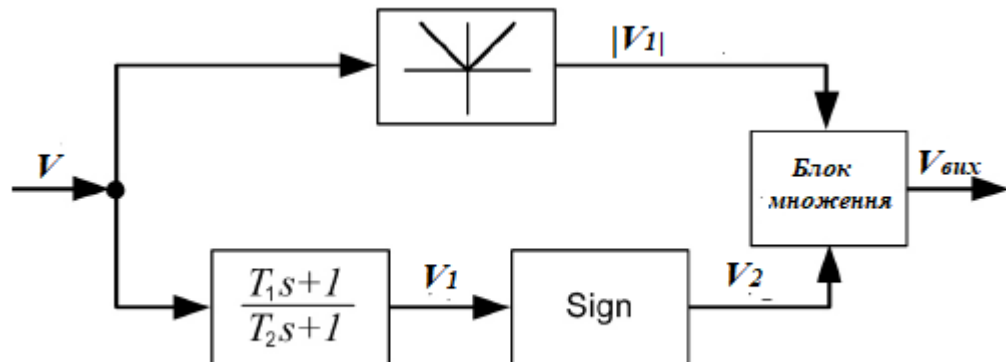


Рисунок 1.11 - Структурна схема псевдолінійної фазовипереджувальної ланки

Ланка складається з блока визначення модуля, фазовипереджувальної ланки, оператора Sign та пристрою множення.

Коефіцієнти гармонічної лінеаризації цієї ланки мають вигляд:

$$a = \frac{1}{\pi} \cdot (\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha),$$

$$b = \frac{1}{\pi} \cdot (1 - \cos 2\alpha)$$

$$\text{де } \alpha = \arctg \frac{\omega T_1(1-\nu)}{1+\omega^2 T_1^2 \nu}, \nu = \frac{T_2}{T_1}$$

Аналіз частотних характеристик ланки показує, що при зміні частоти та варіюванні постійних часу ланки T_2 від 1 до 0,01 с, T_1 від 1 до 10 с, фазова характеристика зазнає змін у межах від 0 до 78° , а логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) змінюється в межах від 0 до -4 дБ [5]. Такі зміни АЧХ не справляють суттєвого впливу на запас стійкості САР.

Даний коректор здійснює фазовий зсув, величина якого залежить від значень постійних часу T_1 та T_2 .

Щоб краще зрозуміти, як змінюється сигнал через кожен модуль у структурі коригуючих пристроїв з фазовим випередженням, була побудована модель у MATLAB SIMLINK, показана на рисунку 2.3.

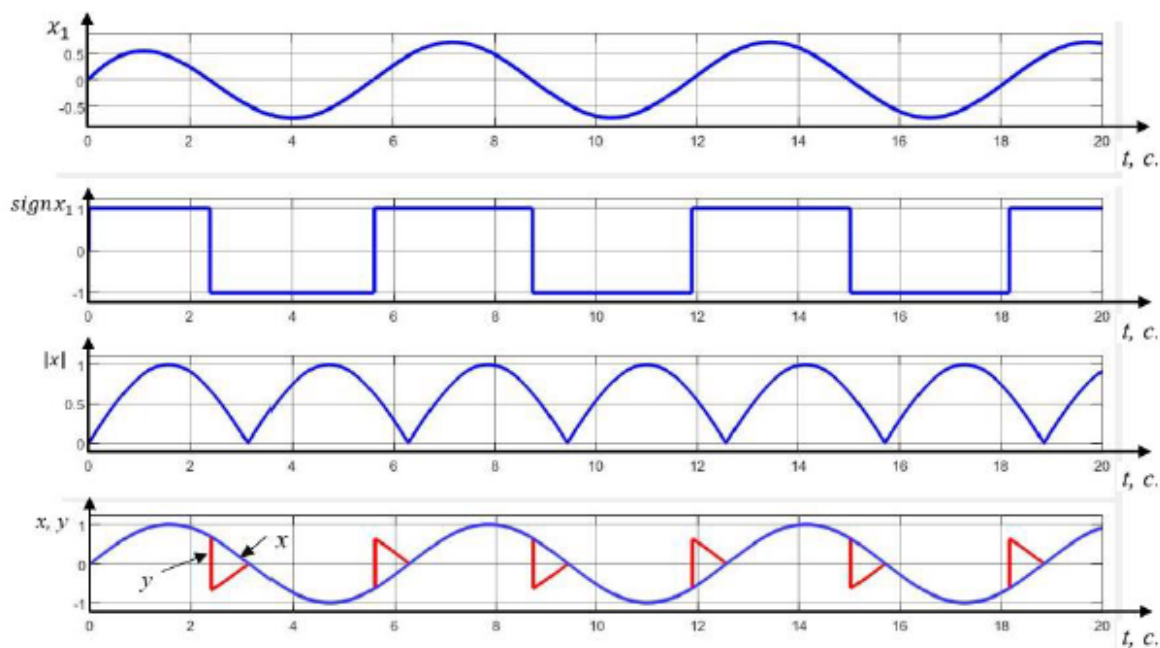


Рисунок 1.12 – Форма сигналу ПКП з фазовим випередженням при $T=10\text{с}$, $T_1=1\text{с}$

Відповідно до даних робіт [2], у пакеті MathCad для параметра амплітудного каналу $T = 0.001 \div 100$ або $T_1 = 0.001 \div 100$ та постійних значень коефіцієнта k побудовані ряди ЛАЧХ і ФЧХ.

$$k = 1, T = 1, T_1 = [0.001, 0.1, 5, 7, 10, 30, 100].$$

Коефіцієнти гармонічної лінеаризації та графіки АЧХ і ФЧХ з амплітудним придушенням показані на рисунках 1.13, 1.14.

Дослідження показують, що коли значення параметра T більше, ніж значення параметра T_1 , це може краще покращити якість системи автоматичного управління. При $T_1/T = 0,1$, чим більше T , тим менше часу потрібно для підлаштування, а фаза підлаштування залишається незмінною і становить $31,5^\circ$.

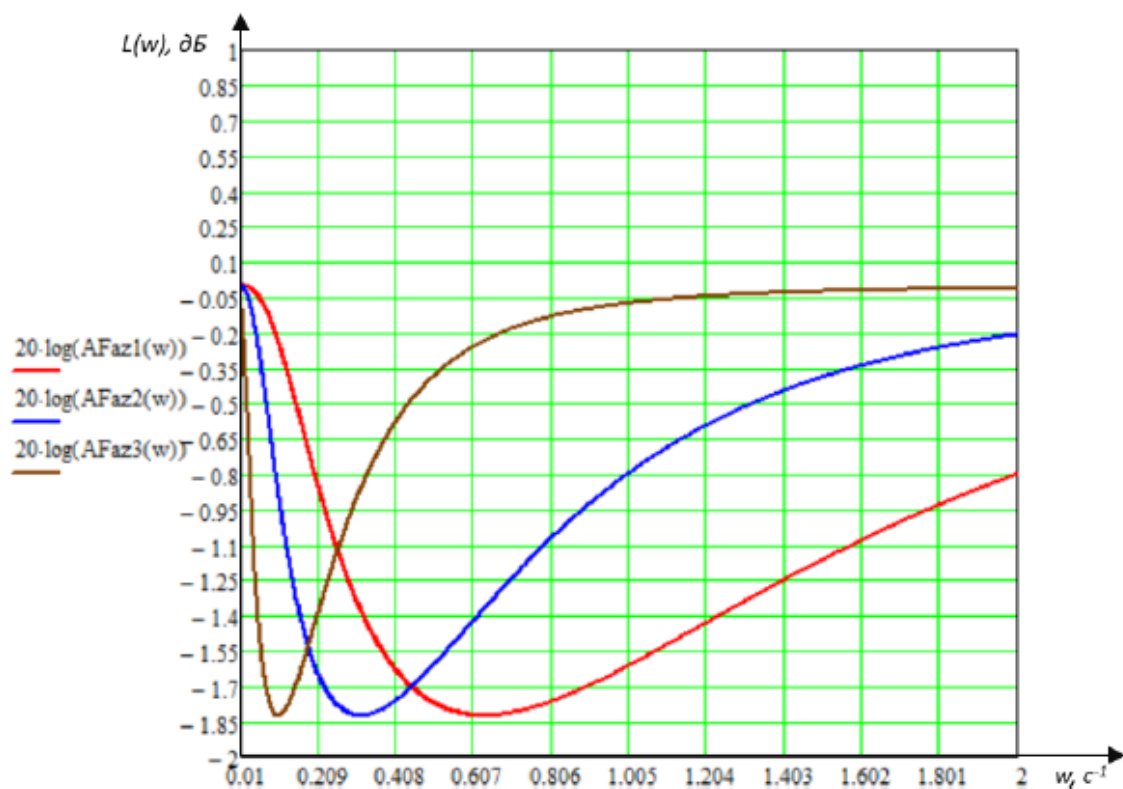


Рисунок 1.13 – ЛАЧХ КП з фазовим випередженням при різних значеннях параметрів T й T_1 .

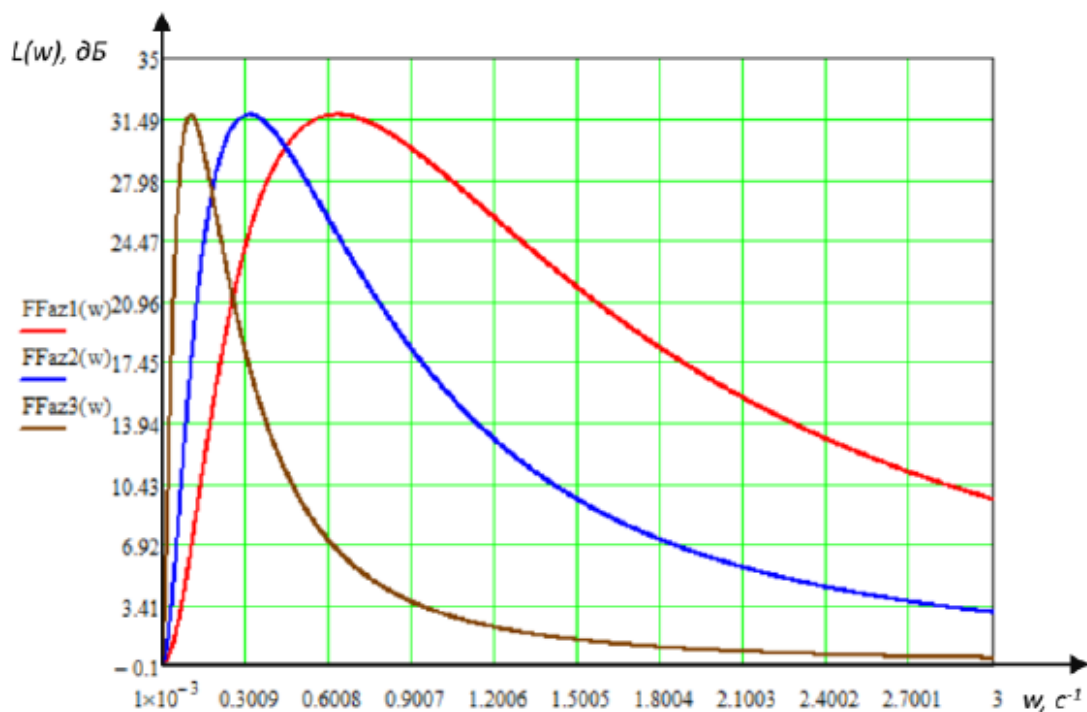


Рисунок 1.14 –ФЧХ КП з фазовим випередженням при різних значеннях параметрів T й T_1 .

1.5 Класичний ПД-регулятор та оцінка якості керування

ПД-регулювання є важливим законом управління в класичній теорії управління, має довгу історію і досі залишається одним із найбільш часто використовуваних методів управління на практиці. Коли йдеться про алгоритми ПД-регулювання, про них знає практично кожен у сфері автоматичного управління.

Хоча у світі управління існує багато алгоритмів, вони здебільшого залишаються на папері, з гарною теорією та невеликим практичним застосуванням, ПД-алгоритми та покращені ПД-алгоритми є найпростішими, ефективними та широко використовуваними.

Ідеальний варіант ПД-регулятора задається формулою:

$$u(t) = k_p \varepsilon(t) + k_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + k_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

де u - сигнал управління, ε – помилка управління ($\varepsilon = r - y$). Опорне значення r також називають уставкою.

Таким чином, керуючий сигнал являє собою суму трьох членів: пропорційного члена, який пропорційний помилці, інтегрального члена, який пропорційний інтегралу помилки, та похідного члена, який пропорційний похідній помилки. Параметрами регулятора є пропорційний коефіцієнт підсилення k_p , інтегральний коефіцієнт підсилення k_i та коефіцієнт підсилення похідної k_d . Контролер також може бути параметризований як

$$u(t) = k_p \cdot (\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt})$$

де T_i – інтегральна стала часу, T_d – похідна стала часу.

Пропорційна частина діє на поточне значення помилки, інтеграл являє собою середнє значення минулих помилок, а похідна може бути інтерпретована як прогноз майбутніх помилок на основі лінійної екстраполяції, як показано на рисунку 1.15. Зверніть увагу, що керуючий сигнал u формується повністю з помилки e , у ньому відсутній член зворотного зв'язку.

					КНУ КРБ.174.26.03.01.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

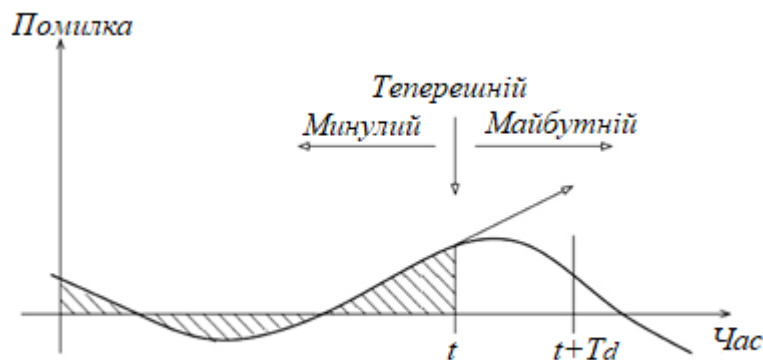


Рисунок 1.15 – ПІД-регулятор здійснює керування на основі минулих, поточних та прогнозованих майбутніх помилок управління

Оцінка якості системи – це, по суті, оцінка відповідності системи вимогам, що до неї висуваються. Стійкість системи автоматичного управління є необхідною, але недостатньою умовою практичної придатності системи. Тому при вивченні систем автоматичного управління необхідно розглянути питання про показники якості, необхідні для забезпечення перехідних процесів: швидкість, коливання, перерегулювання, які характеризують точність і плавність процесу [3].

Для оцінки якості регулювання в основному використовуються наступні методи [3]:

- прямі методи оцінки якості;
- непрямі методи оцінки якості: інтегральна оцінка.

Показники якості процесу регулювання, визначені безпосередньо за перехідною характеристикою $h(t)$, називаються прямими.

До прямих показників якості відносяться [4]:

- час перехідного процесу t_p ;
- перерегулювання σ ;
- час досягнення першого максимуму t_m ;
- час наростання перехідного процесу t_n .

Метою використання критеріїв інтегрування є можливість отримання

загальної оцінки швидкості та відхилення керованої змінної від встановленого значення [5].

Квадратична інтегральна оцінка:

$$J_2 = \int_0^{\infty} \varepsilon(t)^2 dt$$

Чим менше значення J_2 , тим швидше відбувається загасання перехідного процесу та тим менше відхилення. Однак квадратична оцінка також не завжди є успішною, оскільки сильно коливальний процес з великим перерегулюванням може оцінюватися як кращий, ніж монотонний процес при такій оцінці, коли перехідне затухання дуже повільне [6].

Цей метод оцінки якості управління системою автоматичного управління в основному використовується у даній роботі.

Висновки за розділом:

У першому розділі розглянуто теоретичні основи побудови систем автоматичного керування з псевдолінійними регуляторами. Було проаналізовано структуру та принципи побудови класичних систем управління, а також адаптивних систем із коригуючим пристроєм, що підлаштовується, який дозволяє автоматично змінювати параметри та структуру регулятора у відповідь на зміну властивостей об'єкта управління.

Детально розглянуто різні типи коригуючих пристроїв – лінійні, нелінійні та псевдолінійні, їхні переваги та обмеження. Показано, що лінійні пристрої прості та добре вивчені, проте обмежені в гнучкості та чутливі до змін параметрів системи. Нелінійні пристрої забезпечують ширші можливості корекції, а псевдолінійні – поєднують ефективність лінійних фільтрів з адаптивністю, що дозволяє отримати стабільний та точний перехідний процес при різних умовах роботи системи.

Також розглянуто ПІД-регулятор як класичний метод автоматичного керування, його структуру та принципи роботи, а також методи оцінки якості регулювання, включно з прямими та інтегральними критеріями. Було

					КНУ КРБ.174.26.03.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

підкреслено, що вибір псевдолінійного коригуючого пристрою дозволяє поєднати переваги класичних ПД-регуляторів та адаптивних методів корекції, забезпечуючи високу точність, стабільність і швидкодію системи автоматичного керування.

Таким чином, проведений аналіз теоретичних основ та характеристик коригуючих пристроїв створює надійну базу для розробки ефективних систем автоматичного управління з псевдолінійними регуляторами, які можуть успішно працювати в умовах змінних та невизначених параметрів об'єкта.

					КНУ КРБ.174.26.03.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПСЕВДОЛІНІЙНОГО РЕГУЛЯТОРУ САК

2.1 Огляд засобів моделювання

S-функції (системні функції) забезпечують потужний механізм розширення можливостей середовища Simulink. s-функції - це описи модулів Simulink у мові комп'ютера, написані на MATLAB, C, C++. S функції - це динамічно зв'язані процедури, які автоматично завантажуються та виконуються у виконанні MATLAB. s-функції використовують спеціальний синтаксичний виклик, який називається S-function API, який дозволяє взаємодіяти з рушієм Simulink [7].

S-функції мають спільну форму і можуть працювати з неперервними, дискретними та гібридними системами. Дотримуючись набору простих правил, ви можете реалізувати алгоритм у функції S і використати блок функції S для додавання його до моделі Simulink.

Блок Simulink складається з набору входів, набору станів, набору параметрів і набору виходів, де виходи залежать від часу симуляції, входів, параметрів і станів [7].

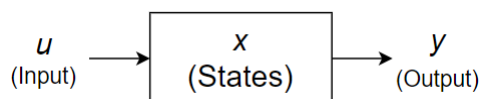


Рисунок 2.1 – Математичні блоки Simulink

Наступні рівняння виражають математичні взаємозв'язки між входами, виходами, параметрами, станами та часом моделювання

					<i>КНУ КРБ.174.26.03.02.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>РОЗДІЛ 2</i>		
Розроб.		Кулинич Д. С.					
Перевір.		Маринич І. А.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затверд.		Маринич І.А.			<i>АКНТ АКІТР-23ск</i>		
						Літ.	Арк.
							28
							37

$$y = f_0(t, x, u) \quad (\text{Outputs}) \quad (2.1)$$

$$dx = f_d(t, x, u) \quad (\text{Derivatives}) \quad (2.2)$$

$$x_{d_{k+1}} = f_u(t, x_c, x_{d_k} u) \quad (\text{Update}) \quad (2.3)$$

де $x = [x_c; x_d]$.

Реалізація моделі Simulink поділяється на два етапи. Перший етап - це ініціалізація. Двигун Simulink оцінює параметри блоку, визначає порядок виконання блоку та виділяє пам'ять. Другий етап - це цикл моделювання. Кожен прохід циклу називається кроком симуляції. На кожному етапі симуляції рушій виконує кожен знімок моделі у порядку, визначеному під час ініціалізації. Потім весь цикл моделювання триває до завершення моделювання [7].

За допомогою S-функцій MATLAB ви можете визначати власні звичайні диференціальні рівняння (ODE), рівняння дискретних систем та/або практично будь-який тип алгоритму для використання в блок-схемі Simulink.

Загальний синтаксис S-функції MATLAB такий:

$[SYS, X0, STR, TS, SIMSTATECOMPLIANCE] = SFUNC(T, X, U, FLAG, P1, \dots, Pn)$

Те, що повертає SFUNC у заданий момент часу T, залежить від значення FLAG (Таблиця 2.1), поточного вектора стану X та поточного вхідного вектора U.

Таблиця 2.1 – Опис значення FLAG

FLAG	РЕЗУЛЬТАТ	ОПИС
0	[SIZES, X0, STR, TS]	Ініціалізація повертає системні розміри в SYS, початковий стан у X0, рядки впорядкування станів у STR і час семплінгу в TS.
1	DX	Повернення неперервних похідних станів до SYS.
2	DS	Оновлення дискретних станів $SYS = X(n+1)$
3	Y	Повернення вихідних даних до SYS.
4	TNEXT	Повернення наступного разу для змінного часу вибірки в SYS.
9	[]	Завершити, виконати будь-яке очищення $SYS=[]$

Щоб гарантувати, що подальші дані не змінюються через різні розміри кроку моделювання, що призведе до помилок у розробленій програмі. Встановлюємо розмір кроку симуляції таким, щоб він завжди мав фіксований розмір кроку симуляції 0.01, як показано на рисунку 2.2.

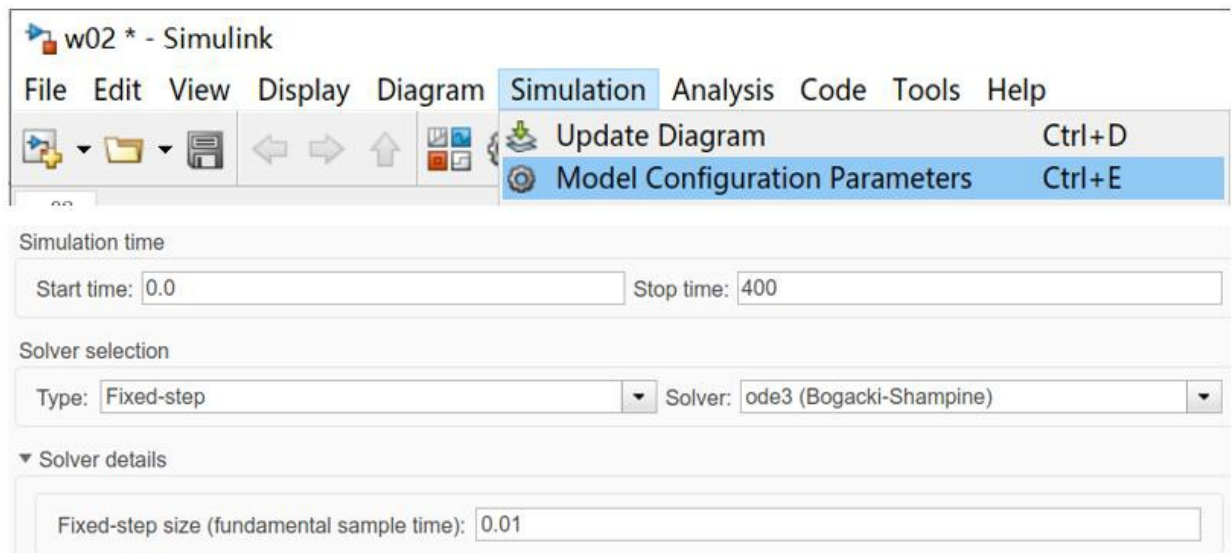


Рисунок 2.2 – Налаштування розміру кроку моделювання

Описані інструменти моделювання у середовищі MATLAB/Simulink, які застосовуються для створення моделей систем автоматичного керування з псевдолінійними регуляторами дозволяють представити основні результати та висновки:

- S-функції забезпечують гнучкий і потужний механізм розширення можливостей Simulink. Вони дозволяють описувати блоки моделі на MATLAB, C або C++ і інтегрувати їх у Simulink як динамічно завантажувані модулі.
- Сфера застосування S-функцій включає роботу з неперервними, дискретними та гібридними системами. Це дозволяє реалізовувати практично будь-який алгоритм для блок-схеми Simulink, включаючи диференціальні рівняння та дискретні моделі систем.
- Структура блоку Simulink включає вхідні сигнали, виходи, параметри та стани, які залежать від часу симуляції та значень вхідних сигналів. Загальні математичні взаємозв'язки описуються рівняннями.

- Процес моделювання поділено на два етапи:
- ініціалізація, коли Simulink оцінює параметри блоку, порядок виконання та виділяє пам'ять;
- цикл моделювання, де кожен крок симуляції виконується у визначеному порядку до завершення моделювання.
- Налаштування кроку симуляції (рис. 2.2) забезпечує стабільність результатів і унеможливорює помилки, пов'язані з різними розмірами кроку. Для цього встановлюється фіксований розмір кроку, наприклад 0.01.

Використання S-функцій у Simulink дозволяє створювати адаптивні моделі керування з можливістю контролю параметрів об'єкта, інтегрувати псевдолінійні коректори та моделювати динаміку систем у широкому діапазоні змін параметрів. Цей підхід забезпечує точність симуляції, гнучкість налаштувань та можливість подальшого масштабування моделей для складних САР.

Для вивчення роботи псевдолінійного регулятора в середовищі Matlab була реалізована модель САР, що показана на рисунку 2.3.

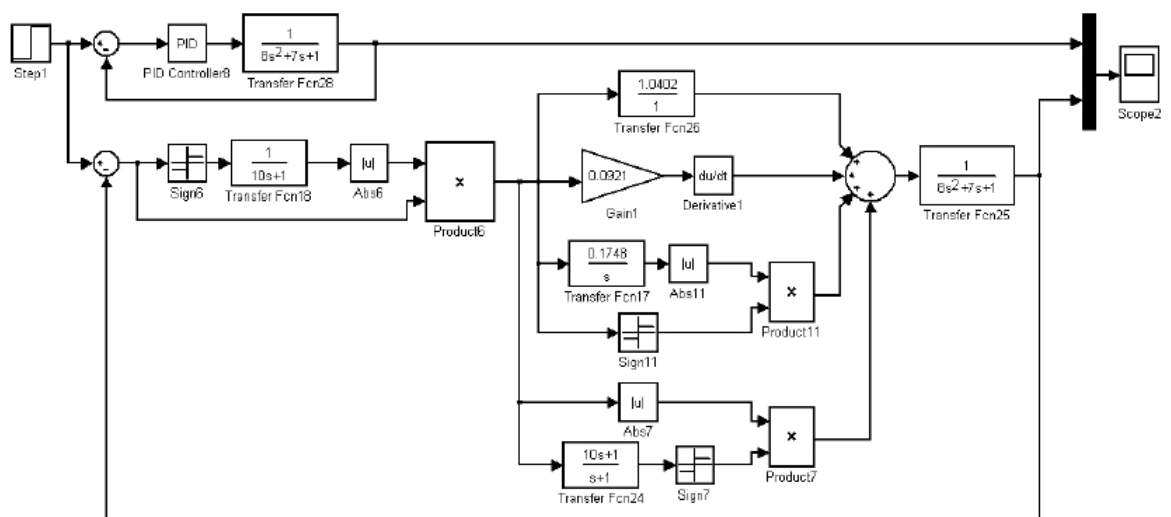


Рисунок 2.3 - Модель САР у MATLAB

Система має дві підсистеми з однаковими об'єктами керування. Перша підсистема використовує традиційний PID-регулятор. Друга підсистема використовує псевдолінійний регулятор, структурна схема якого показана на

рисунку 1.7. Система використовує об'єкти керування другого порядку, які мають передавальну функцію наступних типів:

$$W_o(s) = \frac{k_o}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$$

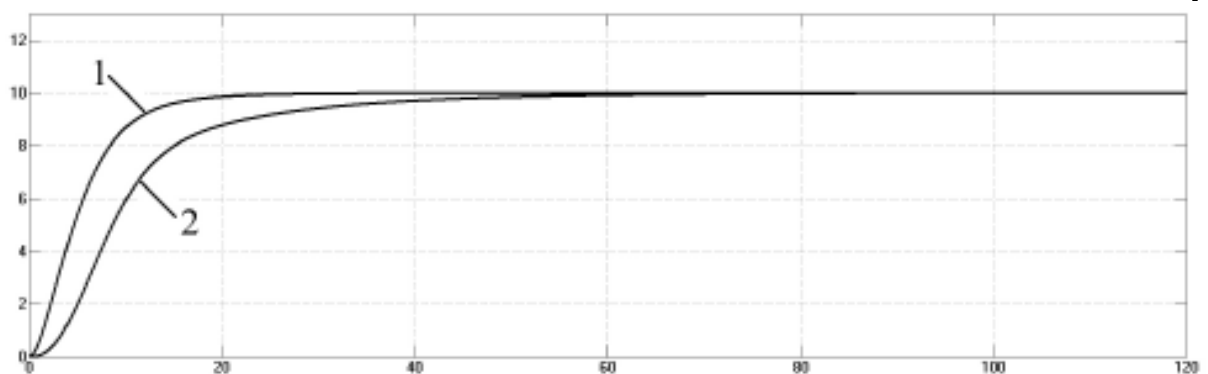
де k_o – статичний коефіцієнт передачі ОК, T_1 й T_2 – постійні часу. Параметри ОК мають такі значення: $k_o = 1$, $T_2 = 2,82842$ с. $T_1 = 7$ с.

Для цього керуючого об'єкта за методом Ціглера–Ніколса параметри класичного PID-регулятора були розраховані для забезпечення аперіодичного перехідного процесу. Коефіцієнти регулятора мають такі значення: $k_p = 1,0402$; $k_i = 0,1748$; $k_d = 0,0921$.

Для вивчення властивостей керуючої системи псевдолінійний регулятор було налаштовано: значення пропорційної та диференціальної компонент вважалися рівними значенням класичного PID-регулятора.

Постійна часу псевдолінійної ланки з амплітудним пригніченням дорівнює $T = 10$ с. Параметр налаштування інтегратора Клета вважався рівним значенню інтегрального коефіцієнта класичного PID-регулятора.

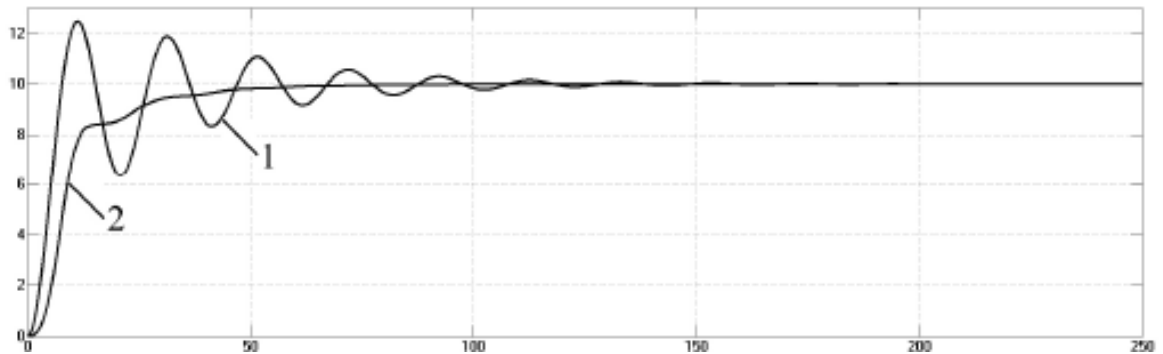
Параметри налаштування фазовипереджуючої ланки були прийняті рівними: $1-T = 10$ с, $2-T = 1$ с. На рисунку 2.4 наведені криві перехідних процесів для двох систем з параметрами ОК та налаштуваннями регуляторів, описаними вище.



1 - Система з класичним ПІД-регулятором; 2 - Система з псевдолінійним регулятором

Рисунок 2.4 - Криві перехідних процесів

На рисунку 2.5 наведені криві перехідних процесів для цих же САР, з зміненими параметрами ОК. Значення змінених параметрів ОК є наступними: $k_o=1$, $T_2=4,4721c$, $T_1=3c$. При цьому параметри ПД-регулятора та псевдолінійного регулятора залишилися незмінними.



1 - Система з класичним ПД-регулятором; 2 - Система з псевдолінійним регулятором

Рисунок 2.5 - Криві перехідних процесів

Як видно з рисунка, якість регулювання САР з ПД-регулятором при змінених параметрах ОУ є значно гіршою, ніж якість САР з псевдолінійним регулятором. САР з псевдолінійним регулятором залишається стабільною навіть при значенні постійної часу об'єкта управління $T_2=22$ с, в той час як САР з ПД-регулятором вже при значенні постійної часу об'єкта управління $T_2=6$ с стає нестабільною.

Як видно з рисунка 2.4, характер перехідних процесів є аперіодичним. У системі з псевдолінійним регулятором час регулювання трохи більший, ніж у системі з ПД-регулятором. Проведені дослідження систем регулювання з запропонованим регулятором показують, що псевдолінійний регулятор ефективно працює в умовах, коли параметри об'єкта управління змінюються в широкому діапазоні. І в цьому зв'язку такий регулятор можна вважати робастним.

У даній роботі розглянемо псевдолінійну фазовипереджуючу ланку, фазова характеристика якої змінюється в межах від 0 до 78° . При необхідності підйому фазо-частотної характеристики на більшу величину можна використовувати псевдолінійне коригуюче пристрій з фазовим

випередженням [4]. Ця ланка забезпечує підйом фазо-частотної характеристики до 175° .

2.2 Розробка систем керування з псевдолінійним регулятором з адаптивною структурою в середовищі MATLAB

Для підвищення точності та стабільності систем автоматичного керування з нестационарними об'єктами застосовується псевдолінійний регулятор з адаптивною структурою. Його реалізація у середовищі MATLAB/Simulink дозволяє моделювати динаміку системи та досліджувати вплив зміни параметрів об'єкта на перехідні процеси. Використання адаптивної структури забезпечує автоматичну корекцію параметрів регулятора залежно від інтегральної квадратичної похибки, що дозволяє ефективно зменшувати коливання та перерегулювання.

Розглянемо більш детально створення моделі САР із псевдолінійним регулятором, структуру підсистеми керування PID та реалізацію адаптивних алгоритмів за допомогою S-функцій

Схема моделювання САР з псевдолінійним регулятором з адаптивною структурою показана на рисунку 2.6.

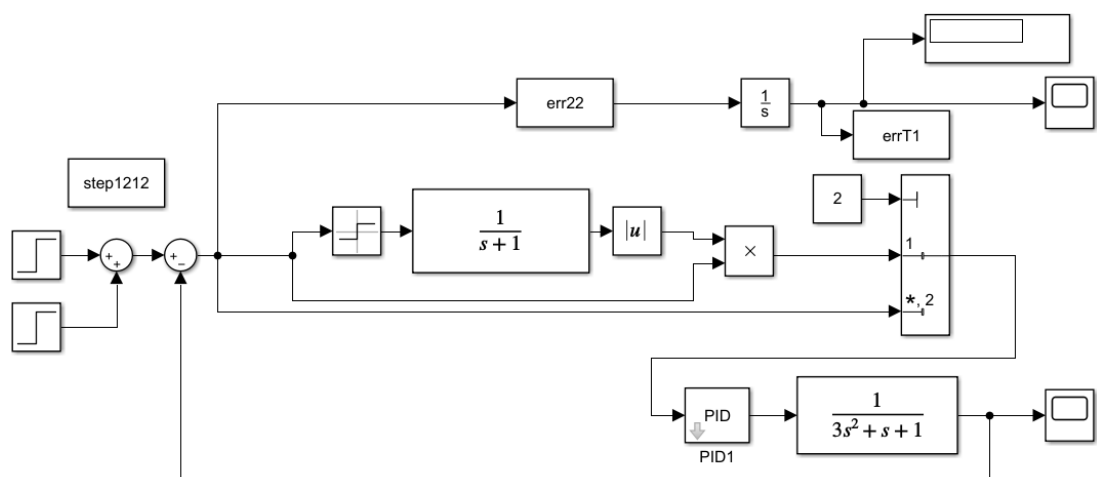


Рисунок 2.6 – Схема моделювання САР з псевдолінійним регулятором з адаптивною структурою

Модель підсистеми керування PID показана на рисунку 2.7.

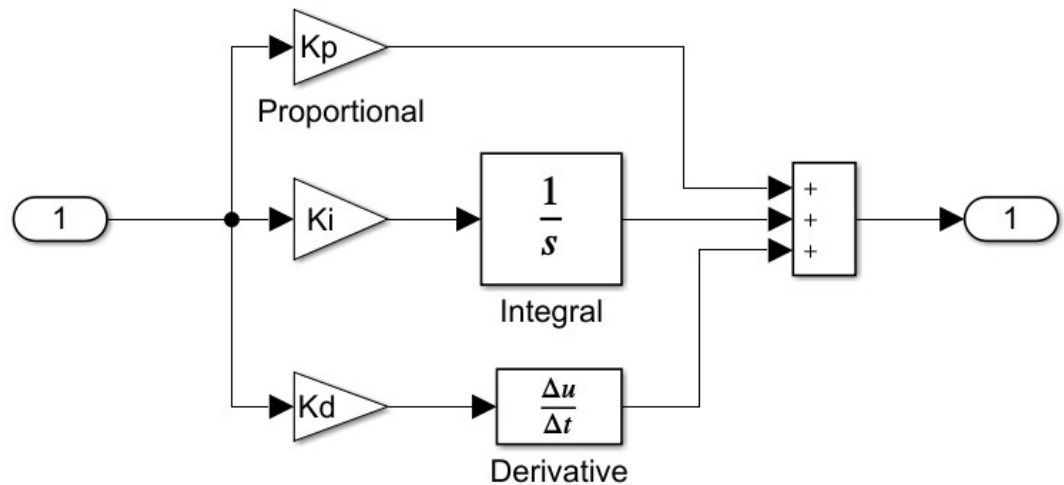


Рисунок 2.7 – Модель підсистеми керування (PID)

Об'єкт керування в системах із класичним PID-контролером і адаптивним нечітким PID-контролером однаковий і задається передавальною функцією:

$$W(s) = \frac{1}{Ts^2 + s + 1} \quad (2.4)$$

Коли система вперше уводиться у роботу, параметр T керуючого об'єкта в обох системах дорівнює 1. Параметри класичного PID-контролера мають такі значення: $k_p=3$, $k_i=0,7$, $k_d=5$ і залишаються незмінними.

Блок step1212 є блоком S-функції m-файлу. Його функція заключається у керуванні тестовим сигналом і ініціалізації параметрів T об'єкта керування та T_1 псевдолінійного коректуючого пристрою з амплітудним придушенням.

Лістинг m-файлу "step1212" блоку S-функції наведено у Додатку А.

У центрі моделі розташований пристрій корекції амплітудного придушення, який підключений до структури системи керування через багатопортовий комутатор (Multiport Switch).. Значення перемикача визначається значенням константи від 1 до 2, що залежить від значення квадратичної інтегральної похибки, яка обчислюється у m-файлі блоку S-функції (err22) та інтегральному блоку.

Блок err22 є блоком S-функції m-файлу. Його функція забезпечує

квадратичне значення похибки. Значення вторинної помилки підсумовується інтегратором для отримання значення вторинної помилки інтегрування, яке потім передається блоку *errT1*.

Лістинг m-файлу "err22" блоку S-функції наведено у Додатку Б.

Блок *errT1* є блоком S-функції m-файлу. Його функція - змінювати відповідний параметр T_1 пристрій корекції з амплітудним придушенням шляхом визначення, в якому інтервалі знаходиться значення квадратичної помилки інтегрування. Для цього потрібно було заздалегідь зібрати необхідні дані. Тому спочатку записали значення квадратичної помилки інтегрування в класичному контролері PID, змінюючи параметр T з 1 на 20 (дивись Таблиця 2.2). Потім змінивши відповідний параметр T_1 і записавши значення параметра T_1 (дивись Таблиця 2.3), що покращило якість керування.

Лістинг m-файлу "errT1" блоку S-функції наведено в Додатку В.

Таблиця 2.3 – Значення квадратичної помилки інтегрування в класичному контролері PID при зміні параметра T від 1 до 20

$\int_{200}^{400} \varepsilon^2$	T	$\int_{200}^{400} \varepsilon^2$	T
0,007455	1	0,0167	11
0,008094	2	0,01809	12
0,008797	3	0,0196	13
0,009553	4	0,02127	14
0,01036	5	0,02311	15
0,01123	6	0,02516	16
0,01216	7	0,02743	17
0,01317	8	0,02997	18
0,01425	9	0,03287	19
0,01542	10	0,03645	20

Таблиця 2.3 – Значення відповідного параметра T1

$\int_{200}^{400} \varepsilon^2$	T	$\int_{200}^{400} \varepsilon^2$	T
0,007455	-	0,0167	170
0,008094	-	0,01809	180
0,008797	-	0,0196	200
0,009553	100	0,02127	230
0,01036	110	0,02311	260
0,01123	120	0,02516	300
0,01216	130	0,02743	340
0,01317	140	0,02997	380
0,01425	150	0,03287	500
0,01542	160	0,03645	550

Щоб зберегти якість контролю, не роблячи процедуру надто громіздкою, розділимо дані в Таблиці 2.2 на 6 частин. Рисунки 2.8 – 2.9 показують квадратичну інтегральну похибку, коли параметр T керуючого об'єкта досягає верхньої межі діапазону значень у кожній частині.

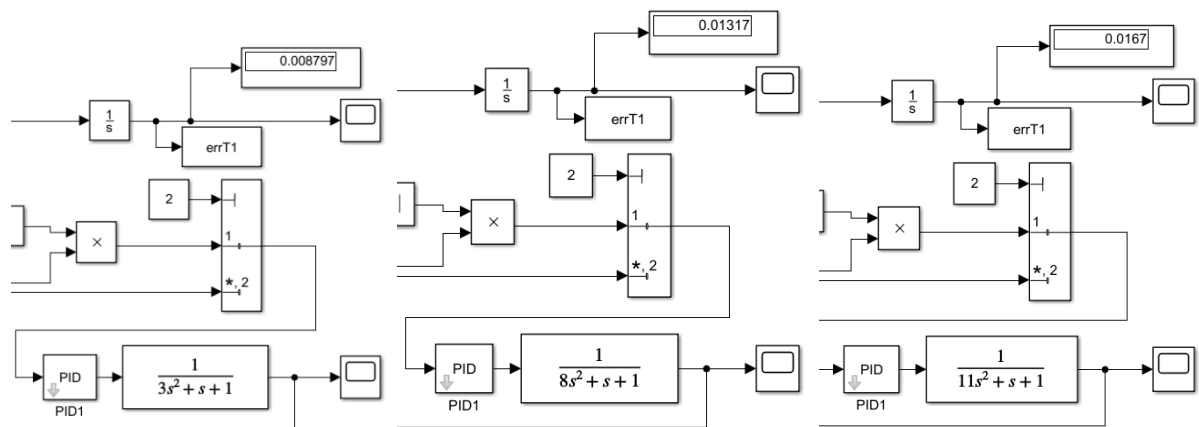


Рисунок 2.8 – Схема моделювання САР (при T = [3, 8, 11])

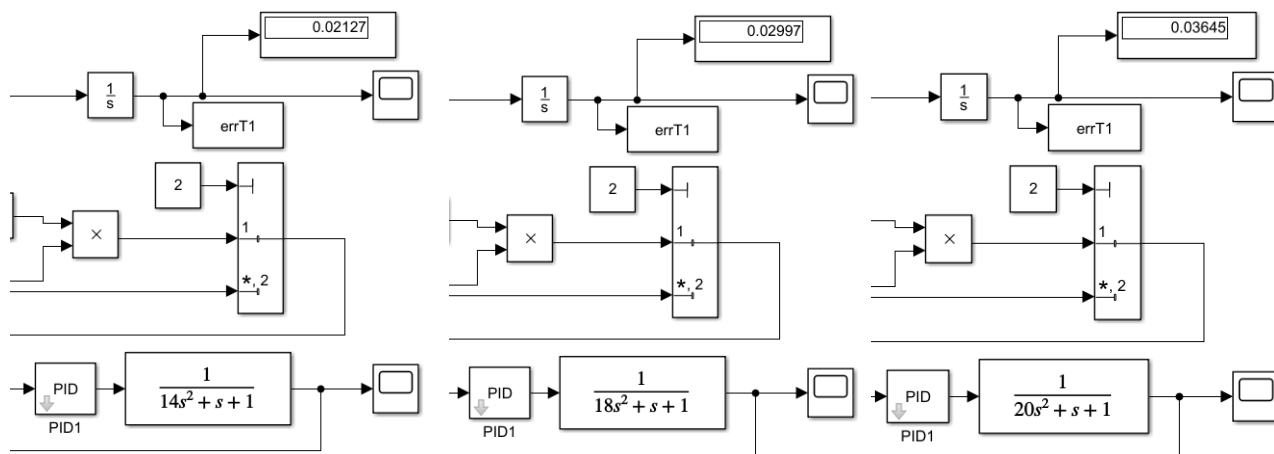


Рисунок 2.9 – Схема моделювання САР (при $T = [14, 18, 20]$)

Результати, наведені на Рисунках 2.8 і 2.9, також підтверджують коректність даних у Таблиці 2.1, що також дозволяє уникнути непередбачуваних помилок у наступних розроблених програмах.

Класичний PID-регулятор вже забезпечує хороше керування, коли параметр T об'єкта керування змінюється з 0.01 на 3. Таким чином, багатопортовий комутатор завжди зв'язаний з каналом 2 замість того, щоб додавати пристрій корекції з амплітудним придушенням. Графік перехідних процесів показаний на рисунку 2.10.

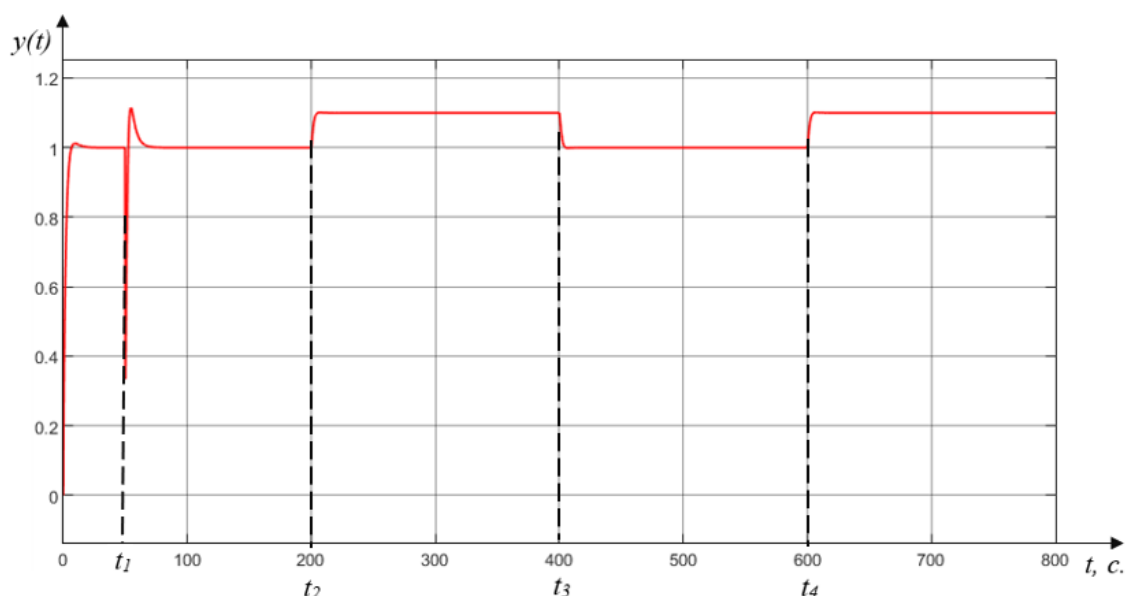


Рисунок 2.10 – Перехідні процеси у САР (при $T = 3$)

Перехідні процеси у САР показані на рисунку 2.11. В момент часу t_1

постійна часу керування T змінюється від 1 до 2,8, що викликає коливання. В момент часу t_2 подається тестовий сигнал. В моменти часу ($t_2 \dots t_3$), розраховується квадратична похибка інтегрування струму й перерегулювання. В момент часу t_3 тестовий сигнал знімається, а в момент часу t_4 вмикається відповідна плата керування. Для наочності результатів уводиться етап тестування.

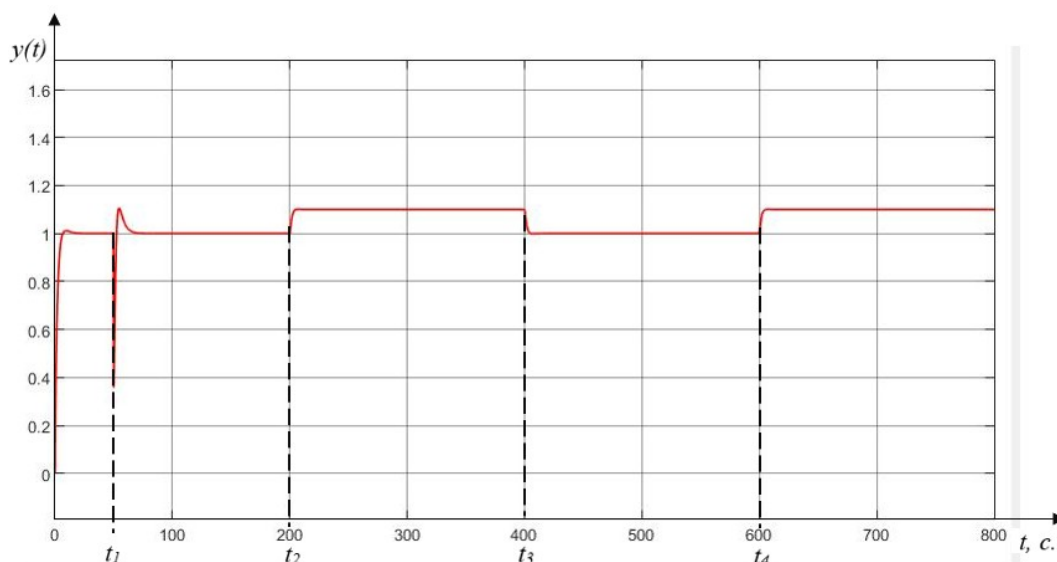


Рисунок 2.11 – Перехідні процеси в САР (при $T = 2,8$)

На схемі (Рисунок 2.12) також видно, що в момент часу t_4 багатопортовий комутатор завжди зв'язано з каналом 2 замість того, щоб додавати пристрій корекції з амплітудним придушенням.

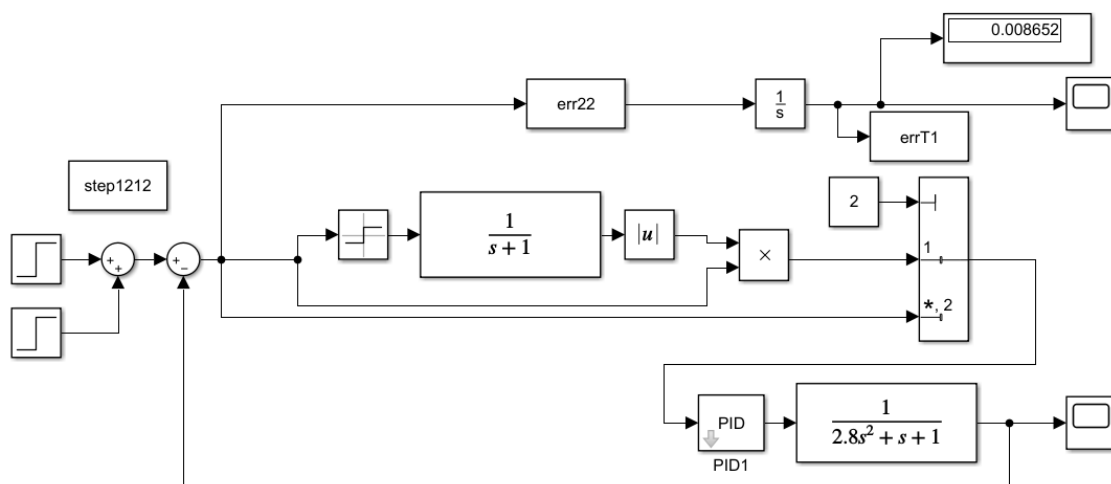


Рисунок 2.12 – Схема моделювання САР (при $T = 2,8$)

Перехідні процеси у САР показані на рисунку 2.13. В момент часу t_1 постійна часу керування T змінюється від 1 до 7,8, що викликає коливання. В момент часу t_2 подається тестовий сигнал. В моменти часу ($t_2 \dots t_3$), розраховується квадратична похибка інтегрування струму й перерегулювання. В момент часу t_3 тестовий сигнал знімається, а в момент часу t_4 вмикається відповідна плата керування. Для наочності результатів уводиться етап тестування.

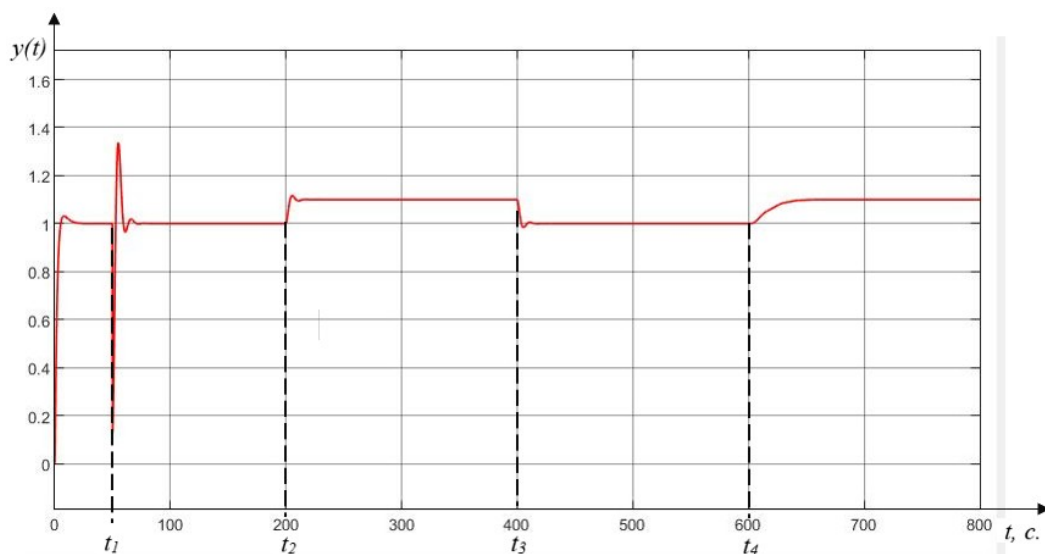


Рисунок 2.13 – Перехідні процеси в САР (при $T = 7,8$)

На схемі (Рисунок 2.14) також видно, що в момент часу t_4 до каналу 1 підключено багатопортовий комутатор для додавання пристрою корекції з амплітудним придушенням.

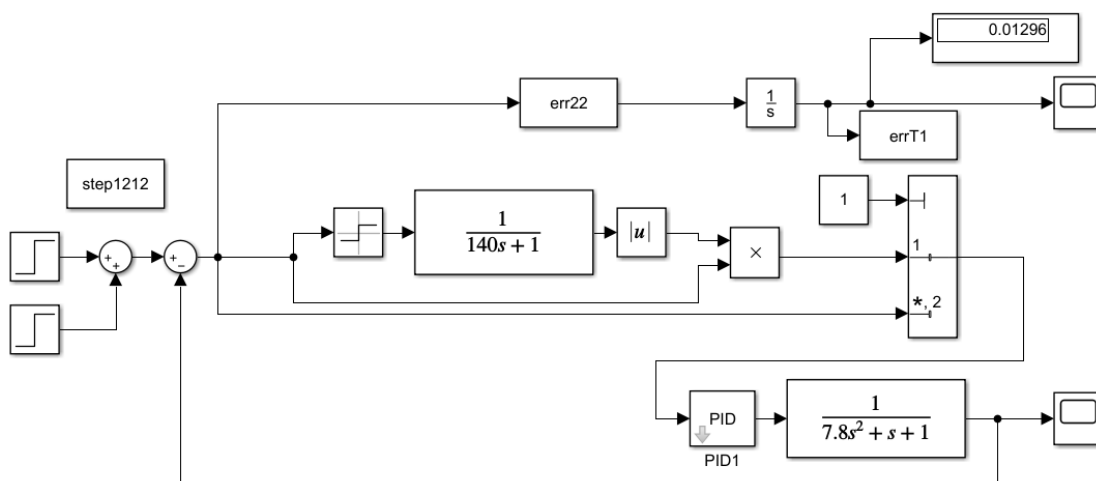


Рисунок 2.14 – Схема моделювання САР (при $T = 7,8$)

Дослідження показали, що у системі виникають коливання через зміни параметрів об'єкта керування, тобто перша постійна часу T збільшилась з 1 до 7,8. Зміна інтегральної квадратичної похибки вимагала зміни структури САР, тобто включення пристрою корекції з амплітудним придушенням. Аналіз показав, що ці дії збільшують час реакції системи і зменшують перерегулювання до нуля.

Перехідні процеси у САР показані на рисунку 2.15. В момент часу t_1 постійна часу керування T змінюється від 1 до 10,8, що викликає коливання. В момент часу t_2 подається тестовий сигнал. В моменти часу ($t_2 \dots t_3$), розраховується квадратична похибка інтегрування струму й перерегулювання. В момент часу t_3 тестовий сигнал знімається, а в момент часу t_4 вмикається відповідна плата керування. Для наочності результатів уводиться етап тестування.

На схемі (Рисунок 2.16) також видно, що в момент часу t_4 до каналу 1 підключено багатопортовий комутатор для додавання пристрою корекції з амплітудним придушенням.

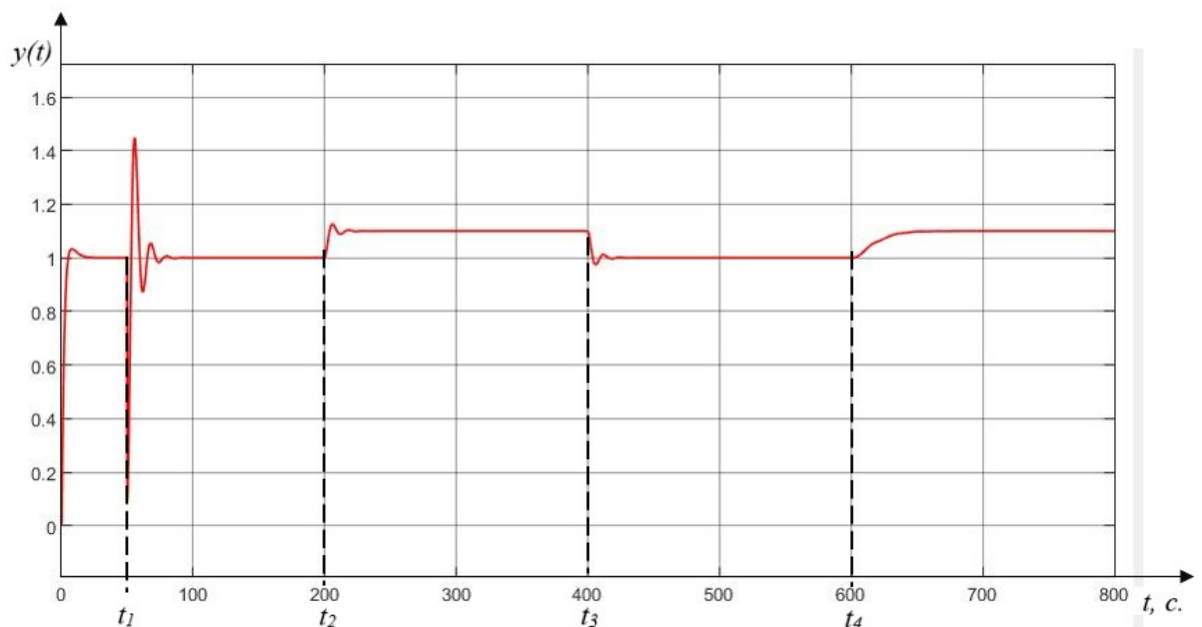


Рисунок 2.15 – Перехідні процеси в САР (при $T = 10,8$)

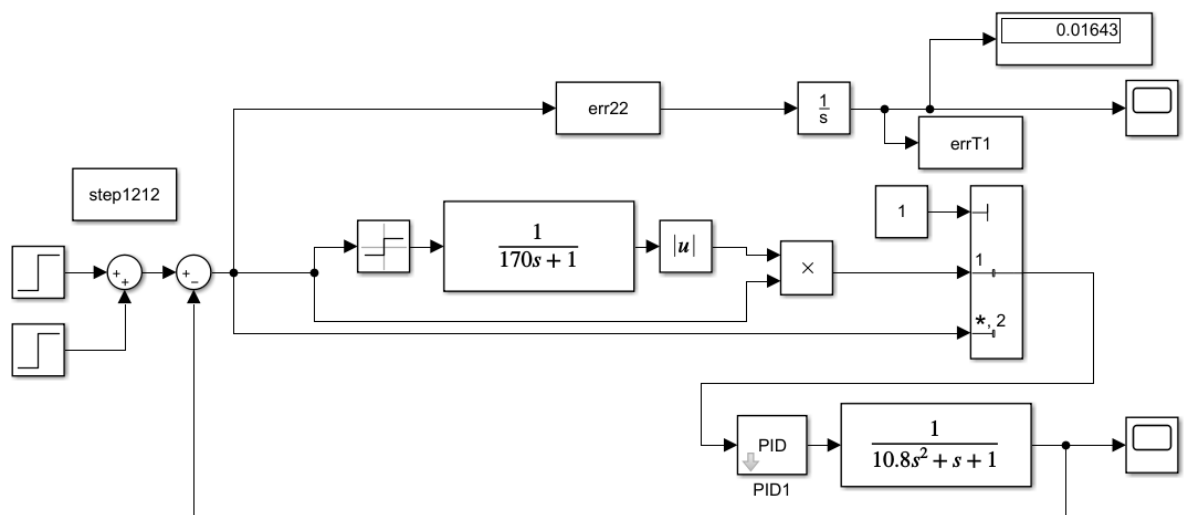


Рисунок 2.16 – Схема моделювання САР (при $T = 10,8$)

Дослідження показали, що у системі виникають коливання через зміни параметрів об'єкта керування, тобто перша постійна часу T збільшилась з 1 до 10,8. Зміна інтегральної квадратичної похибки вимагала зміни структури САР, тобто включення пристрою корекції з амплітудним придушенням. Аналіз показав, що ці дії збільшують час реакції системи і зменшують перерегулювання до нуля.

Перехідні процеси у САР показані на рисунку 2.17. В момент часу t_1 постійна часу керування T змінюється від 1 до 13,5, що викликає коливання. В момент часу t_2 подається тестовий сигнал. В моменти часу ($t_2 \dots t_3$), розраховується квадратична похибка інтегрування струму й перерегулювання. В момент часу t_3 тестовий сигнал знімається, а в момент часу t_4 вмикається відповідна плата керування. Для наочності результатів вводиться етап тестування.

На схемі (Рисунок 2.18) також видно, що в момент часу t_4 до каналу 1 підключено багатопортовий комутатор для додавання пристрою корекції з амплітудним придушенням.

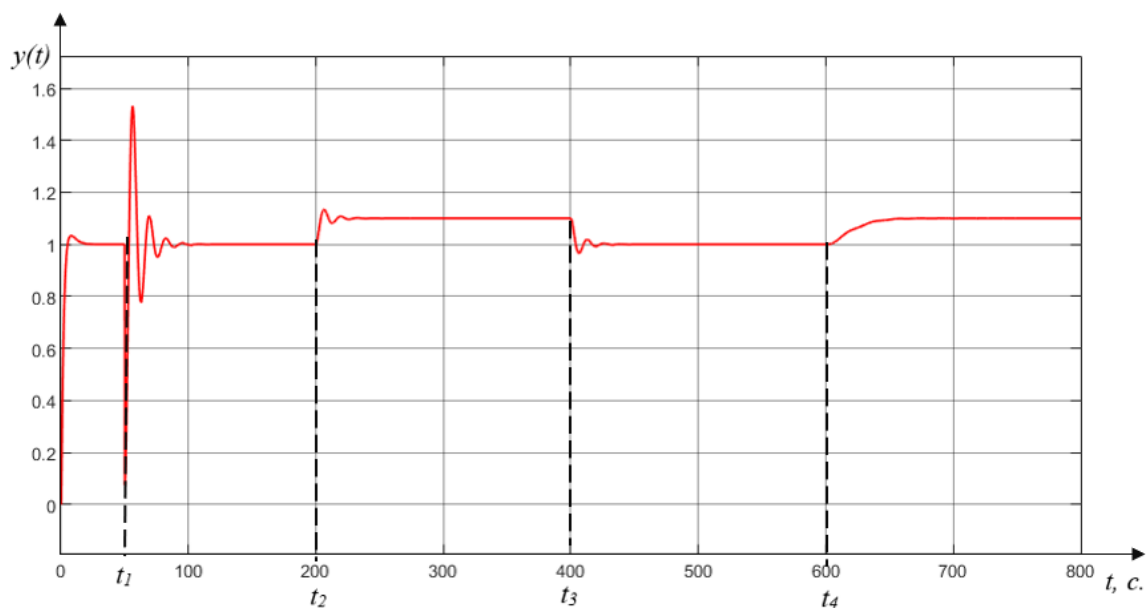


Рисунок 2.17 – Перехідні процеси в САР (при $T = 13,5$)

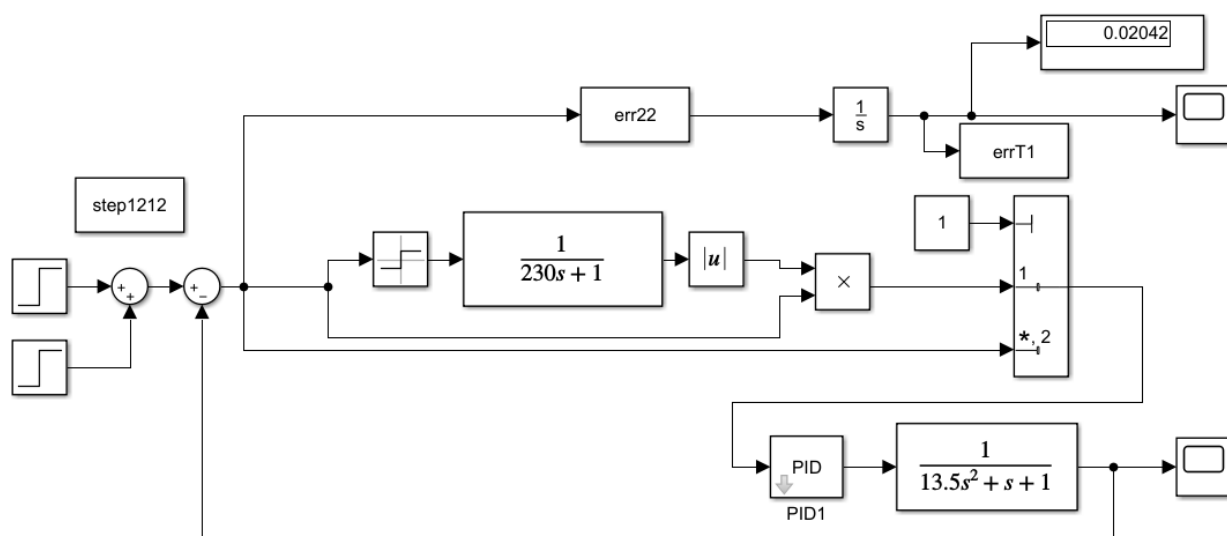


Рисунок 2.18 – Схема моделювання САР (при $T = 13,5$)

Дослідження показали, що у системі виникають коливання через зміни параметрів об'єкта керування, тобто перша постійна часу T збільшилась з 1 до 13,5. Зміна інтегральної квадратичної похибки вимагала зміни структури САР, тобто включення пристрою корекції з амплітудним придушенням. Аналіз показав, що ці дії збільшують час реакції системи і зменшують перерегулювання до нуля.

Перехідні процеси у САР показані на рисунку 2.19. В момент часу t_1 постійна часу керування T змінюється від 1 до 17,65, що викликає

коливання. В момент часу t_2 подається тестовий сигнал. В моменти часу ($t_2...t_3$), розраховується квадратична похибка інтегрування струму й перерегулювання. В момент часу t_3 тестовий сигнал знімається, а в момент часу t_4 вмикається відповідна плата керування. Для наочності результатів уводиться етап тестування.

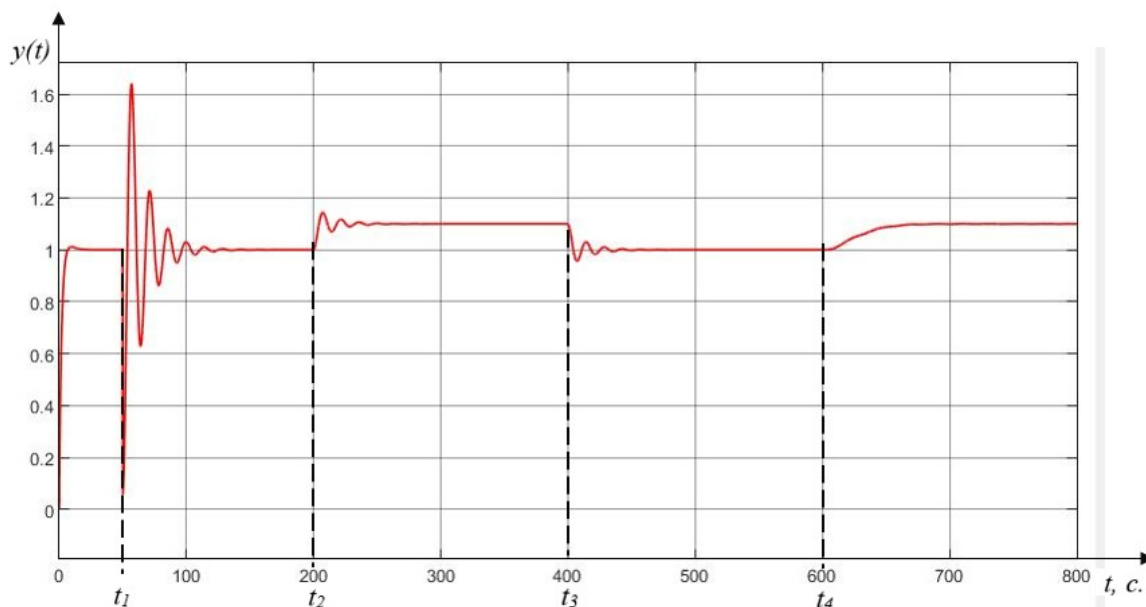


Рисунок 2.19 – Перехідні процеси в САР (при $T = 17,65$)

На схемі (Рисунок 2.20) також видно, що в момент часу t_4 до каналу 1 підключено багатопортовий комутатор для додавання пристрою корекції з амплітудним придушенням.

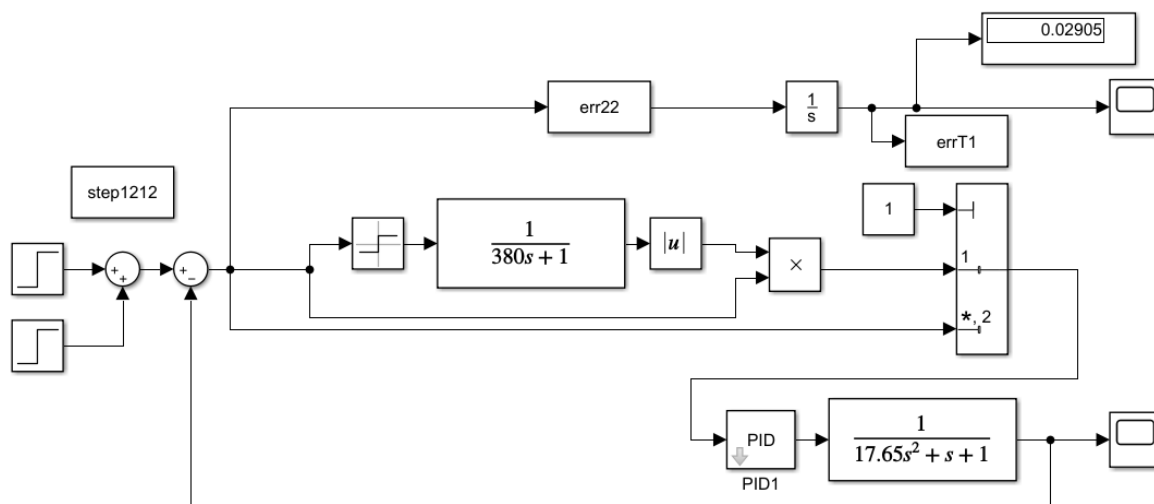


Рисунок 2.20 – Схема моделювання САР (при $T = 17,65$)

Дослідження показали, що у системі виникають коливання через зміни параметрів об'єкта керування, тобто перша постійна часу T збільшилась з 1 до 17,65. Зміна інтегральної квадратичної похибки вимагала зміни структури САР, тобто включення пристрою корекції з амплітудним придушенням. Аналіз показав, що ці дії збільшують час реакції системи і зменшують перерегулювання до нуля.

Перехідні процеси у САР показані на рисунку 2.21. В момент часу t_1 постійна часу керування T змінюється від 1 до 18,33, що викликає коливання. В момент часу t_2 подається тестовий сигнал. В моменти часу ($t_2 \dots t_3$), розраховується квадратична похибка інтегрування струму й перерегулювання. В момент часу t_3 тестовий сигнал знімається, а в момент часу t_4 вмикається відповідна плата керування. Для наочності результатів уводиться етап тестування.

На схемі (Рисунок 2.22) також видно, що в момент часу t_4 до каналу 1 підключено багатопортовий комутатор для додавання пристрою корекції з амплітудним придушенням.

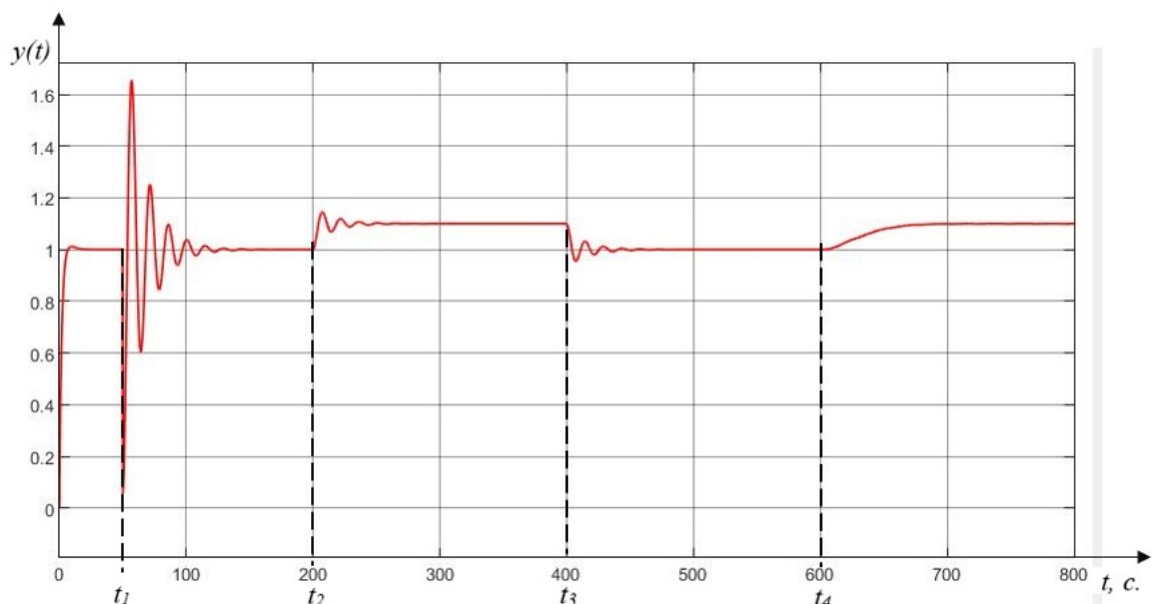


Рисунок 2.21 – Перехідні процеси в САР (при $T = 18,33$)

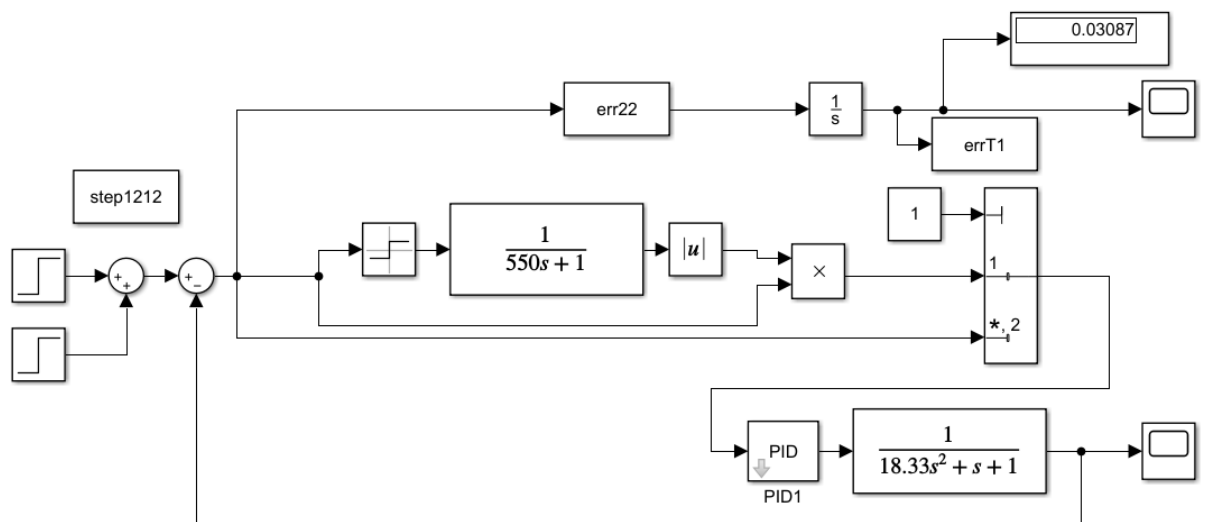


Рисунок 2.22 – Схема моделювання САР (при $T = 18,33$)

Дослідження показали, що у системі виникають коливання через зміни параметрів об'єкта керування, тобто перша постійна часу T збільшилась з 1 до 18,33. Зміна інтегральної квадратичної похибки вимагала зміни структури САР, тобто включення пристрою корекції з амплітудним придушенням. Аналіз показав, що ці дії збільшують час реакції системи і зменшують перерегулювання до нуля.

Перехідні процеси у САР показані на рисунку 2.23. В момент часу t_1 постійна часу керування T змінюється від 1 до 20, що викликає коливання. В момент часу t_2 подається тестовий сигнал. В моменти часу ($t_2 \dots t_3$), розраховується квадратична похибка інтегрування струму й перерегулювання. В момент часу t_3 тестовий сигнал знімається, а в момент часу t_4 вмикається відповідна плата керування. Для наочності результатів уводиться етап тестування.

На схемі (Рисунок 2.24) також видно, що в момент часу t_4 до каналу 1 підключено багатопортовий комутатор для додавання пристрою корекції з амплітудним придушенням.

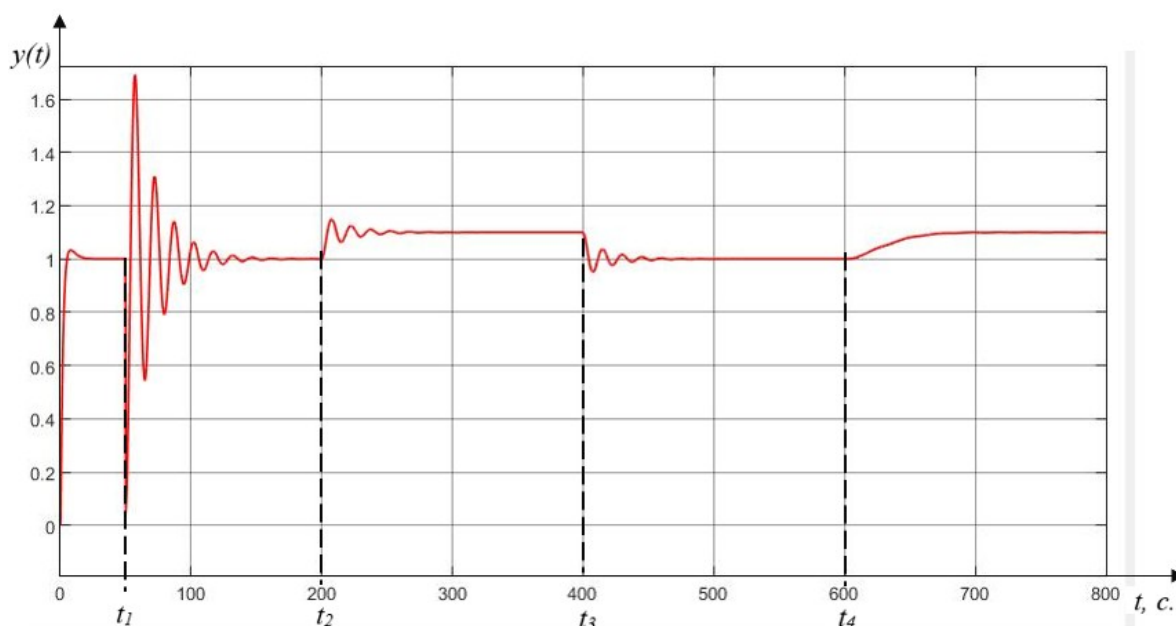


Рисунок 2.23 – Перехідні процеси в САР (при $T = 20$)

Дослідження показали, що у системі виникають коливання через зміни параметрів об'єкта керування, тобто перше збільшення сталої T з 1 до 20. Зміна інтегральної квадратичної похибки вимагала зміни структури САР, тобто включення пристрою корекції з амплітудним придушенням. Аналіз показав, що ці дії збільшують час реакції системи і зменшують перерегулювання до нуля.

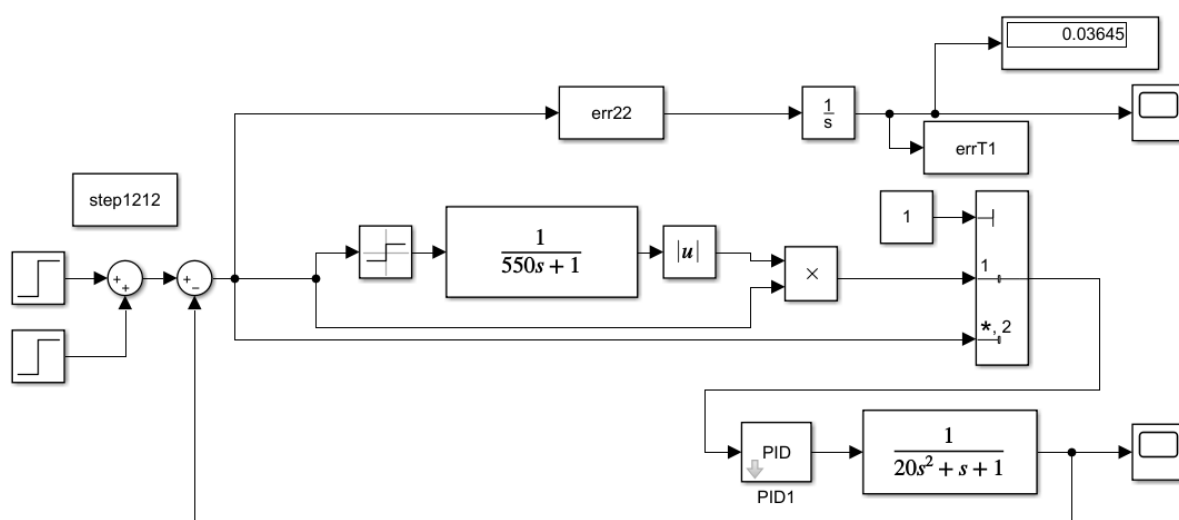


Рисунок 2.24 – Схема моделювання САР (при $T = 20$)

Результати, представлені на рисунках 2.10 - 2.11, 2.13, 2.15, 2.17, 2.19, 2.21, 2.23 також підтверджують, що розроблена програма досягає бажаної

функціональності та працює коректно. Дослідження адаптивних систем керування з об'єктами другого порядку показує, що використання таких коригуючих пристроїв покращує якість роботи системи керування при зміні параметрів об'єктів керування.

Перехідні процеси у САР показані на рисунку 2.25. В момент часу t_1 постійна часу керування T змінюється від 1 до 10,8 й T_2 змінюється від 1 до 10, що викликає коливання. В момент часу t_2 подається тестовий сигнал. В моменти часу ($t_2 \dots t_3$), розраховується квадратична похибка інтегрування струму й перерегулювання. В момент часу t_3 тестовий сигнал знімається, а в момент часу t_4 вмикається відповідна плата керування. Для наочності результатів уводиться етап тестування.

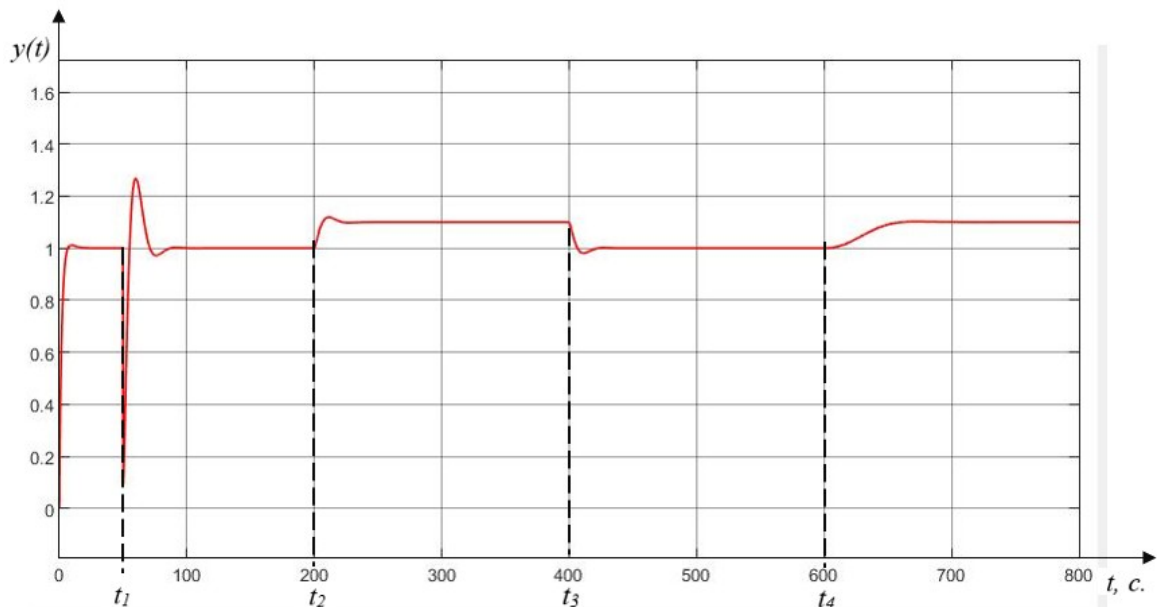


Рисунок 2.25 – Перехідні процеси в САР (при $T = 10,8$, $T_2=10$)

На схемі (Рисунок 2.26) також видно, що в момент часу t_4 до каналу 1 підключено багатопортовий комутатор для додавання пристрою корекції з амплітудним придушенням.



Перехідні процеси у САР показані на рисунку 2.27. В момент часу t_1 постійна часу керування T змінюється від 1 до 17,5 й T_2 змінюється від 1 до 20, що викликає коливання. В момент часу t_2 подається тестовий сигнал. В моменти часу ($t_2 \dots t_3$), розраховується квадратична похибка інтегрування струму й перерегулювання. В момент часу t_3 тестовий сигнал знімається, а в момент часу t_4 вмикається відповідна плата керування. Для наочності результатів уводиться етап тестування.

На схемі (Рисунок 2.28) також видно, що в момент часу t_4 до каналу 1 підключено багатопортовий комутатор для додавання пристрою корекції з амплітудним придушенням.

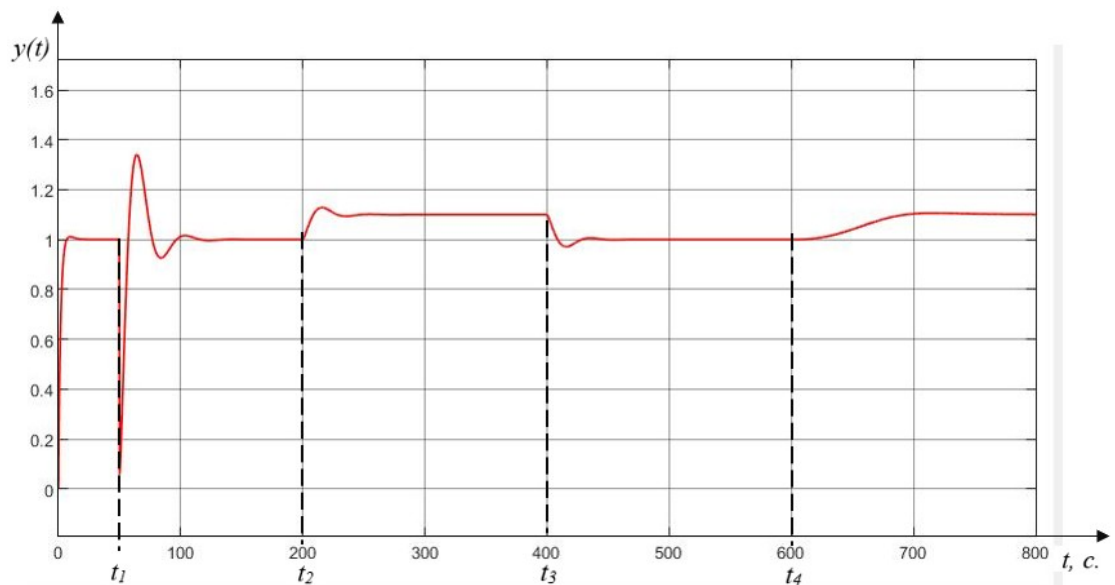


Рисунок 2.27 – Перехідні процеси в САР (при $T = 17,5$, $T_2=20$)

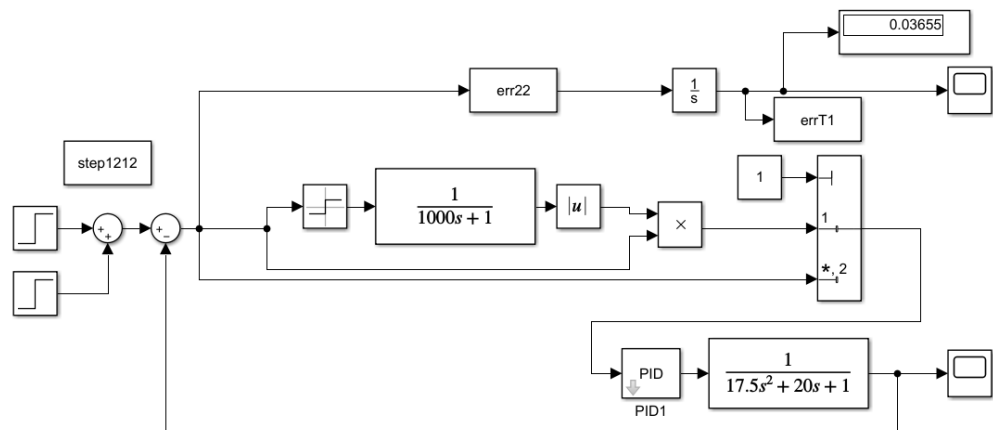


Рисунок 2.28 – Схема моделювання САР (при $T = 17,5$, $T_2=20$)

Дослідження показали, що у системі виникають коливання через зміни параметрів об'єкта керування, тобто перша постійна часу T збільшилась з 1 до 17,5, а T_2 змінюється від 1 до 20. Зміна інтегральної квадратичної похибки вимагала зміни структури САР, тобто включення пристрою корекції з амплітудним придушенням. Аналіз показав, що ці дії збільшують час реакції системи і зменшують перерегулювання до нуля.

З рисунків 2.25 і 2.27 видно, що при зміні параметра T_2 об'єкта керування якість керування також може покращуватися відповідно до цієї моделі. Водночас встановлено, що збільшення параметра T_2 об'єкта керування зменшує коливання перехідного процесу.

Розробка системи автоматичного керування у MATLAB із застосуванням псевдолінійного регулятора з адаптивною структурою продемонструвала ефективність підходу у моделюванні об'єктів різного порядку та умов зміни параметрів.

- Модель системи з PID та адаптивним регулятором дозволила проводити точне моделювання переходу сигналу керування через блоки інтегральної, пропорційної та диференціальної дії (рис. 2.6 – 2.7).

- Адаптивний контроль параметра T_1 псевдолінійного коректора через S-функції (step1212, err22, errT1) забезпечує автоматичне підключення каналу корекції з амплітудним придушенням при зміні інтегральної квадратичної похибки. Це дозволяє системі адаптуватися до коливань об'єкта керування та зменшувати перерегулювання (рис. 2.8–2.28).

- Динаміка переходів системи: при зміні постійної часу T від 1 до 20 спостерігалися коливання, які коригувалися автоматично через підключення пристрою корекції. Результати моделювання показують, що використання адаптивного коректора збільшує час реакції системи, але значно зменшує перерегулювання та інтегральну квадратичну похибку.

- Вплив параметра T_2 об'єкта керування: збільшення цього параметра сприяє зменшенню коливань перехідного процесу та покращує якість регулювання. Це підтверджено результатами перехідних процесів на різних етапах моделювання (рис. 2.25 і 2.27).

- Аналіз результатів: програмна реалізація дозволяє наочно відслідковувати ефект підключення коректора на стабільність системи, демонструючи високий рівень адаптивності та точності керування. Система демонструє коректну роботу у всіх протестованих діапазонах зміни параметрів об'єкта.

Застосування псевдолінійного регулятора з адаптивною структурою у MATLAB дозволяє ефективно керувати нестационарними об'єктами, підвищує стабільність і точність системи, зменшує перерегулювання та інтегральну похибку, а також забезпечує адаптацію до змін параметрів

					КНУ КРБ.174.26.03.02.ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

об'єкта в реальному часі.

2.3 Програмна реалізація адаптивного коректуючого пристрою на контролері Simatic S7-400

Контролер Simatic S7-400 є потужним програмованим контролером, призначеним для систем автоматизації середнього та високого рівня. Програмне середовище STEP 7 містить всі необхідні інструменти для створення, налагодження та експлуатації програм для ПЛК SIMATIC.

2.3.1 Реалізація амплітудного каналу

Програмна реалізація псевдолінійного регулятора з амплітудним подавленням на мові FBD базується на розбитті передатної функції коректора на елементарні математичні операції. Передатна функція амплітудного каналу КУ має вигляд:

$$W_A(s) = \frac{k}{T_2 s + 1}$$

і реалізується у вигляді послідовності елементарних блоків

$$W_A(s) = k \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{T_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{T_2} \cdot \frac{1}{s}} \quad (2.5)$$

Структура передавальної функції амплітудного каналу у вигляді сукупності елементарних ланок показана на рисунку 2.29.

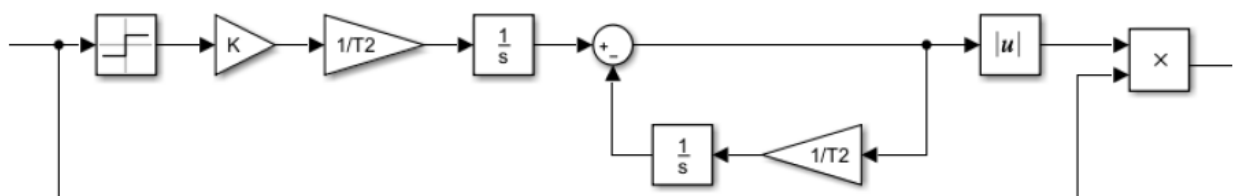


Рисунок 2.29 – Структура передавальної функції амплітудного каналу у вигляді сукупності елементарних ланок

Результати реалізації амплітудного каналу показали:

- коректор успішно обмежує вихідний сигнал у межах допустимої амплітуди;
- забезпечує плавне реагування на великі збурення, зменшуючи перерегулювання;
- структура каналів дозволяє гнучко підбирати параметри послідовних елементарних блоків для оптимізації швидкодії.

Блок-схеми FBD (рис. 2.30, 2.31) демонструють розподіл сигналів через додавання, множення, ділення та абсолютні значення для формування керуючого сигналу.

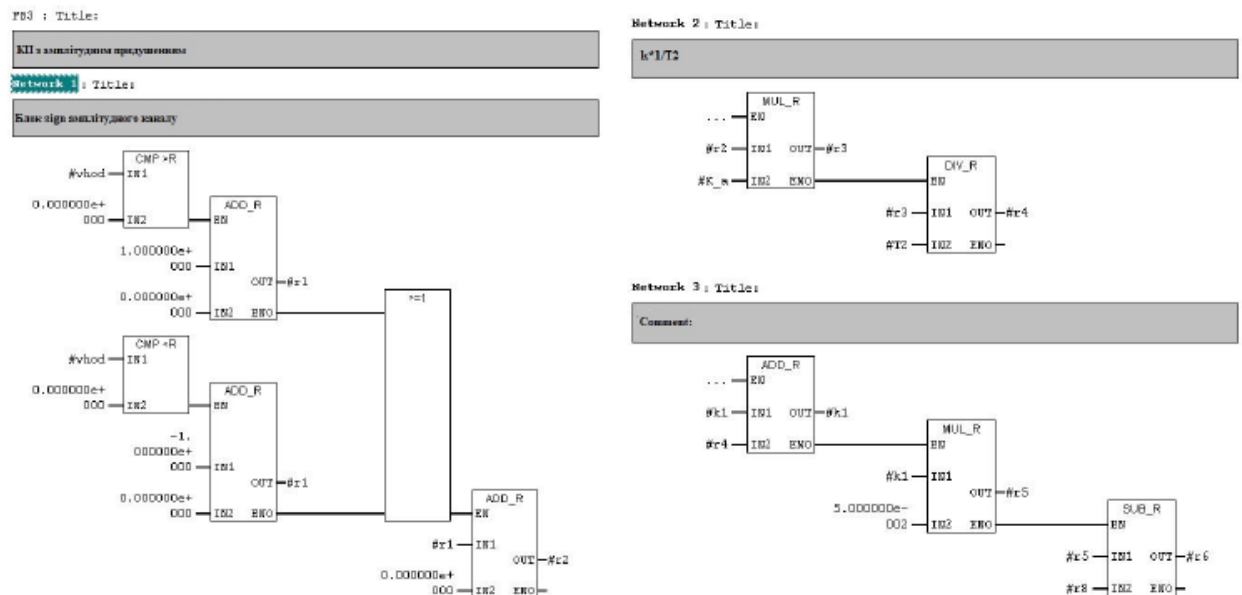
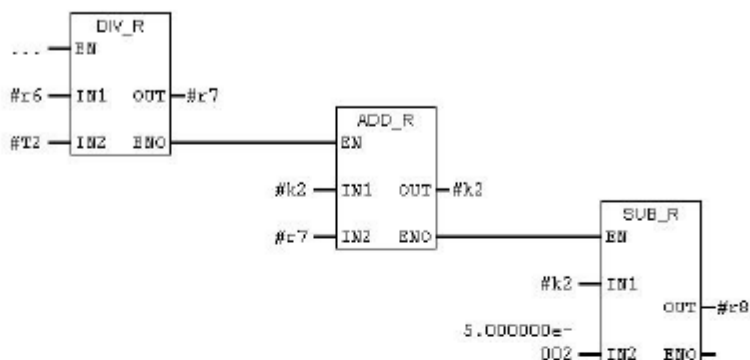


Рисунок 2.30 – Програмний розділ для реалізації амплітудного каналу

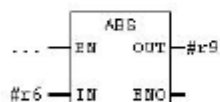
Network 4 : Title:

Comment:



Network 5 : Title:

Comment:



Network 6 : Title:

Comment:

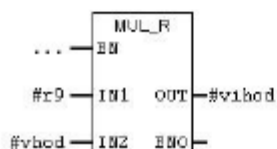


Рисунок 2.31 – Програмний розділ для реалізації амплітудного каналу

2.3.2 Реалізація ПІД-регулятора

Передавальна функція ПІД-регулятора:

$$W_p(s) = k_n + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d T_d s}{T_d s + 1} \quad (2.6)$$

$$\text{де } T_d = \frac{k_d}{k_n}$$

Диференціальне звено реалізоване як послідовність елементарних блоків.

$$\frac{k_d}{T_d s + 1} = \frac{k_d}{T_d} * \frac{1}{1 + \frac{1}{T_d} \cdot \frac{1}{s}} \quad (2.7)$$

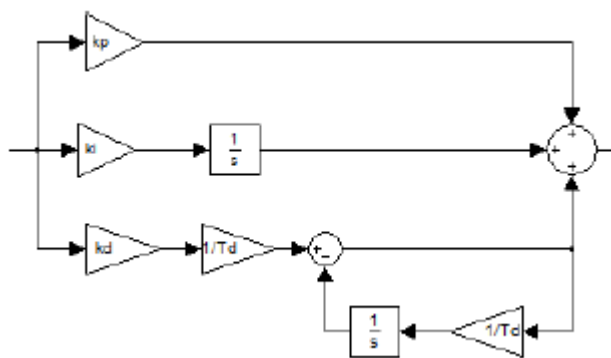


Рисунок 2.32 – Структура ПІД-регулятора у виді сукупності елементарних ланок

Програмна реалізація ПІД-регулятора в STEP 7 на FBD показана на рисунках 2.33 та 2.34.

Результати роботи регулятора:

- система стабільно реагує на зміни сигналу об'єкта;
- ПІД-ланка забезпечує швидке зменшення помилки регулювання;
- комбінація ПІД та псевдолінійного коректора дозволяє підтримувати бажану динаміку для нестационарних об'єктів.

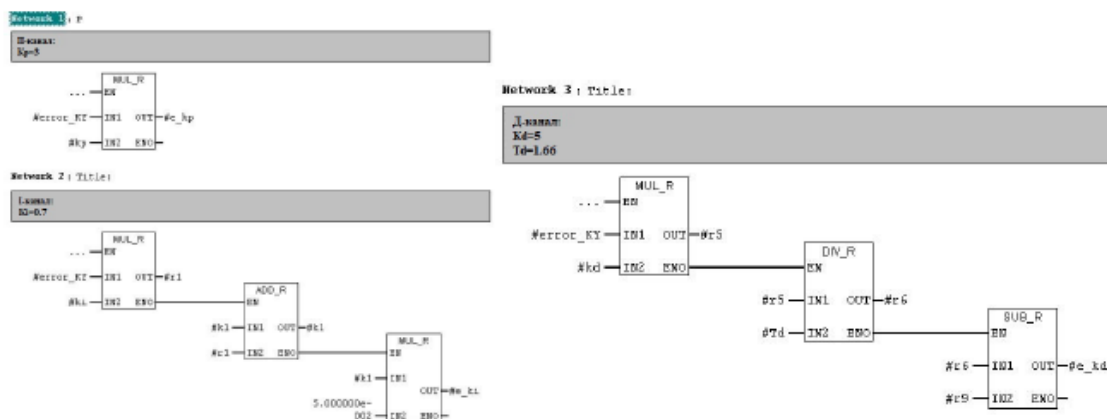
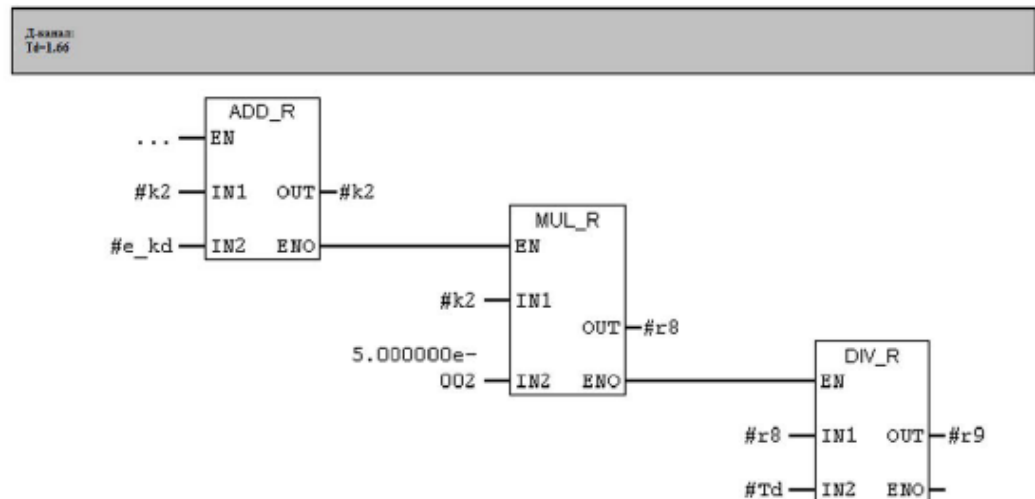


Рисунок 2.33 – Програмний розділ для реалізації ПІД-регулятора

Network 4: Title:



Network 5: Title:

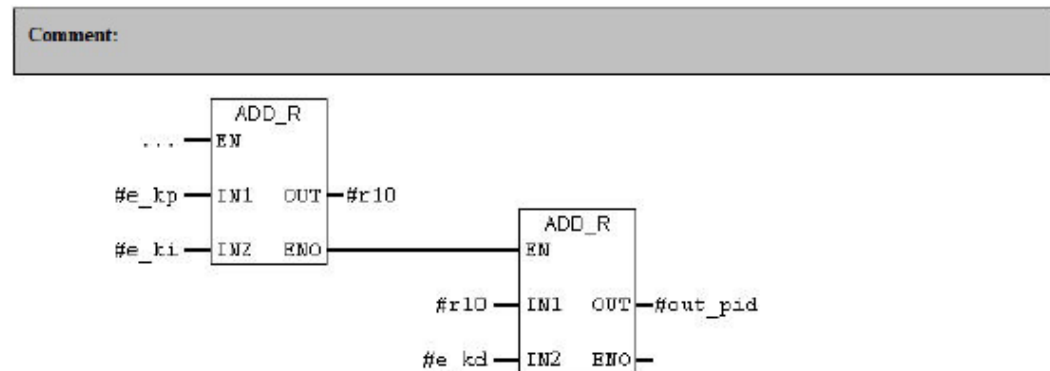


Рисунок 2.34 – Програмний розділ для реалізації ПІД-регулятора

2.3.3 Реалізація об'єкта другого порядку

Передавальна функція об'єкта другого порядку представлена як:

$$W_{ok}(s) = \frac{k}{T_1 s^2 + T_2 s + 1} = k * \frac{1}{s^2} * \frac{1}{T_1} * \frac{1}{1 + \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{1}{s} + \frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{s^2}} \quad (2.8)$$

Структура об'єкта розбита на елементарні блоки:

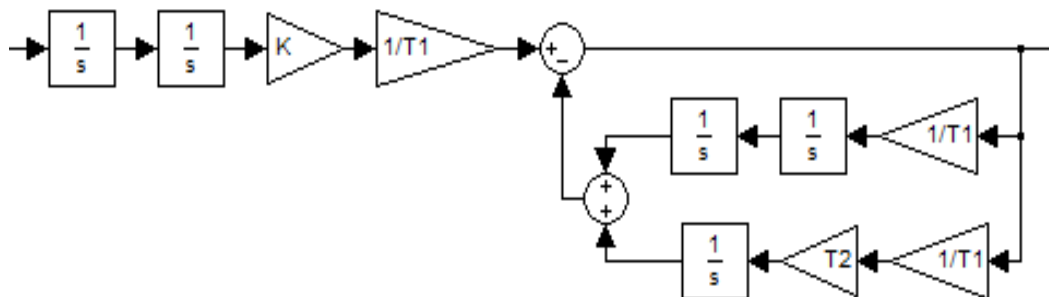


Рисунок 2.35 – Структурна схема ОК у вигляді сукупності елементарних ланок

Програмна реалізація об'єкту другого порядку в STEP 7 на FBD показана на рисунках 2.36 та 2.37.

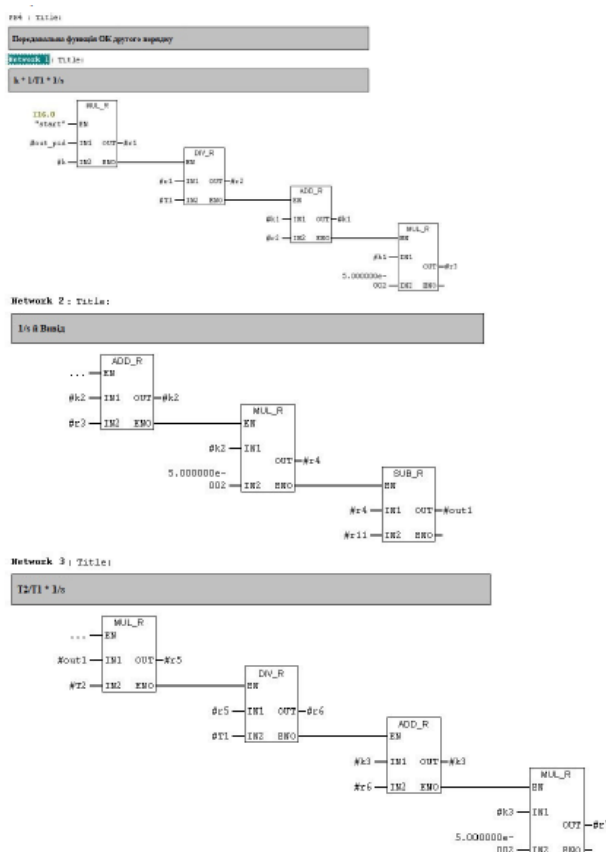


Рисунок 2.33 – Програмний розділ для реалізації об'єкту другого порядку

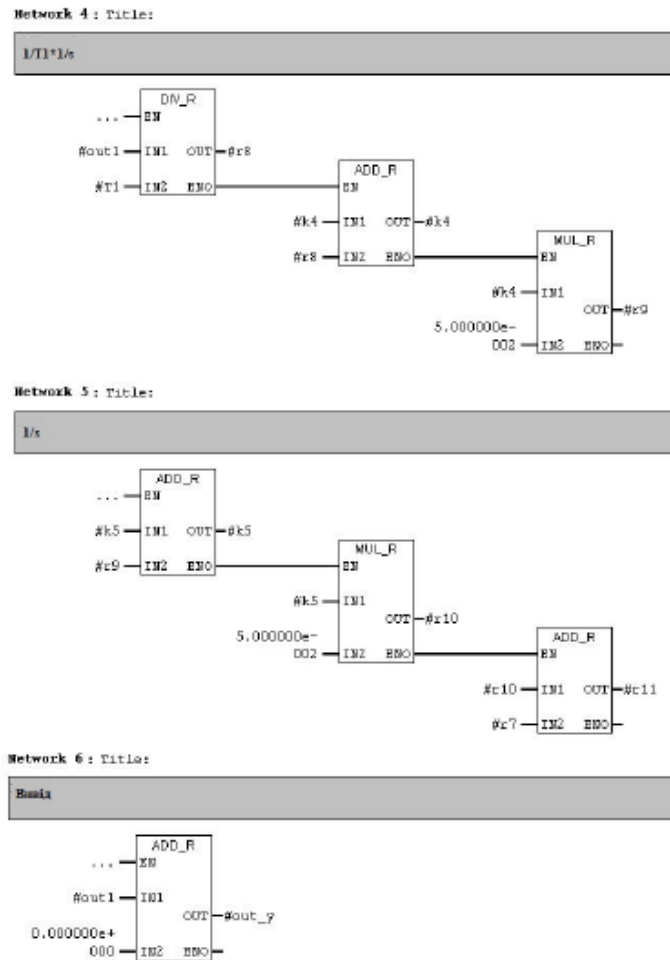


Рисунок 2.34 – Програмний розділ для реалізації об'єкту другого порядку

Отримані результати моделювання та програмної реалізації:

- об'єкт стабільно взаємодіє з регулятором, зберігаючи передбачувану динаміку;
- програмний розділ на FBD дозволяє легко змінювати параметри об'єкта для тестування різних сценаріїв;
- поєднання об'єкта другого порядку та псевдолінійного регулятора забезпечує високий рівень точності та стійкості системи автоматичного регулювання.

Програмна реалізація регулятора на мові FBD показала:

- Вдале поєднання ПД та псевдолінійного коректора підвищує стабільність та точність САР.
- Амплітудний канал ефективно обмежує вихідні сигнали, зменшуючи перерегулювання.

– Реалізація об'єкта другого порядку дозволяє моделювати реальні динамічні процеси і тестувати регулятор у різних умовах.

– Структура програмних розділів FBD зручна для подальшої адаптації та масштабування системи.

Розробка системи автоматичного керування з псевдолінійним регулятором на контролері Simatic S7-400 та програмна реалізація у середовищі STEP 7 (FBD) дозволила:

– Успішно реалізувати амплітудний канал коректора, який обмежує вихідний сигнал у межах допустимої амплітуди. Блоки додавання, множення, ділення та абсолютних значень забезпечують формування керуючого сигналу з можливістю адаптивного коригування (рис. 2.30 – 2.31).

– Реалізувати ПД-регулятор у FBD, де диференціальне, інтегральне та пропорційне звення представлені як послідовність елементарних блоків. Це забезпечує швидке реагування системи на зміни параметрів об'єкта та стабільну динаміку (рис. 2.33 – 2.34).

– Моделювати об'єкт другого порядку та поєднати його з регулятором. Елементарні блоки передатної функції об'єкта дозволяють гнучко змінювати параметри для тестування різних режимів роботи (рис. 2.36 – 2.37).

Таким чином, програмна реалізація регулятора мовою FBD підтвердила працездатність адаптивної структури САР, дозволила ефективно тестувати систему у різних режимах та забезпечила підвищену стійкість і точність керування при зміні параметрів об'єкта.

Висновки за розділом:

Використання S-функцій у Simulink забезпечує гнучкість та масштабованість моделей. S-функції дозволяють реалізувати будь-які алгоритми керування, інтегрувати диференціальні та дискретні рівняння, контролювати параметри блоку у реальному часі та підключати адаптивні коректори до моделі САР. Налаштування фіксованого кроку симуляції

гарантує стабільність результатів та виключає помилки, пов'язані з різними розмірами кроку (рис. 2.1–2.3).

Розробка систем керування з псевдолінійним регулятором у MATLAB/Simulink підтвердила, що застосування адаптивної структури дозволяє системі динамічно змінювати параметри T та T_2 об'єкта керування залежно від квадратичної інтегральної похибки. Це забезпечує зменшення коливань перехідного процесу, підвищує точність регулювання та зменшує перерегулювання до нуля. Результати моделювання показали, що адаптивна структура регулятора підвищує якість керування при зміні параметрів об'єкта та стабілізує роботу САР навіть при значних коливаннях (рис. 2.10 – 2.28).

Програмна реалізація регулятора мовою FBD на контролері Simatic S7-400 показала ефективність використання псевдолінійного коректора з амплітудним придушенням. Амплітудний канал обмежує вихідні сигнали, зменшує перерегулювання та забезпечує стабільність системи. ПІД-регулятор, реалізований як послідовність елементарних блоків, забезпечує швидку реакцію та точне керування об'єктом другого порядку. Використання багатопортового комутатора дозволяє адаптивно підключати корекційний канал у залежності від інтегральної квадратичної похибки, що підвищує точність керування та стійкість системи (рис. 2.30 – 2.37).

Комплексний аналіз результатів показав, що поєднання FBD-реалізації на контролері та моделювання в MATLAB/Simulink дозволяє:

- забезпечити високоточне та стабільне керування нестационарними об'єктами;
- зменшити перерегулювання та інтегральну квадратичну похибку;
- адаптивно змінювати параметри системи в залежності від стану об'єкта;
- ефективно інтегрувати програмні модулі у Simulink для тестування та оптимізації.

Другий розділ підтвердив, що застосування псевдолінійного регулятора з адаптивною структурою у поєднанні з FBD-реалізацією та S-функціями

					КНУ КРБ.174.26.03.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

MATLAB/Simulink забезпечує комплексний підхід до підвищення якості та стійкості систем автоматичного керування. Це дозволяє забезпечити ефективну роботу САР навіть при значних змінах параметрів об'єкта та різних режимах експлуатації, що є практично значимим для промислових і технологічних процесів.

					КНУ КРБ.174.26.03.02.ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У цій роботі було проведено дослідження та розробку псевдолінійного регулятора для підвищення якості систем автоматичного керування (САР) нестационарними об'єктами. Метою роботи було створення ефективного регулятора, здатного адаптуватися до змінних параметрів об'єкта керування, зокрема за допомогою розробки та впровадження псевдолінійного регулятора з амплітудним придушенням, що дозволяє зменшити коливання і підвищити точність та стабільність перехідних процесів.

Перший розділ роботи зосереджений на теоретичних аспектах побудови систем автоматичного керування, зокрема на аналізі структури та принципів роботи класичних ПІД-регуляторів та адаптивних систем управління. Розглянуто різні типи коригуючих пристроїв: лінійні, нелінійні та псевдолінійні. Виявлено, що псевдолінійні регулятори поєднують переваги класичних ПІД-регуляторів та адаптивних методів корекції, забезпечуючи високу точність, стабільність та швидкодію системи. Це дає змогу успішно вирішувати проблеми, пов'язані з непередбачуваними змінами параметрів об'єкта, що є характерними для багатьох реальних технологічних процесів.

Другий розділ роботи підтвердив ефективність застосування псевдолінійного регулятора з адаптивною структурою в моделюванні та реальних умовах. Моделювання в середовищі MATLAB/Simulink показало, що використання адаптивної структури регулятора дозволяє динамічно змінювати параметри об'єкта керування в залежності від змін у квадратичній інтегральній похибці. Це дозволяє значно зменшити коливання перехідного процесу та знижує перерегулювання до мінімуму, що сприяє покращенню якості керування при роботі з нестационарними об'єктами.

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Кулинич Д. С.			ВИСНОВКИі			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Савийцький О.І.								62	2
								АКНТ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Реалізація розробленого псевдолінійного регулятора на контролері Simatic S7-400, з використанням FBD-реалізації та S-функцій у Simulink, також показала високі результати. Застосування амплітудного придушення забезпечує зменшення перерегулювання та стабільність системи, навіть при значних коливаннях параметрів об'єкта. Адаптивне підключення корекційного каналу у залежності від інтегральної похибки дозволяє підвищити точність регулювання та забезпечити стабільну роботу САР в різних режимах експлуатації.

Практична значимість дослідження полягає в тому, що розроблений псевдолінійний регулятор має потенціал для широкого застосування в різних галузях, зокрема в промислових технологічних процесах, енергетичних системах та транспортних об'єктах, де стабільність та точність регулювання є критичними. Завдяки можливості адаптації регулятора до змінних параметрів об'єкта, цей підхід може значно підвищити ефективність управління, зменшити витрати енергії та забезпечити надійність системи при роботі в непередбачуваних умовах.

Загалом, виконане дослідження підтверджує, що застосування псевдолінійного регулятора з адаптивною структурою є ефективним способом підвищення якості та стійкості систем автоматичного керування, що забезпечує більш точне та надійне управління навіть у складних умовах експлуатації. Це відкриває нові можливості для впровадження таких систем у промислові та технологічні процеси, де важливою є точність, адаптивність і стабільність керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловйов В. М., Шарко В. І. Основи автоматичного керування. Київ: Вища школа, 2001.
2. Бронштейн І. Н., Семендяєв В. В. Математичні методи в автоматичному керуванні. Київ: Наукова думка, 1997.
3. Беляєв А. В., Руденко, О. М. Системи управління та автоматизація процесів. Харків: ХНУРЕ, 2010.
4. Троць М. В., Кудряшов О. О. Основи теорії автоматичного керування. Київ: Логос, 2008.
5. Павлов В. В. Нелінійні системи автоматичного керування. Київ: Наукова думка, 2000.
6. Сидоренко І. П. Адаптивне керування в технічних системах. Львів: Світ, 2006.
7. Кулініч В. В., Гудзенко М. П. Псевдолінійні регулятори для автоматичних систем керування. Київ: Наукова думка, 2011.
8. Рогов В. І. Основи теорії автоматичних систем. Харків: ХНАДУ, 2005.
9. Чернявський А. М. Моделювання і синтез систем керування. Київ: Наукова думка, 2012.
10. Литвин Ю. В., Юрченко В. І. Адаптивне регулювання в автоматичних системах. Одеса: ОНПУ, 2010.
11. Корсун В. В. Регулятори для нестационарних об'єктів. Львів: Львівська політехніка, 2007.
12. Порембовська, І. В. Контролери та їх застосування в автоматизованих системах. Чернівці: Рута, 2016.

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Кулинич Д. С.			СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Маринич І. А,						64	3
						АКНТ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.							
Затвердив		Маринич І.А.							

13. Скороспешкін М. В. Псевдолінійний регулятор / *Автоматика та програмна інженерія*. 2013. №3(5). с.27-29.
14. S-Function?- «MathWorks»: URL: <https://plantower-pms9003m-pm1-0-pm2-5-pm10-laser-particle-dust-sensor> (дата звернення: 10.05.2026)
15. Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. Prentice-Hall, 2010.
16. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 12th ed. Pearson, 2010.
17. Nise N. S. Control Systems Engineering. 7th ed. Wiley, 2015.
18. Franklin G. F., Powell J. D., Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems. 7th ed. Pearson, 2014.
19. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the ASME, 1942.
20. Khalil H. K. Nonlinear Systems. 3rd ed. Prentice Hall, 2002.
21. Nair R. Introduction to Modern Control Engineering. McGraw-Hill, 1998.
22. Lewis F. L., Vrabie D. M., Kurzhanskiy A. Reinforcement Learning and Adaptive Dynamic Programming for Feedback Control. Wiley, 2012.
23. Yamada T. Nonlinear Control Systems Analysis and Design. Elsevier, 2013.
24. Bennani S., Zhang G. Optimization-Based Control of Power Networks. Springer, 2021.
25. Wisniewski M. Applications of Adaptive Control in Industrial Process. Springer, 2008.
26. Lee J. Y., Lee H. S. Control Systems with Adaptive and Robust Approaches. CRC Press, 2015.
27. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

28. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

29. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

30. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

31. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Лістинг m-файлу «step1212» блоку S-Function у середовищі Simulink

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = step1212(t,x,u,flag)
switch flag
    case 0
        [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
    case 3
        sys=mdlOutputs(t,x,u);
    case {1,2,4,9}
        sys=[];
    otherwise
        DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 0;
sizes.NumInputs = 0;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [];
str = [];
ts = [0 0];
simStateCompliance = 'UnknownSimState';
function sys=mdlOutputs(t,~,~)
if t>=0 && t<50
    set_param('w02/Step','After','1')
    set_param('w02/Step1','After','0')
    set_param('w02/Constant','Value','2')
    set_param('w02/Transfer Fcn2','Numerator','[1] ')
    set_param('w02/Transfer Fcn2','Denominator','[1 1 1]')
    set_param('w02/Transfer Fcn','Numerator','[1]')
    set_param('w02/Transfer Fcn','Denominator','[1 1]')
end
if t>50 && t<200
    set_param('w02/Transfer Fcn2','Numerator','[1]')

```

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        set_param('w02/Transfer Fcn2','Denominator','[10.8 10 1]')
    end
    if t>200 && t<400
        set_param('w02/Step1','After','0.1')
    end
    if t>400 && t<600
        set_param('w02/Step1','After','0')
    end
    if t>600 && t<800
        set_param('w02/Step1','After','0.1')
    end
    sys=[];

```

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лістинг m-файлу «err22» блоку S-Function у середовищі Simulink

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = err22(t,x,u,flag)
switch flag
case 0
    [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
case 3
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
case {1,2,4,9}
    sys=[];
otherwise
    DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 1;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [];
str = [];
ts = [0 0];
simStateCompliance = 'UnknownSimState';
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
if t>=200 && t<=400
    sys=u*u;
else
    sys=[];
end
end

```

Лістинг m-файлу «errT1» блоку S-Function у середовищі Simulink

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = errT1(t,x,u,flag)
switch flag
case 0
    [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
case 3
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
case {1,2,4,9}
    sys=[];
otherwise
    DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 0;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [];
str = [];
ts = [0 0];
simStateCompliance = 'UnknownSimState';
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
if t>600
    if u>0.008798
        set_param('w02/Constant','Value','1')
    end
    if u>0.008798 && u<=0.01317
        set_param('w02/Transfer Fcn','Numerator','[1]')
        set_param('w02/Transfer Fcn','Denominator','[140 1]')
    end
    if u>0.01317 && u<=0.0167
        set_param('w02/Transfer Fcn','Numerator','[1]')
        set_param('w02/Transfer Fcn','Denominator','[170 1]')
    end
end

```

					КНУ КРБ.174.26.03.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

```

end
if u>0.0167 && u<=0.02127
    set_param('w02/Transfer Fcn','Numerator','[1]')
    set_param('w02/Transfer Fcn','Denominator','[230 1]')
end
if u>0.02127 && u<=0.02997
    set_param('w02/Transfer Fcn','Numerator','[1]')
    set_param('w02/Transfer Fcn','Denominator','[380 1]')
end
if u>0.02997 && u<=0.03646
    set_param('w02/Transfer Fcn','Numerator','[1]')
    set_param('w02/Transfer Fcn','Denominator','[550 1]')
end
if u>0.03646
    set_param('w02/Transfer Fcn','Numerator','[1]')
    set_param('w02/Transfer Fcn','Denominator','[1000 1]')
end
else
end
sys=[];
.

```