

Міністерство освіти і науки України

Одеський національний технологічний університет

Кафедра Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем



**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**  
**на тему «Підвищення ефективності автоматичного керування випічкою**  
**хліба в ротаційній печі»**  
(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача В.Г. Арутюняна  
(прізвище, ініціали)  
6 курсу Ам-20 групи

Керівник доцент В.Г. Муратов  
(посада, прізвище та ініціали)

Завідувач(ка) кафедри АТПіРС \_\_\_\_\_  
(назва кафедри) (підпис) Підпис

І.М. Світий  
(ПІБ)

Одеса – 2024 рік

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

**Здобувач Арутюнян Ваган Тігранович**

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування випічкою хліба в ротаційній печі»
2. Керівник кваліфікаційної роботи Муратов Віктор Георгійович, к.т.н. доцент  
Пункт 1 і 2 затверджена наказом ОНТУ №877-03 від 29.11.22 р.
3. Строк подання здобувачем випускної роботи «11» червня 2024 р.
4. Вихідні дані до випускної роботи: матеріали виконаних індивідуальних завдань (ІЗ) виробничої практики, дипломної роботи бакалавра, дослідницької практики, курсових та самостійних робіт, виконаних відповідно до ІЗ.
5. Зміст кваліфікаційної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):  
Вступ (актуальність роботи, зв'язок з науковими напрямками робіт університету, мета та задачі дослідження, об'єкт та предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна отриманих результатів, практичне значення отриманих результатів, апробація результатів роботи, публікації, структура та об'єм роботи).  
Розділ 1. Технологічний процес, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.  
Розділ 2. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП.  
Розділ 3. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж.  
Розділ 4. Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію.  
Розділ 5. Реалізація та підготовка до впровадження на підприємстві (ротаційна піч)  
Додатки (допоміжні матеріали, ксерокопії програм конференцій, статей, патентів).  
6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж	Гурський О.О. к.т.н. доцент каф. АТПіРС		
Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію	Хобін В.А. д.т.н., проф. зав.каф. АТПіРС		

7. Дата видачі завдання «30» листопада 2023 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ та загальна характеристика роботи	29.12.23 р.	
2	Технологічний процес та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування	30.01.24 р.	
3	Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП	28.02.24 р.	
4	Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж	29.03.24 р.	
5	Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію	30.04.24 р.	
6	Реалізація та підготовка до впровадження результатів роботи	31.05.24 р.	
7	Оформлення додатків та роботи в цілому	03.06.24 р.	
8	Задача роботи на перевірку керівникові, виправлення зауважень, підпис керівника	06.06.24 р.	
9	Брошування роботи, представлення її завідувачу кафедри, підпис, направлення роботи на зовнішнє рецензування та захист у ЕК	11.06.24 р.	

Здобувач-дипломник Арутюнян В.Т. Керівник роботи Муратов В.Г.

*Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.*

*Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.*

Здобувач-дипломник Арутюнян В.Т. \_\_\_\_\_  
 ПІБ Підпис

## АНОТАЦІЯ

Арутюнян В.Т.«Автоматизація керування випічкою хліба в ротаційній печі на Одеському хлібозаводі №4». Кваліфікаційна робота магістра – Одеса: ОНТУ, 2022. - с.,Бібліогр.: , Іл.: , Табл.:

В даній роботі розглянуто питання модернізації системи автоматичного керування (САК) технологічним процесом випічки хліба в ротаційній печі. В якості об'єкта дослідження було обрано процес випічки хліба в ротаційній печі з електричним нагрівачем. Основною метою роботи є підвищення ефективності роботи установки за рахунок зменшення втрат від браку продукції. При виконанні роботи були проведені підвищення якості регулювання параметрів процесу за рахунок побудови системи автоматичного регулювання підвищеної динамічної точності та системи гарантуючого управління. Для вирішення задачі регулювання було отримано математичну модель процесу.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1.ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИПІЧКИ ХЛІБУ В РОТАЦІЙНІЙ ПЕЧІ, ТА ЗАВДАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ.....	10
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП.....	24
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	41
РОЗДІЛ 4.РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ САУ,ЩО РЕАЛІЗУЄ ФУНКЦІЮ.....	90
РОЗДІЛ 5.РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ НА РОТАЦІЙНІЙ ПЕЧІ НА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	129
ДОДАТОК А.....	131
ДОДАТОК Б.....	132
ДОДАТОК Г.....	133
ДОДАТОК Д.....	134
ДОДАТОК Е.....	135
ДОДАТОК Є.....	135
ДОДАТОК Ж.....	136
ДОДАТОК З.....	136
ДОДАТОК И.....	137

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

САК – система автоматичного керування;

САР – система автоматичного регулювання;

СГУ – система гарантуючого управління;

ММ – математична модель;

ФФ – формуючий фільтр;

ОР – об'єкт регулювання;

ТП – технологічний процес;

ОК – об'єкт керування;

КЗ – коригувальний зв'язок;

СКЗ – спрощений коригувальний зв'язок;

ПДТ – підвищена динамічна точність;

ППЗС – передпускова звукова сигналізація;

ЦДП – цифрово-дискретний перетворювач;

ДЦП – дискретно – цифровий перетворювач;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

АРМ – автоматизоване робоче місце;

ТА – технологічний агрегат;

КР – контур регулювання;

ФЛС – функціонально-логічна схема.

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Технологічний процес випічки призначений для закріплення структури сформованих виробів, а також отримання споживчих властивостей готового продукту. Ця фіксація форми виробів відбувається шляхом цілеспрямованої зміни властивостей. На цій ділянці велику роль відіграють процеси тепло і масообміну, меж фазного переходу (випаровування води). Випічкою завершується складний комплекс колоїдних, біохімічних та інших процесів, які протікають і на попередніх ділянках технологічної схеми - ділянках приготування і обробки тіста. При випічці змінюється інтенсивність цих процесів, відбувається перетворення тіста в м'якуш хліба з заданими властивостями, зумовленими вимірювальним та органолептичними методами. Тобто, сутністю технологічного процесу випічки є цілеспрямоване перетворення матеріальних (сформованого тіста) і енергетичних (підведення тепла) потоків в спеціальному технологічному обладнанні (хлібопекарської печі) з метою отримання заданих продуктів (хлібобулочних виробів) із заданими властивостями, тобто показниками якості. У процесі випічки хліба еластичність, міцність структури і сухість його м'якушки підвищується спочатку в пластах, які прилягають до кірці, а потім поступово і в центрі хліба. Всі ці зміни, які характеризують перехід тістової заготовки в процесі її випічки в хліб, є результатом цілого комплексу процесів - фізичних, мікробіологічних, колоїдно-хімічних і біохімічних. Основними етапами технологічного процесу є: прийом і зберігання борошна на хлібо заводі, приготування тіста, обробка тіста, випічка продукції, охолодження і зберігання хліба в експедиції.

В роботі розглянуті рішення з керування процесом випікання хлібобулочних виробів в ротаційній печі з електричним нагрівачем.

**Зв'язок з науковими напрямками робіт академії та кафедри.** Ця кваліфікаційна робота магістра із напрямків робіт академії та кафедри

пов'язана з технологією хліба, кондитерських, макаронних виробів та харчоконцентратів.

**Мета та завдання дослідження.** Метою дослідження є підвищення динамічної точності керування випічкою хліба в ротаційній печі шляхом розробки системи автоматичного керування процесом випічки з метою підтримки регульованих змінних на регламентному рівні в перехідних та усталених режимах роботи.

Для досягнення цієї мети в кваліфікаційній роботі бакалавра було вирішено такі завдання:

- аналіз технологічного процесу випічки хліба в ротаційній печі як об'єкта управління, обґрунтування доцільності та шляхів підвищення ефективності керування процесом;

- конкретизація задачі дотримання регламентів управління випічкою хліба в ротаційній печі, розробка і реалізація комплексу його моделей як об'єкта регулювання в імітаційному середовищі Matlab;

- розробка і параметрична оптимізація алгоритмів регулювання, порівняльний аналіз САР, отримання цифрових аналогів обраних алгоритмів;

- конкретизація задачі і розробка алгоритмів логічного керування випічкою хліба в ротаційній печі;

- вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів;

- розробка контролерно-комп'ютерної мережі, програмування алгоритмів регулювання та логічного керування САК;

- розробка SCADA-системи для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК в імітаційному середовищі WinCC flexible;

- розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК, включаючи питання охорони праці.

- попереднє обґрунтування економічної доцільності реалізації розробки

**Об'єкт і предмет дослідження.** Об'єктом і предметом дослідження є ротаційна піч.

**Методи дослідження.** Основним методом проведеного дослідження був метод системного аналізу. Для ідентифікації моделей об'єкта були використані такі методи: активного експерименту, пасивного експерименту та метод типової статичної ідентифікації. Інженерні методики ідентифікації моделей об'єкту керування. При синтезі системи автоматичного регулювання методи і теорії автоматичного керування, а саме інженерні методики параметричного синтезу, оптимального параметричного синтезу, принцип автономності, методи нечітких множин та нейронних мереж, Основним експериментальним методом обрано імітаційне моделювання.

## РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИПІЧКИ ХЛІБУ В РОТАЦІЙНІЙ ПЕЧІ, ТА ЗАВДАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

### 1.1. Короткий опис ТП випічки хлібу в ротаційній печі та основного обладнання.

В роботі розглянуто процеси керування ротаційною піччю з електричним нагрівачем ТЕНом, технологічна схема котрою наведена на рис. 1.1. Розглянемо детально процес випікання, що здійснюється в подібних печах.

Візок із хлібними заготовками в ручному режимі подається в піч, куди після закриття і блокування дверей, подають вентилятором В1 (привод М1) атмосферне повітря, котре фільтрується та нагрівається за допомогою ТЕНу. При цьому, вентилятором В2 (привод М2) здійснюється виведення відпрацьованого повітря з печі в атмосферу. Для зволоження заготовок в піч

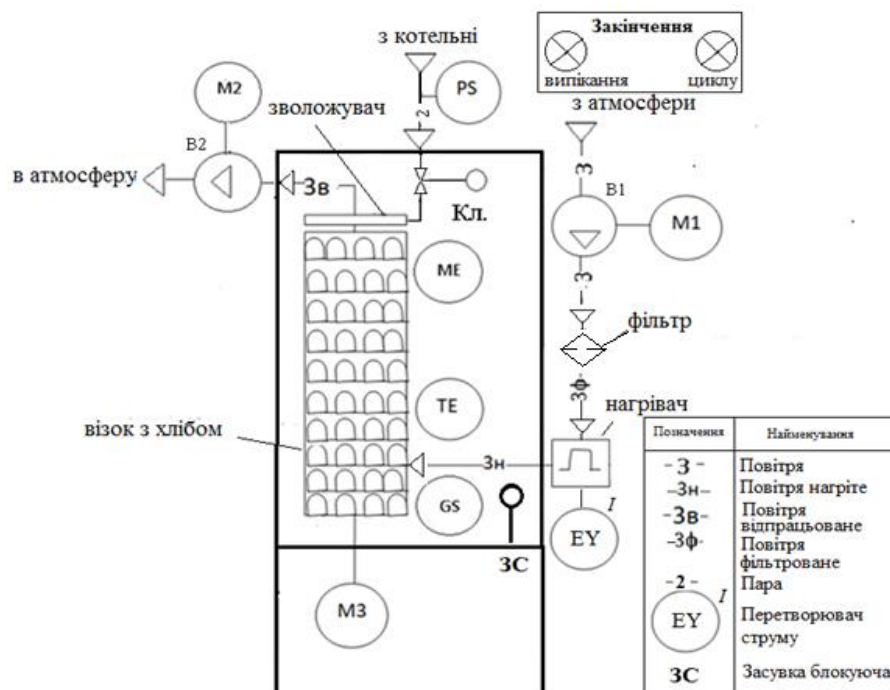


Рис. 1.1 – Технологічна схема ротаційної печі

подається пара з котельні через регулюючий клапан (КЛ.). Візок із хлібними заготовками, під час випікання, обертається завдяки електроприводу М3.

Зміна температури в печі забезпечується завдяки подачі на ТЕН змінного струму через регулюючий перетворювач (EY). Вимірювання температури в печі здійснюється датчиком TE, а відносної вологості – датчиком ME. Наявність пари необхідного тиску в паропроводі перевіряється датчиком-сигналізатором PS, а факт закриття дверей датчиком GS. Процес випікання хліба в ротаційній печі складається з етапів: завантаження в піч візка із заготовками і закриття дверей, етапу нагріву і зволоження, першого та другого етапів випікання, а також охолодження. Тривалість кожного з етапів випікання та температурно-вологістний режим в печі визначаються відповідним рецептом (регламентом) на виготовлення конкретного виду готової продукції.

Послідовність етапів, що складає процес випікання хліба, після завантаження візка із заготовками і закриття дверей (з їхнім блокуванням), є наступною. Спочатку вмикається електропривод M3 для обертання візка з заготовками, потім вмикається вентилятор B2 (витяжка) і, протягом усього циклу випікання забезпечує висмоктування відпрацьованого повітря з печі. При цьому, вентилятором B1 подається в атмосферне повітря. Повітря, що подається в піч, фільтрується і нагрівається ТЕНОм, а потім, через зволожувач, з котельні подається пара, завдяки чому вологість в печі досягає регламентованого значення (наприклад, 70%). Через регламентований час (наприклад, 3 хв. = 180 с), на протязі котрих здійснюється етап зволоження хлібних заготовок, починається 1-й етап випікання, на котрому середовище в печі нагрівається до регламентованої температури (наприклад,  $\theta = 255^{\circ}\text{C}$ ), та прогріває хлібну заготовку у візку, який обертається, при цьому подача пара в піч припиняється. Через регламентований час (наприклад, 10 хв. = 600 с) починається 2-й етап випікання, на котрому температура середовища становить своє регламентоване значення (наприклад,  $\theta = 185^{\circ}\text{C}$ ). Другий (останній) етап випікання триває відповідний регламентований час (наприклад, 94 хв. = 5640 с), після чого подається звуковий та світловий сигнал про завершення випікання хлібу, а нагрівач, потрібно вимкнути,

внаслідок чого хліб в печі остигає. Після остигання середовища в печі до початкових значень (наприклад, температури  $\theta = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  та відносної вологості –  $\varphi = 45\%$ ), вимикаються вентилятори В1, В2 і привод М3, що обертає візок. Цикл вважається завершеним, подається сигнал про завершення циклу випікання хлібу, і дозволяється відкривання дверей та вивантаження готового хлібу.

Як приклад популярної моделі ротаційної печі з ТЕНОм, на рис.1.2 наведено піч.



Рис. 1.2 – Ротаційна піч

Аналіз нормативів ведення технологічного процесу та експлуатації обладнання оформимо у вигляді таблиці регламентів 1.1.

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів ведення процесу випікання хліба в ротаційній печі.

№	Найменування параметрів на етапі та його тривалість	Позначення	Одиниці вимірювання	Номинальне значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
					Тривалі (t→∞)		t, сек
					Велич.	Велич.	
1	Температура повітря на етапі зволоження (3 хв.)	$\theta_{\text{пов } 1}$	°C	110	±3	± 10	120
2	Температура повітря на 1-му етапі випічки (10 хв.)	$\theta_{\text{пов } 2}$	°C	255	±3	± 10	120
3	Температура повітря на 2-му етапі випічки (94 хв.)	$\theta_{\text{пов } 3}$	°C	185	±3	± 10	120
4	Відносна вологість (3 хв.)	$\varphi_{\text{пов}}$	%	70	-0.5	-4	40

## 1.2. Аналіз впливу режимів ведення ТП та роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз відповідних регламентів та наслідків їх порушень.

Загальною метою функціонування підприємства в цілому є виконання планових завдань або договірних зобов'язань по номенклатурі і обсягу продукції, а також отримання при цьому певного економічного ефекту. Останнє характеризується показниками прибутку, собівартості, розмірами виплачених штрафних санкцій і т.д.

У процесі функціонування САК повинно бути забезпечено впорядкування і прискорення обробки оперативної інформації; прискорення

виявлення та усунення аварійних і перед аварійних ситуацій; підвищення якості регулювання регламентів, завдяки чому, досягається покращення техніко-економічних показників роботи підприємства.

За керуванням технологічним процесом випікання хліба в ротаційній печі необхідно:

1) Забезпечити максимальну точність заданих значень температури та вологості повітря в середовище печі;

2) Зменшити кількість браку готової продукції;

3) Запобігти розвитку аварій шляхом автоматичного керування процесом випікання у випадку виникнення перед аварійних ситуацій.

Отже основним потенційним джерелом економічної ефективності впровадження САК процесом випікання хліба в ротаційній печі є зменшення браку готової продукції.

Таблиця 1.2 – Вплив вирішених завдань на показники економічної ефективності.

Статті витрат або інші показники діяльності підприємства, на які впливає модернізація	За рахунок яких заходів	Зміна показників
Збільшення витрат на утримання та експлуатацію обладнання		$\Delta A$ – придбання засобів автоматизації
Збільшення обсягу реалізованої продукції	За рахунок підвищення якості алгоритмів керування	Брак продукції до модернізації – 4%, брак продукції після модернізації не повинен перевищувати 2%

### **1.3. Аналіз існуючих САК ТП випічки хлібу в ротаційній печі: математичні моделі процесу як об'єкта управління, функції, структури та алгоритми САК.**

1.3.1. Конкретизація мети і завдань керування об'єктом, виявлення регульованих координат.

Загальною метою функціонування підприємства в цілому є виконання планових завдань або договірних зобов'язань щодо номенклатури та обсягу продукції, а також отримання при цьому певного економічного ефекту.

Декомпозиція загальної мети функціонування підприємства для більш низьких рівнів виробничої ієрархії приводить до наступних цілей:

- а) на рівні окремого технологічного процесу – координація роботи технологічного обладнання, на якому реалізується процес;
- б) на рівні окремих одиниць технологічного обладнання – виконання технологічних, експлуатаційних і техніко-економічних регламентів, зокрема – оптимізація роботи окремих одиниць обладнання.

Звідси задачу керування можна розділити на:

- а) задачу регулювання, коли необхідно забезпечити виконання вимог регламенту;
- б) завдання умовної оптимізації, коли при дотриманні вимог регламенту додатково відповідно до наперед сформульованим критерієм, вирішуються задачі оптимізації процесу.

Для процесу випічки хлібу в якості регульованої координати доцільно обрати температуру середовища  $\theta_{\text{пов}}$  та вологість середовища  $\varphi_{\text{пов}}$ .

#### 1.3.2. Вибір управляючих дій об'єкту керування.

Необхідною умовою вирішення задач керування є наявність управляючих дій, що повинні бути вхідними змінними (координатами) ОК. Для задач регулювання, такими управляючими діями, насамперед, є дії, що цілеспрямовано можуть змінювати витрати матеріальних і енергетичних потоків, а саме – положення регульовальних органів. Кількість управляючих дій повинно бути рівним кількості регульованих змінних.

Для процесу випічки хлібу до управляючих дій доцільно віднести орган, який регулює температуру ( $u_1$ ) та орган, який регулює вологість ( $u_2$ ).

### 1.3.3. Виділення та класифікація збурень об'єкта керування.

Після того, як визначені управляючі дії, всі інші вхідні змінні відносять у розряд збурень, тобто таких дій середовища, зміна яких порушує хід технологічного процесу і режими роботи технологічного агрегату.

Для процесу випічки хлібу до неконтрольованих збурень доцільно віднести  $f_1$  та  $f_2$ . Контрольовані збурення відсутні.

### 1.3.4. Складання структурної (координатної) схеми об'єкта регулювання

Структурна схема ОК є черговим і останнім етапом формалізації подання технологічного процесу як ОК. Розробка схеми проводиться на основі результатів досліджень, викладених у п.п. 1.3.1 – 1.3.3.

Структурна схема ОК, по суті, є найбільш загальною (концептуальною) моделлю технологічного процесу як ОК.

Структурна схема процесу випічки хлібу в ротаційній печі як об'єкту регулювання наведена на рис. 1.2.

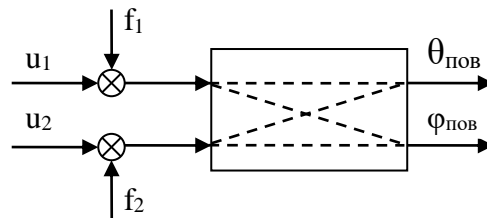


Рис.1.3– Структурна схема процесу випічки хлібу в ротаційній печі як об'єкту регулювання

$\theta_{\text{пов}}$  – де температура повітря в середовищі печі, °С;

$\varphi_{\text{пов}}$  – відносна вологість повітря в середовищі печі, %;

$u_1$  – зміну потужності (струму) ТЕНу, %;

$u_2$  – положення регулювального органа подачі пари, %;

$f_1, f_2$  – неконтрольовані змінні.

**1.4. Комплекс математичних моделей ТП випічки хлібу в ротаційній печі як об'єкта регулювання, розроблений автором роботи раніше, їх**

## реалізація у формі імітаційних моделей та результати тестування моделей.

Таблиця 1.3 –Результати ідентифікації каналів перетворення координатних дій ОК

Канал ОК	Модель динаміки	
	1-го порядку	2-го порядку
«U <sub>1</sub> – θ <sub>пов</sub> »	$W_0(p) = \frac{1,5 \cdot e^{-9p}}{5p + 1}$	$W_0(p) = \frac{1,5 \cdot e^{-3p}}{(10p + 1)^2}$
«U <sub>2</sub> – φ <sub>пов</sub> »	$W_0(p) = \frac{0,375 \cdot e^{-15,5p}}{18,75p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,375 \cdot e^{-12,5p}}{(21,25p + 1)^2}$
«U <sub>1</sub> – φ <sub>пов</sub> »	$W_0(p) = \frac{0,17 \cdot e^{-23p}}{22,5p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,17 \cdot e^{-14p}}{(30p + 1)^2}$
«U <sub>2</sub> – φ <sub>пов</sub> »	$W_0(p) = \frac{0,375 \cdot e^{-21,5p}}{13,75p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,375 \cdot e^{-15,5p}}{(18,75p + 1)^2}$

Розрахунки параметрів передатніх функцій зроблені в додатках.

### 1.5. Типові структура та алгоритми САК ТП, що реалізують функцію/функції регулювання, розроблені автором роботи раніше, результати їхньої параметричної оптимізації та перевірки на робастність (грубість).

1.5.1. Розробка на основі обраного загального принципу побудови САР, її базової конкретної структури.

Координатна схема процесу випічки хлібу в ротаційній печі на рис. 1.3. Відповідно до неї та до структурної схеми, що відповідає замкненому принципу керування (рис. 1.4.), структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 1.5.

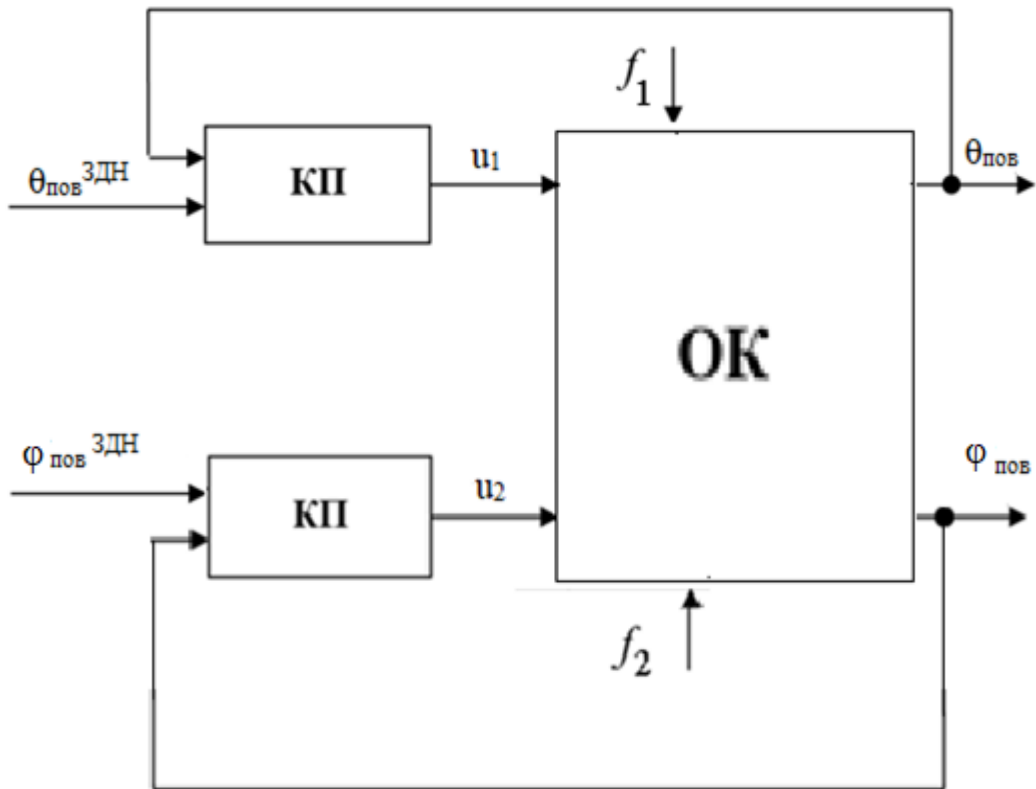


Рис.1.4 – Структурна схема системи керування, що відповідає замкненому принципу керування

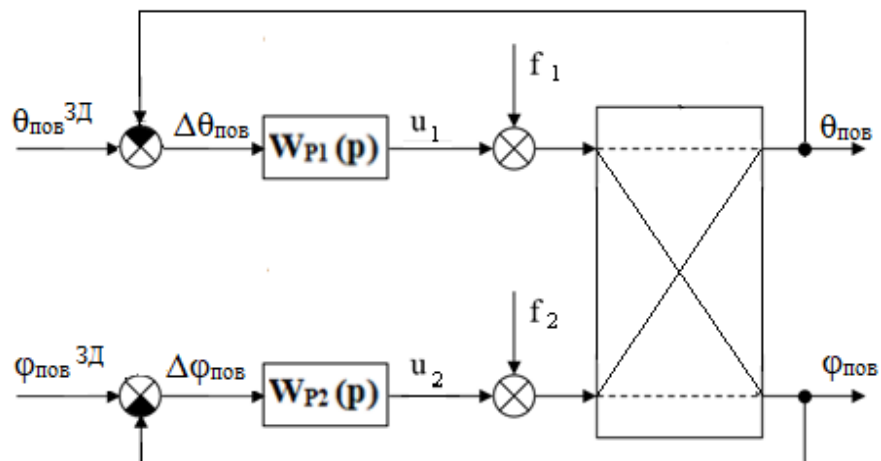


Рис. 1.5– Структурна схема САР в ротацийній пічі

На схемі:

$u_1$  – положення регулюючого органу нагрівача;

$\theta_{пов}$  – температура повітря;

$f_1$  – вектор неконтрольованих збурень в контурі регулювання температури;

$W_{P1}(p)$  – передаточна функція регулятора температури повітря;

$\theta_{\text{пов}}^{\text{ЗД}}$  – задане значення температури;

$\Delta\theta_{\text{пов}}$  – помилка регулювання температури.

$u_2$  – положення регулюючого органу подачі пари;

$\phi_{\text{пов}}$  – вологість середовища;

$f_2$  – вектор неконтрольованих збурень в контурі регулювання вологості ;

$W_{P2}(p)$  – передаточна функція регулятора вологості повітря;

$\phi_{\text{пов}}^{\text{ЗД}}$  – задане значення вологості;

$\Delta\phi_{\text{пов}}$  – помилка регулювання вологості.

1.5.2. Вибір альтернативних варіантів типових алгоритмів регулювання, запис їх рівнянь і передаточних функцій.

Процес випічки хлібу в ротаційній печі за всіма каналами має статичні властивості, тому в якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обираємо пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) алгоритми регулювання.

Рівняння руху ПІД-регулятора:

$$u(t) = K_P \cdot \left( \Delta y(t) + \frac{1}{T_{\text{ИЗ}}} \int_0^t \Delta y(t) dt + T_{\text{нр}} \frac{d\Delta y(t)}{dt} \right) + u_0;$$

Передаточна функція ПІД-регулятора:

$$W_P(p) = K_P \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{ИЗ}} p} + \frac{T_{\text{нр}} p}{0,2 \cdot T_{\text{нр}} p + 1} \right)$$

1.5.3. Параметричний оптимальний синтез САР з альтернативними алгоритмами регулювання для детермінованих (ступінчастих) вхідних діях.

Для оптимального параметричного синтезу САР температури повітря з ПІД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання,

наведену на рисунку 1.6. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора наведені на рисунку 1.7.

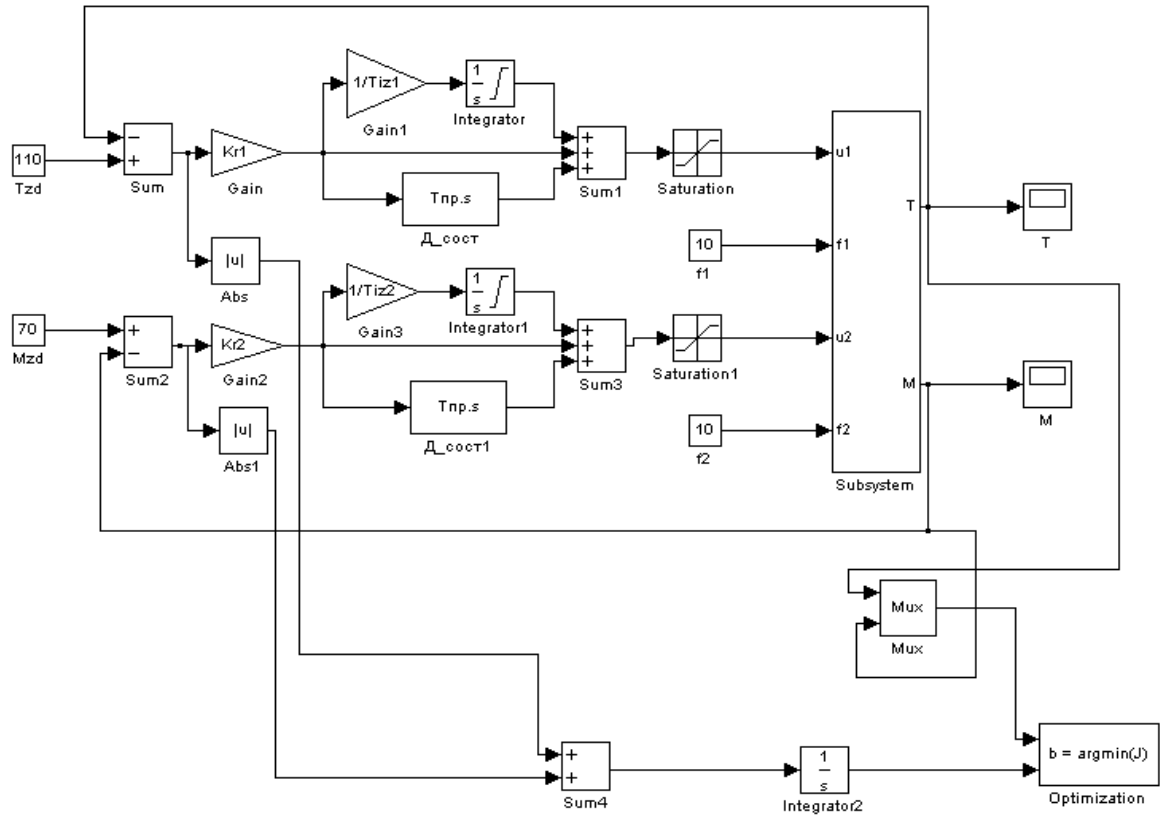


Рис.1.6 - Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

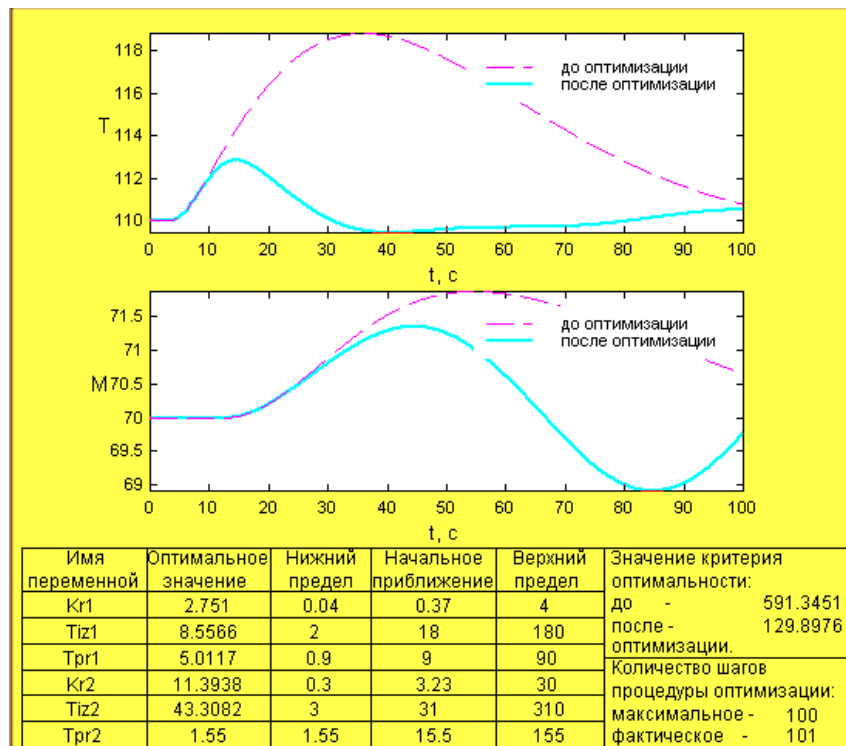


Рис.1.7– Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

#### 1.5.4. Аналіз грубості САР до варіацій параметрів ОК.

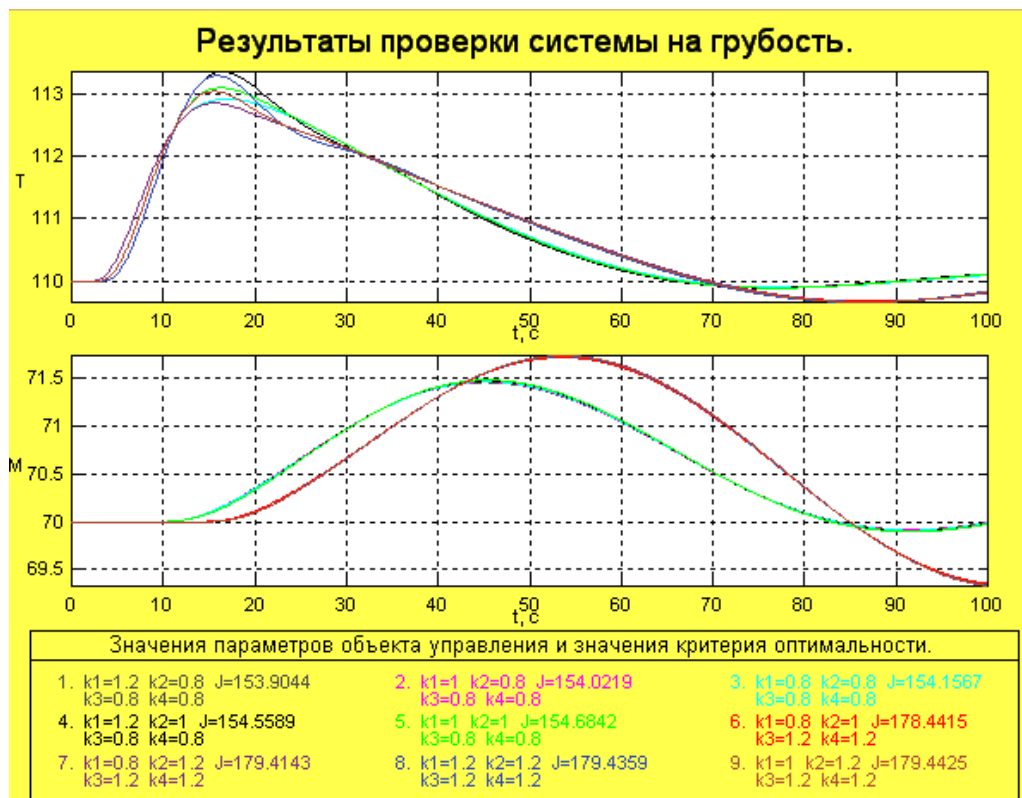


Рис. 1.8 - Аналіз на грубість САР з ПІД-регулятором в умовах дії детермінованих неконтрольованих збурень

### **1.6. Недоліки відомих САК ТП, обґрунтування напрямів удосконалення САК як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу.**

- САК недостатньо точна.
- низька ефективність роботи ОК завжди;
- найбільш несприятлива ситуація априорі невідома, тому гарантувати відсутність події S неможливо навіть з урахуванням прийнятих несприятливих умов.

Для удосконалення САК треба підвищити динамічну точність та зробити додаткову функцію САР.

### **1.7. Висновки по розділу 1. Формулювання мети та завдань дослідження.**

У цьому розділі ми зробили короткий опис ТП випічки хлібу в ротаційній печі та основного обладнання, аналіз впливу режимів ведення ТП та роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз відповідних регламентів та наслідків їх порушень, аналіз існуючих САК цього ТП(математичні моделі процесу як об'єкта управління, функції, структури та алгоритми САК), комплекс математичних моделей цього ТП як об'єкта регулювання, розроблений автором роботи раніше, їх реалізація у формі імітаційних моделей та результати тестування моделей, типові структури та алгоритми САК ТП, що реалізують функцію/функції регулювання, розроблені автором роботи раніше, результати їхньої параметричної оптимізації та перевірки на робастність (грубість).

В кваліфікаційній роботі бакалавра ми з'ясували, що ПД-регулятор ефективніше П-регулятора.

САР з ПД-регулятором в перехідних режимах задовольняє гранично припустимим вимогам. САР базової структури в сталих режимах не виходить за рамки зони незначних відхилень.

Після проведення процедури оптимізації параметрів ПД-регулятора коефіцієнт передачі збільшився на 104%, час ізодрома зменшився на 31%, час

упередження зменшився на 47%, інтегральний критерій зменшився на 45%, максимальне динамічне відхилення збільшилося на 4%, час перехідного процесу зменшився на 42 %.

САР з ПД-регулятором є грубим. Відносна різниця між "найсприятливішими" і "найнесприятливішими" поєднаннями параметрів ОК в САР з ПД-регулятором становить за критерієм 60%, за максимальним динамічним відхиленням - 24%, а за часом перехідного процесу - 17%. За більшістю показників відносна різниця показників якості перехідних процесів при "найсприятливіших" і "найнесприятливіших" для керування параметрах ОК більша для САР з ПД-регулятором.

Як вже було зазначено вище, в результаті параметричної оптимізації параметри регуляторів змінилися наступним чином. Параметри ПД-регулятора: коефіцієнт передачі збільшився на 104%, час ізодрома зменшився на 31%, час упередження зменшився на 47%. В принципі, параметри регуляторів в результаті параметричної оптимізації змінюються досить суттєво, але і налаштування регуляторів, отримані за інженерними методиками, дають нам стійкі перехідні процеси в САР. Тому можна зробити висновок, що інженерні методики розрахунку параметрів регулятора на практиці можуть застосовуватися, хоча існує значний запас підвищення динамічної точності САР.

## РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САР ТП

### **2.1. Специфічні особливості ОР та обґрунтування вибору методів корекції САР для підвищення їх динамічної точності.**

Аналіз особливостей об'єкту регулювання, що знижують динамічну точність і вибір способів її підвищення за рахунок введення в структуру САР додаткових зв'язків, що забезпечують, наприклад, її інваріантність, автономність, компенсацію запізнювання і т. д.

Причиною недостатньої точності САР можуть бути зовнішні умови: дія інтенсивних контрольованих і неконтрольованих збурень, інтенсивна зміна завдання САР, а також внутрішні особливості ОУ і САР (значне співвідношення  $\tau_0 / T_0$ , взаємний вплив каналів в багатовимірної САР). У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є дії перехрестних зв'язків. Основним шляхом підвищення динамічної точності саме розглянутої САР є побудова САР, інваріантної до дії перехрестних зв'язків.

### **2.2. Якщо необхідно доопрацювати математичну модель ОР для вирішення завдання додаткового застосування в САР принципу та підвищення адекватності моделі збурень.**

Розробка на основі обраних способів підвищення динамічної точності САР її структурної схеми і формулювання (в аналітичній формі) умов, що забезпечують необхідні властивості САР

В основу підвищення динамічної точності САР буде покладено принцип двоканальний Петрова, суть якого у введенні додаткових каналів впливу через коригуючий зв'язок. Відповідно до принципу інваріантності Петрова структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 2.1.

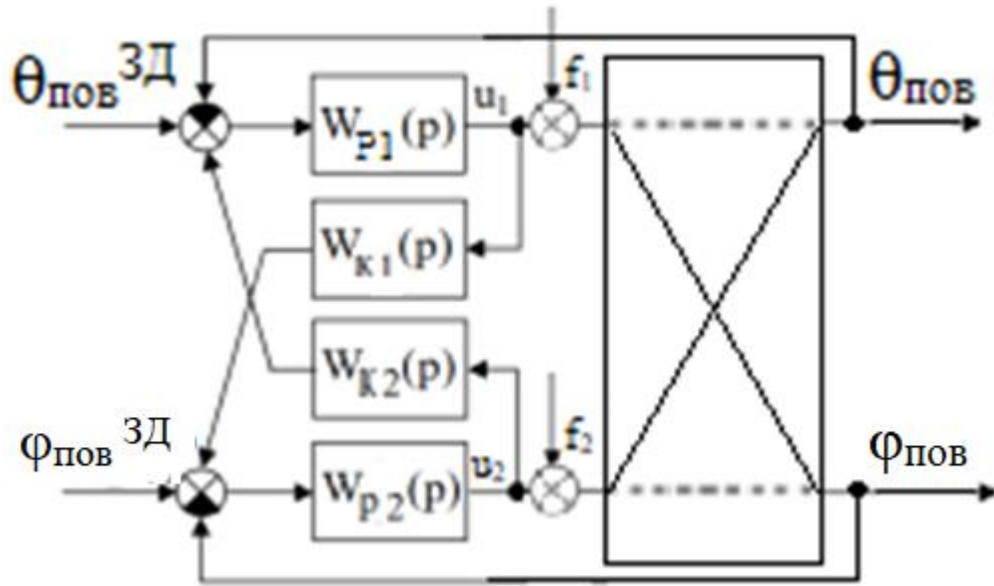


Рис. 2.1 – Структурна схема САР підвищеної динамічної точності

На схемі:

$u_1$  – положення регулюючого органу нагрівача;

$\theta_{\text{пов}}$  – температура повітря;

$f_1$  – вектор неконтрольованих збурень в контурі регулювання температури;

$W_{p1}(p)$  – передаточна функція регулятора температури повітря;

$\theta_{\text{пов}}^{\text{ЗД}}$  – задане значення температури;

$u_2$  – положення регулюючого органу подачі пари;

$\phi_{\text{пов}}$  – вологість середовища;

$f_2$  – вектор неконтрольованих збурень в контурі регулювання вологості;

$W_{p2}(p)$  – передаточна функція регулятора вологості повітря;

$\phi_{\text{пов}}^{\text{ЗД}}$  – задане значення вологості;

$W_{k1}(p)$ ,  $W_{k2}(p)$  – корегуючі зв'язки.

Необхідною умовою реалізації САР є фізична можливість організації додаткових каналів впливу за перехрестними зв'язками, а для розглянутої САР така можливість є. Достатньою умовою реалізації САР є фізична реалізація передаточної функції коригуючих зв'язків.

### 2.3. Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.

2.3.1. Виведення передаточної функції коригуючого зв'язку, аналіз його структури з умов фізичної реалізованості, приведення до фізично реалізованого вигляду, подання у формі з'єднання типових динамічних ланок та отримання перехідної характеристики.

$$y'_{12} + y''_{12} = 0.$$

$$y'_{12} = W_{12}^o(p) \cdot u_1; \quad y''_{12} = W_{12}^k(p) \cdot W_2^p(p) \cdot W_{22}^o(p) \cdot u_1.$$

$$W_{12}^o(p) \cdot u_1 + W_{12}^k(p) \cdot W_2^p(p) \cdot W_{22}^o(p) \cdot u_1 = 0$$

$$W_{12}^k(p) = - \frac{W_{12}^o(p)}{W_{22}^o(p) * W_2^p(p)}$$

$$W_{K1}(p) = - \frac{W_{v_1 - M_{\text{нов}}}^o(p)}{W_{p_2}(p) W_{v_2 - M_{\text{нов}}}^o(p)}$$

$$W_{v_1 - M_{\text{нов}}}^o(p) = \frac{0,17 \cdot e^{-14p}}{(30p + 1)^2}$$

$$W_{v_2 - M_{\text{нов}}}^o(p) = \frac{0,375 \cdot e^{-12,5p}}{(21,25p + 1)^2}$$

$$W_{p_1}(p) = 2,75 \cdot \left(1 + \frac{1}{8,6p} + 5p\right)$$

$$\begin{aligned} W_{K2}(p) &= - \frac{\frac{0,375 \cdot e^{-15,5p}}{(18,75p + 1)^2}}{\frac{1,5 \cdot e^{-3p}}{(10p + 1)^2} \cdot 2,75 \cdot \left(1 + \frac{1}{8,6p} + 5p\right)} = \\ &= - \frac{0,375 \cdot e^{-15,5p} \cdot (100p^2 + 20p + 1)}{1,5 \cdot e^{-3p} \cdot (351,6p^2 + 37,5p + 1) \cdot 2,75 \cdot \left(1 + \frac{1}{8,6p} + 5p\right)} = \\ &= -0,8 \cdot e^{-12,5p} \cdot \frac{100p^2 + 20p + 1}{15903p^4 + 4631,1p^3 + 716,5p^2 + 46,1p + 1} \end{aligned}$$

Отримані передаточні функції коригуючого зв'язку є фізично нереалізовуваними, оскільки містять ланки чистого випередження. Для забезпечення фізичної реалізованості передаточних функцій проведемо заміну ланок чистого випередження форсуючими ланками:

$$e^{-1,5p} = 1 + \frac{1,5p}{0,15p+1}$$

для коригуючого зв'язку  $W_{k1}(p)$

$$e^{-12,5} = 1 + \frac{12,5p}{1,25p+1}$$

для коригуючого зв'язку  $W_{k2}(p)$

Тоді передаточні функції фізично реалізованих коригуючого зв'язків матимуть вигляд:

$$W_{k1}(p) = 1,7 \left( 1 + \frac{1,5p}{0,15p+1} \right) \left( \frac{451,6p^2+42,5p+1}{584,82p^3+416,3p^2+34,5p+1} \right)$$

$$W_{k2}(p) = 0,8 \left( 1 + \frac{12,5p}{1,25p+1} \right) \left( \frac{100p^2+20p+1}{15903p^4+4631,1p^3+716,5p^2+46,1p+1} \right)$$

Структурну схему моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку  $W_{k1}(p)$  наведено на рис. 2.2, а її перехідні характеристики – на рис. 2.3.

Структурну схему моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку  $W_{k2}(p)$  наведено на рис. 2.4, а її перехідні характеристики – на рис. 2.5.

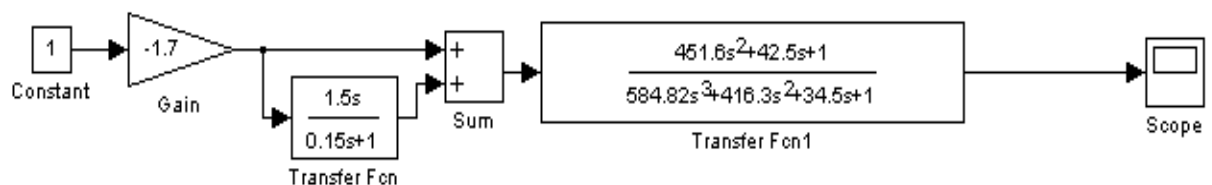


Рис. 2.2 – Структурна схема моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку  $W_{k1}(p)$

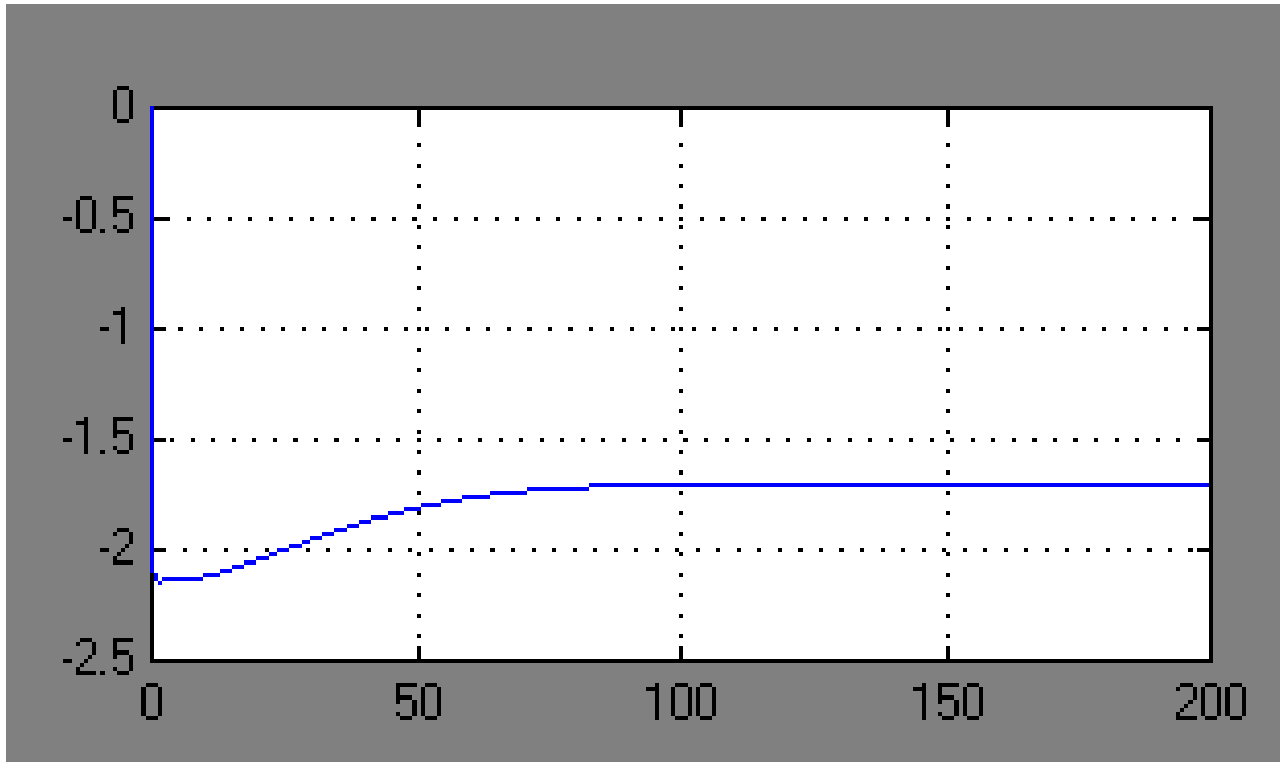


Рис.2.3 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку  $W_{k1}(p)$

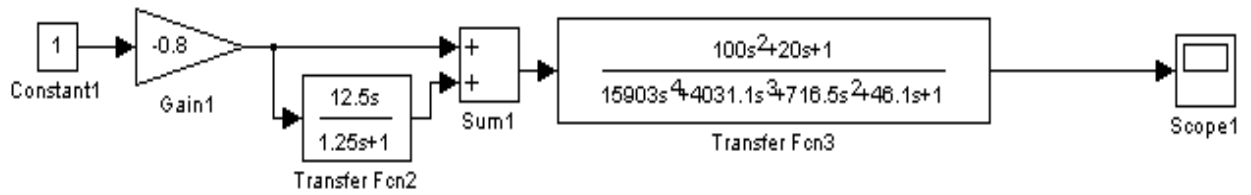


Рис. 2.4 – Структурна схема моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку  $W_{k2}(p)$

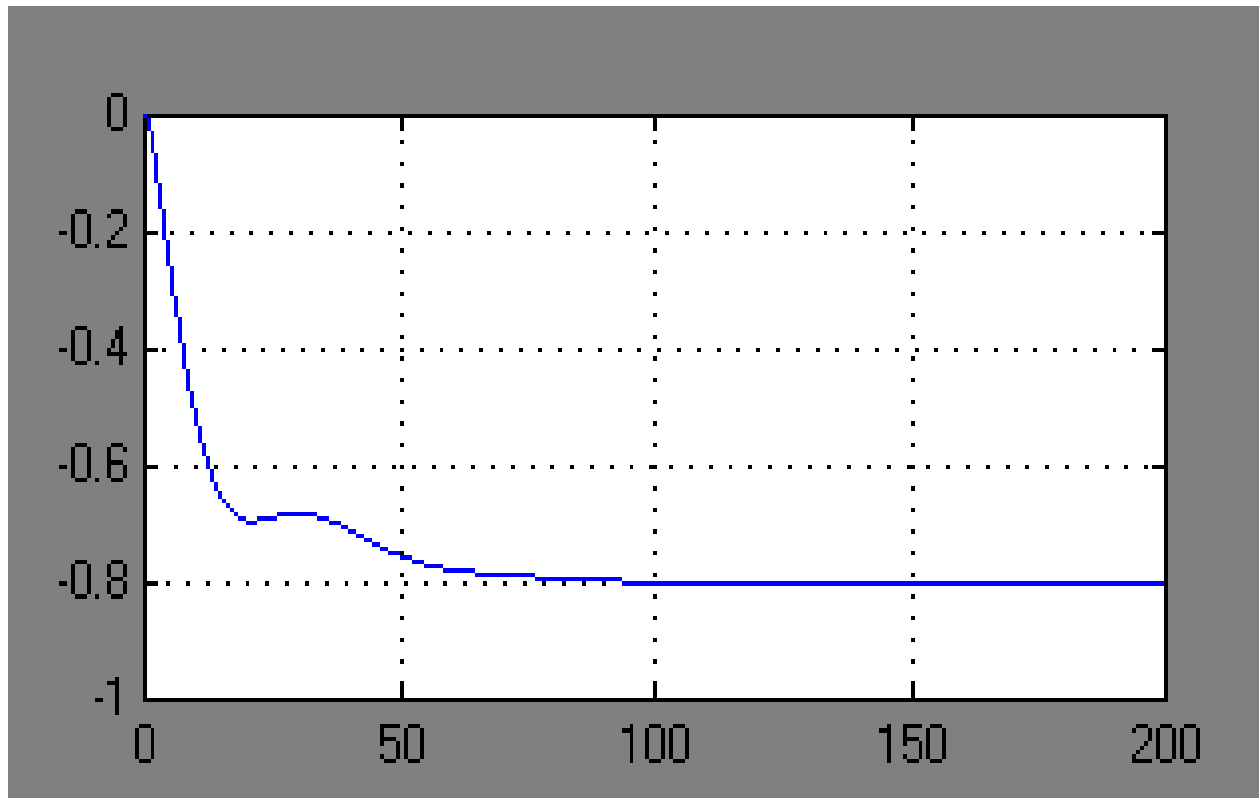


Рис.2.5 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку  $W_{k2}(p)$

2.3.2. Вибір початкових наближень параметрів спрощених коригувальних зв'язків

В якості початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку  $W_{k1}(p)$  прийmemo такі значення параметрів:  $K_K = -1,7$ ;  $T_{K1} = 1,5$ ;  $T_{K2} = 42,5$ ;  $T_{K3} = 34,5$ . Для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку скористаємося схемою моделювання, наведеної на рис. 2.6.

Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку наведені на рис. 2.7, а результати моделювання – на рис. 2.8.

В якості початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку  $W_{k2}(p)$  прийmemo такі значення параметрів:  $K_K = -0,8$ ;  $T_{K1} = 12,5$ ;  $T_{K2} = 20$ ;  $T_{K3} = 46,1$ . Для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку скористаємося схемою моделювання, наведеної на рис. 2.9.

Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку наведені на рис. 2.10, а результати моделювання – на рис. 2.11.

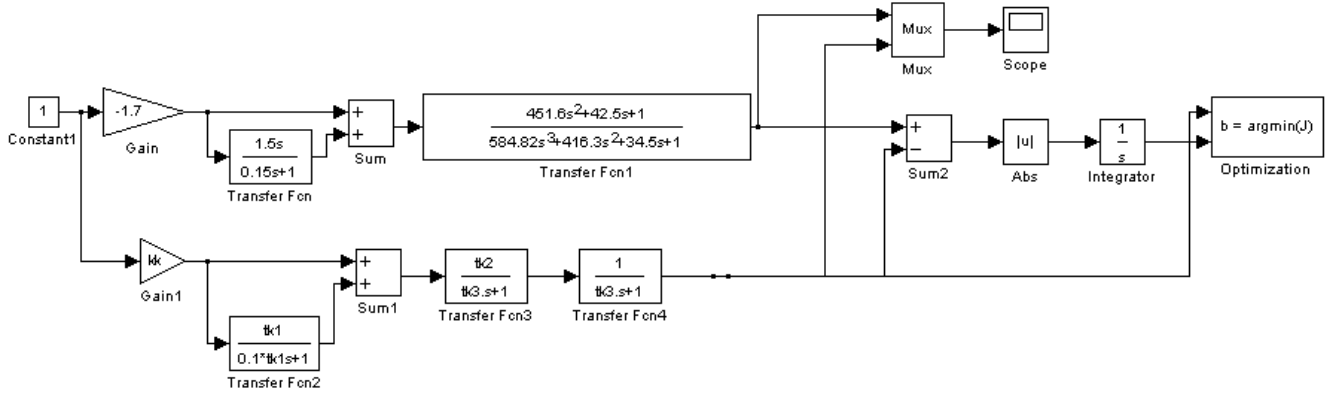


Рис. 2.6 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку  $W_{k1}(p)$

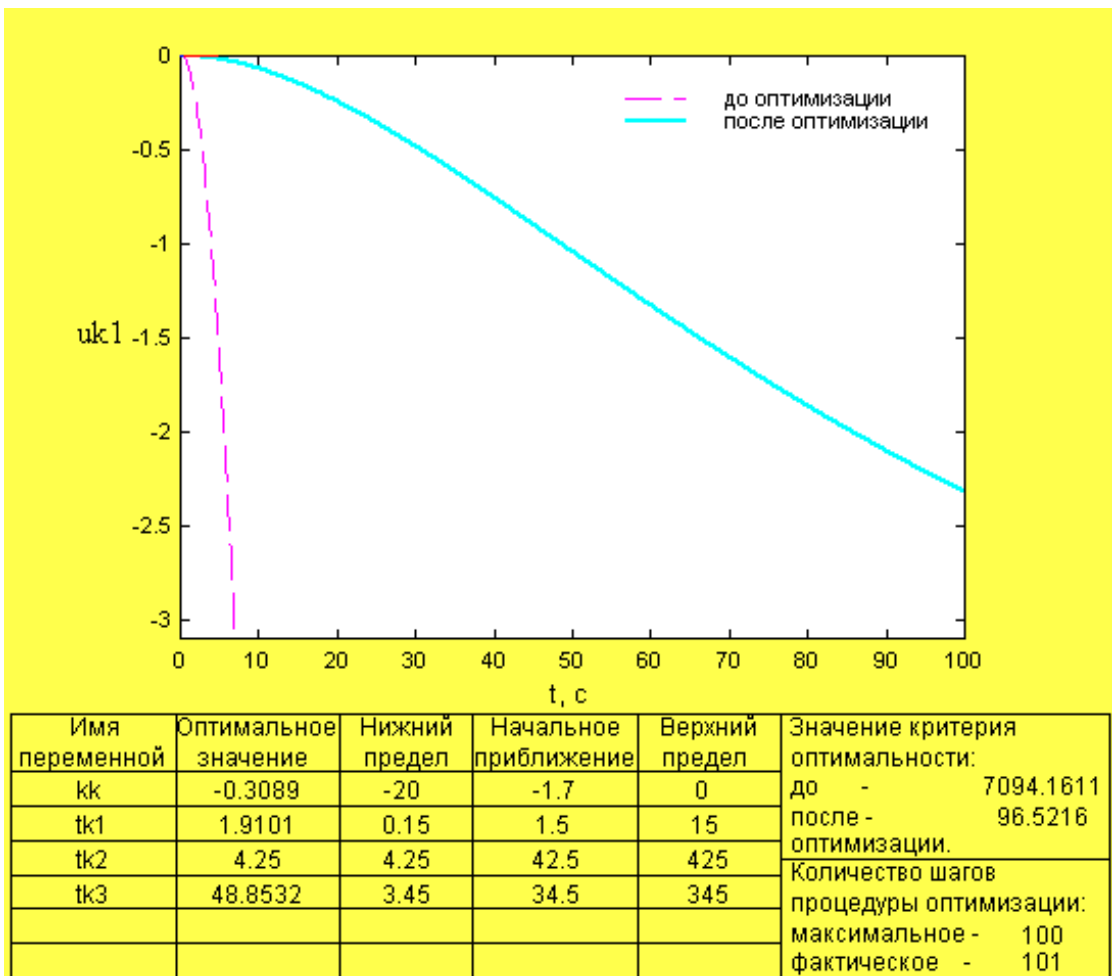


Рис. 2.7 – Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку  $W_{k1}(p)$

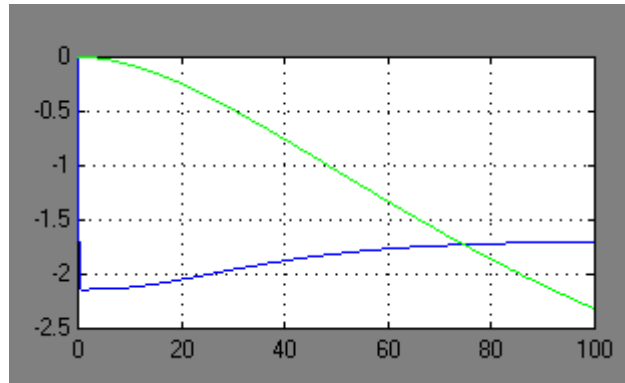


Рис. 2.8 – Перехідні характеристики розрахункового та спрощеного коригуючого зв’язку  $W_{k1}(p)$

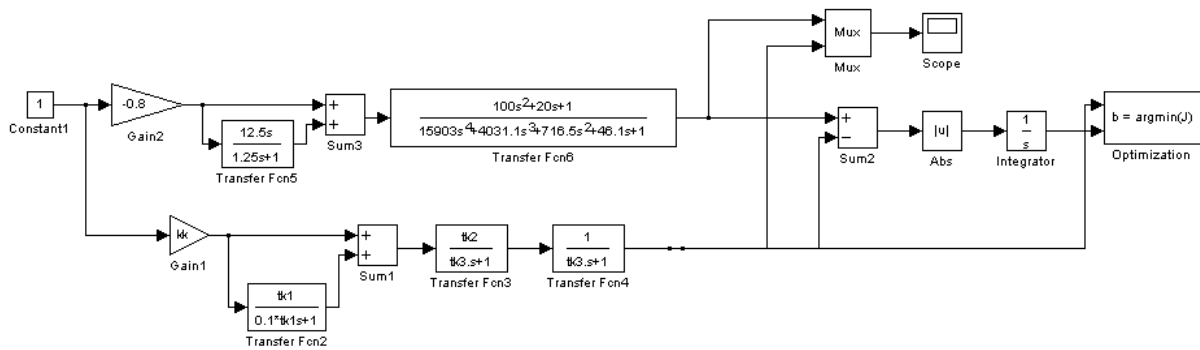


Рис. 2.9 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв’язку  $W_{k2}(p)$

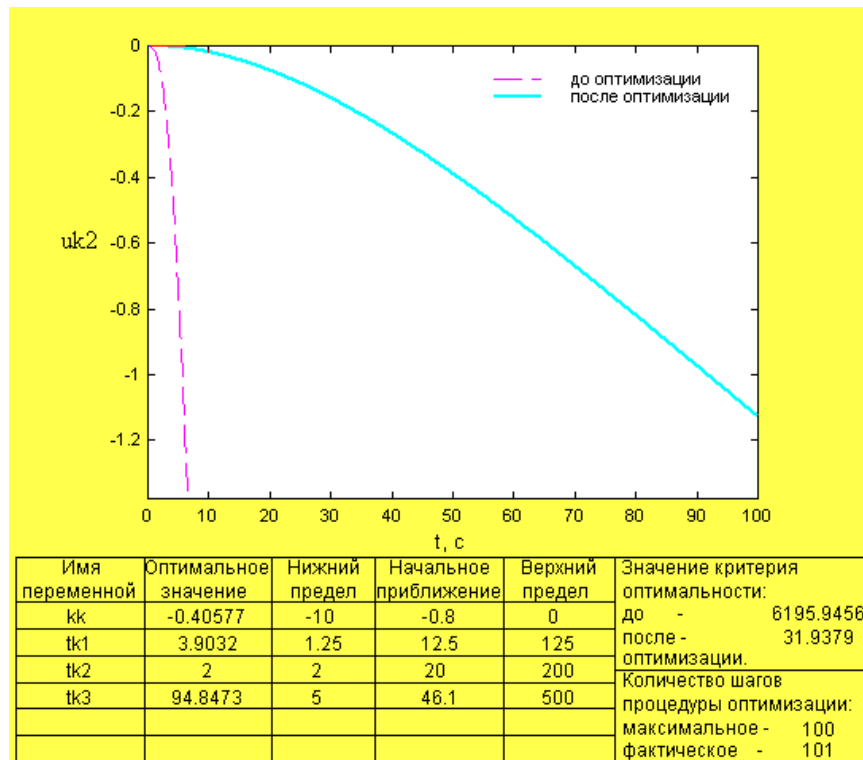


Рис. 2.10 – Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв’язку  $W_{k2}(p)$

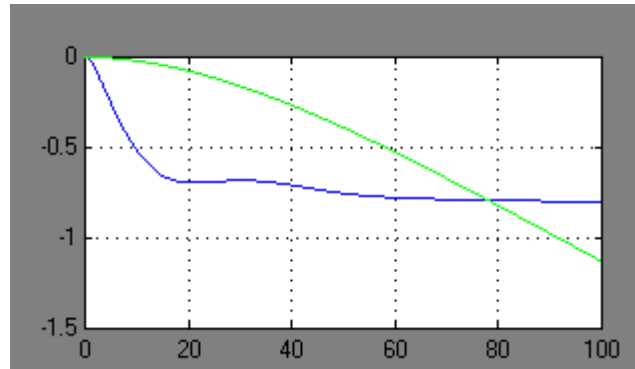


Рис. 2.11 – Перехідні характеристики розрахункового та спрощеного коригуючого зв'язку  $W_k(p)$

## 2.4. Оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності та аналіз результатів синтезу.

2.4.1. Розробка структурної схеми цифрового імітаційного моделювання і параметричний оптимальний синтез САР підвищеної динамічної точності для детермінованих (ступінчастих) вхідних дій.

Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку приведена на рис. 2.12, а результати оптимізації - на рис. 2.13, 2.14.

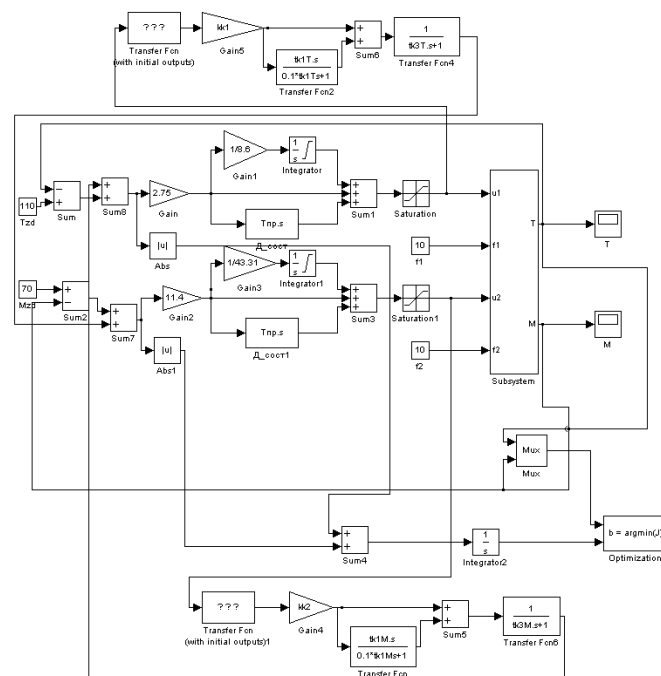
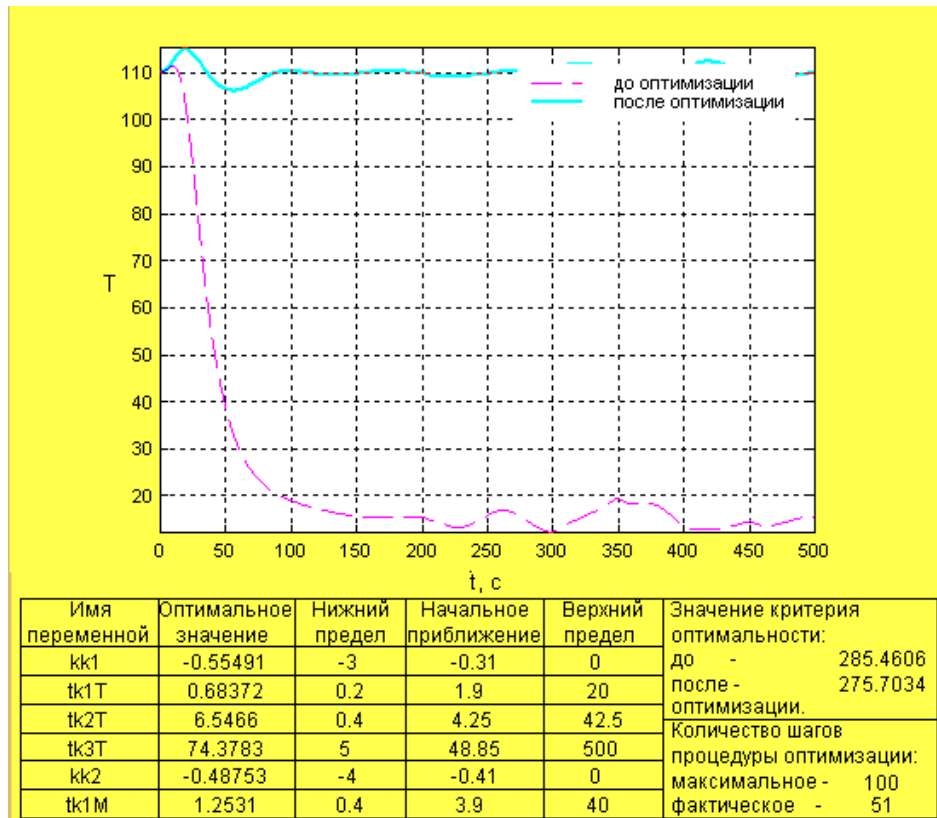
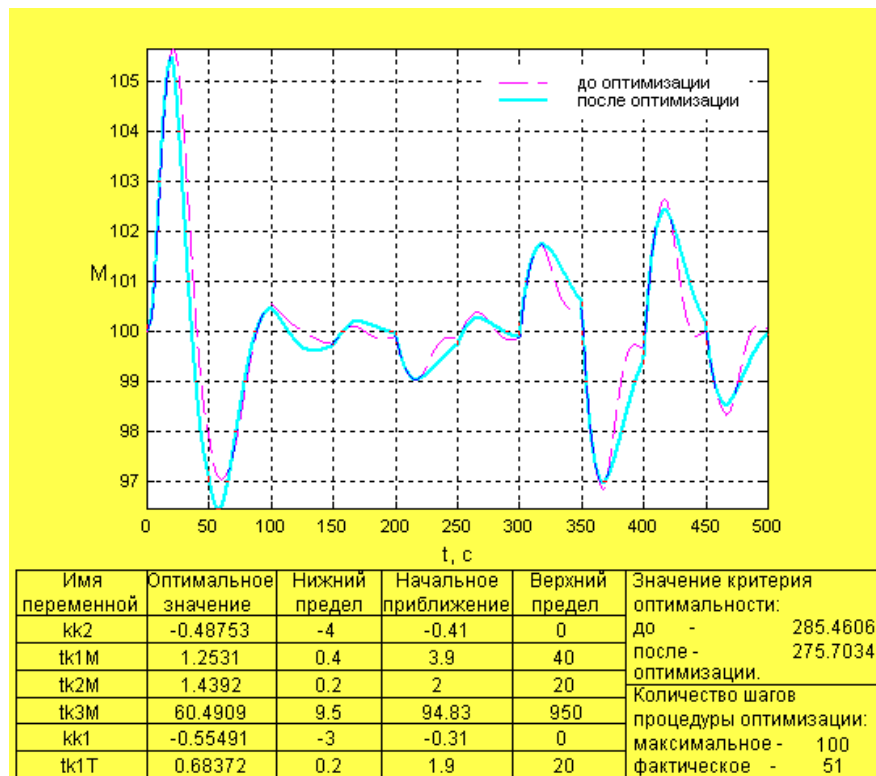


Рис. 2.12 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку

Рис. 2.13 – Результати оптимізації параметрів коригуючого зв'язку  $W_{k1}(p)$ Рис. 2.14 – Результати оптимізації параметрів коригуючого зв'язку  $W_{k2}(p)$ 

2.4.2. Аналіз грубості САР підвищеної динамічної точності до варіацій параметрів об'єкту регулювання

2.4.2.1. Порівняльний аналіз перехідних процесів за критерієм оптимальності і показникам, для яких встановлено гранично-припустимі значення.

Як і в випадку з САР базової структури, САР підвищеної динамічної точності до сліджуємо на грубість в умовах варіації параметрів ОК, а саме, часу запізнення в каналах ОК  $\pm 20\%$ . Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК наведено на рис. 2.15. Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОК САР дає перехідні процеси, що сходяться, а значить, САР є грубою.

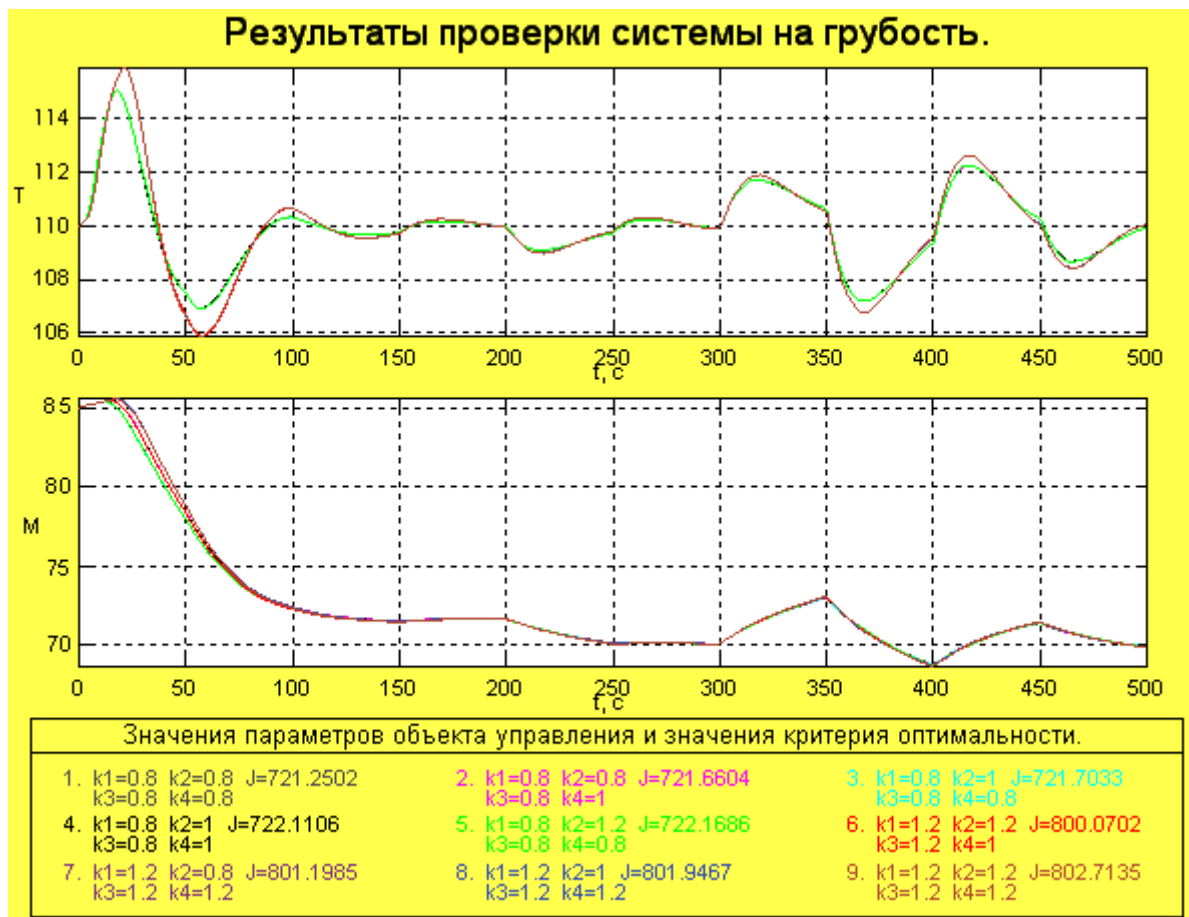


Рис. 2.15 – Аналіз САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК

2.4.2.2. Вибір з розглянутих сполучень параметрів ОР найбільше «несприятливих» і «сприятливих» для керування.

Як видно з результатів оцінки САР на грубість, найбільш "сприятливим"

для керування є номінальний час запізнення за каналом керування, і запізнення, менше на 20% за каналом контрольованого збурення. Найбільш "несприятливим" для керування є поєднання параметрів ОК, що відповідає часу запізнення по обох каналах, на 20% більшому їх номінальних значень. Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для порівняння варіантів з номінальними параметрами, а також з параметрами ОК, "сприятливими" і "несприятливими" для керування наведена на рис. 2.16. Результати порівняння варіантів САР в КР температури наведені на рис. 2.17, а в КР вологості - на рис. 2.18. Як видно з результатів аналізу САР на grubість, САР підвищеної динамічної точності є грубою, тому що при будь-яких поєднаннях параметрів ОУ дає перехідні процеси, що сходяться і які, до того ж, не виходять за рамки зони незначних відхилень.

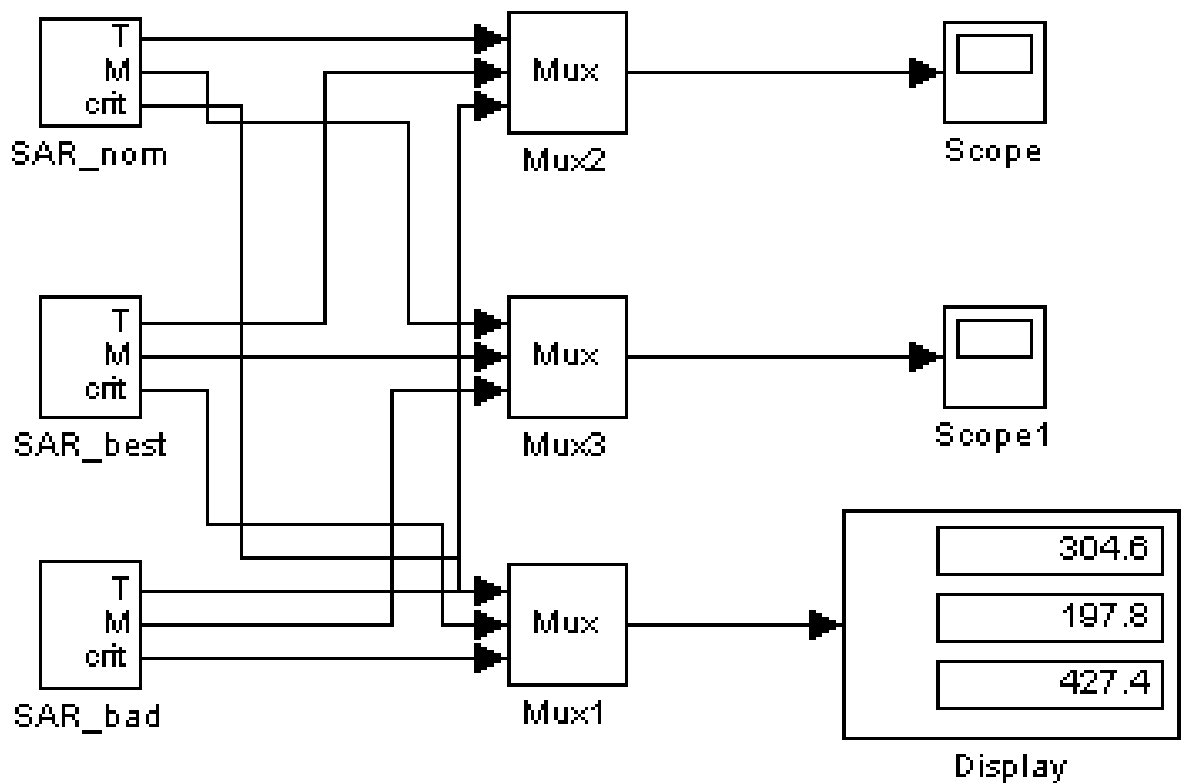


Рис. 2.16 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для порівняння варіантів з номінальними, "найсприятливішими" та "найнесприятливішими" для керування параметрами ОК

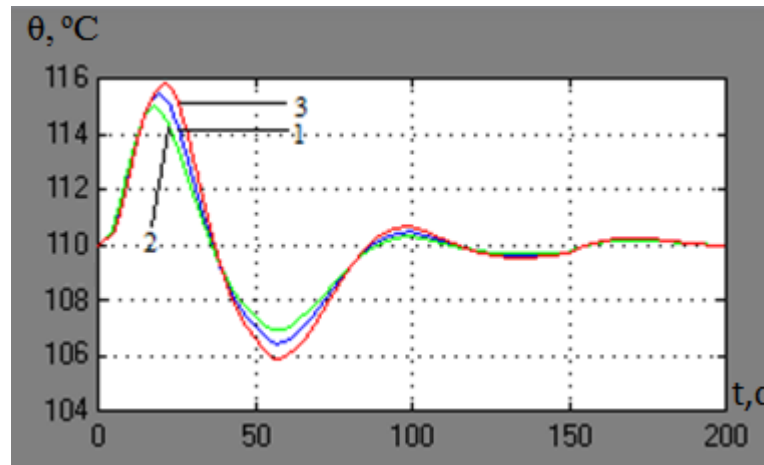


Рис. 2.17 – Результати порівняння варіантів САР підвищеної динамічної точності: 1 – при номінальних параметрах ОК; 2 – при «найсприятливіших» для керування параметрах ОК; 3 – при «найнесприятливіших» для керування параметрах ОК в КР температури

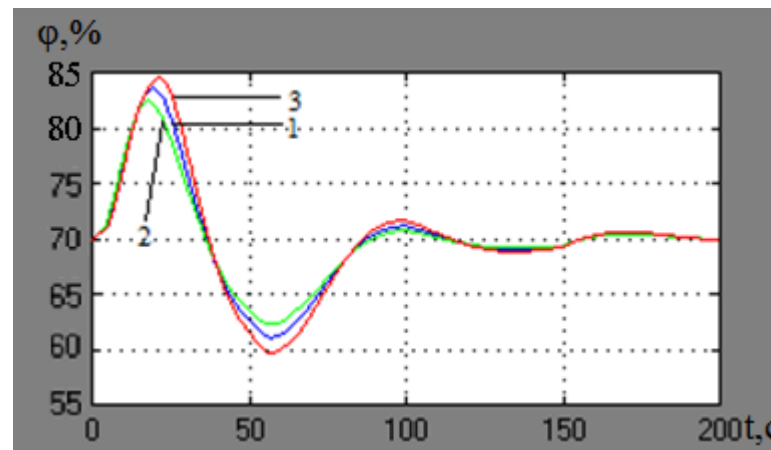


Рис. 2.18 – Результати порівняння варіантів САР підвищеної динамічної точності: 1 – при номінальних параметрах ОК; 2 – при «найсприятливіших» для керування параметрах ОК; 3 – при «найнесприятливіших» для керування параметрах ОК в КР вологості

2.4.2.3. Порівняльний аналіз перехідних процесів у параметрично оптимальних САР. Для порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності розроблено структурну схему моделювання, наведену на рис. 2.23. В якості САР базової структури розглядається САР з ПДрегуляторами (рис. 2.24). Структурна схема моделювання САР підвищеної динамічної точності на рис. 2.25. Результати порівняння в КР температури наведені на рис. 2.26, а результати порівняння в КР вологості на рис. 2.27.

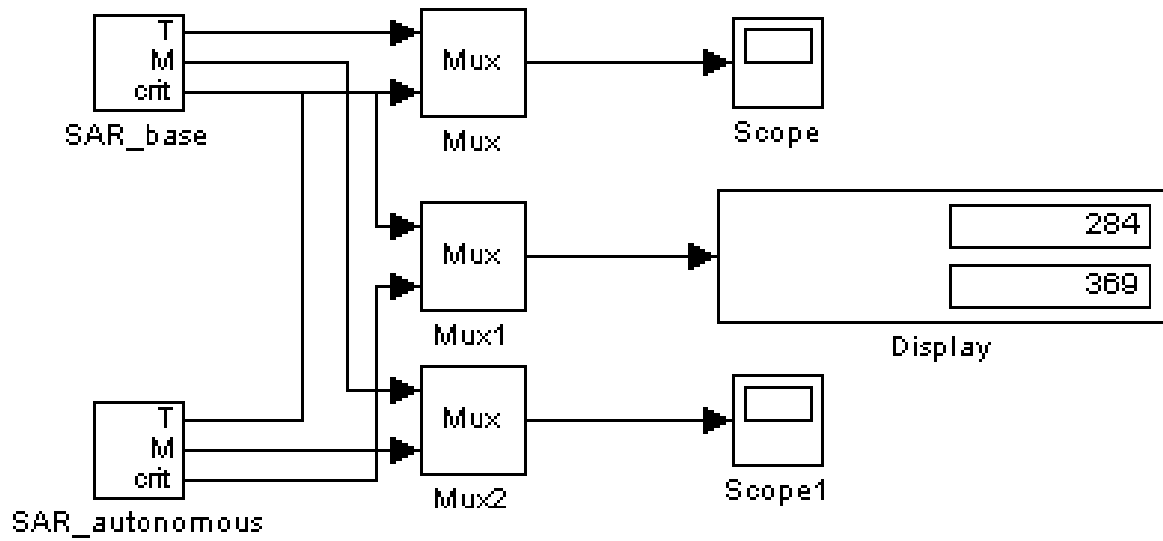


Рис. 2.23 – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

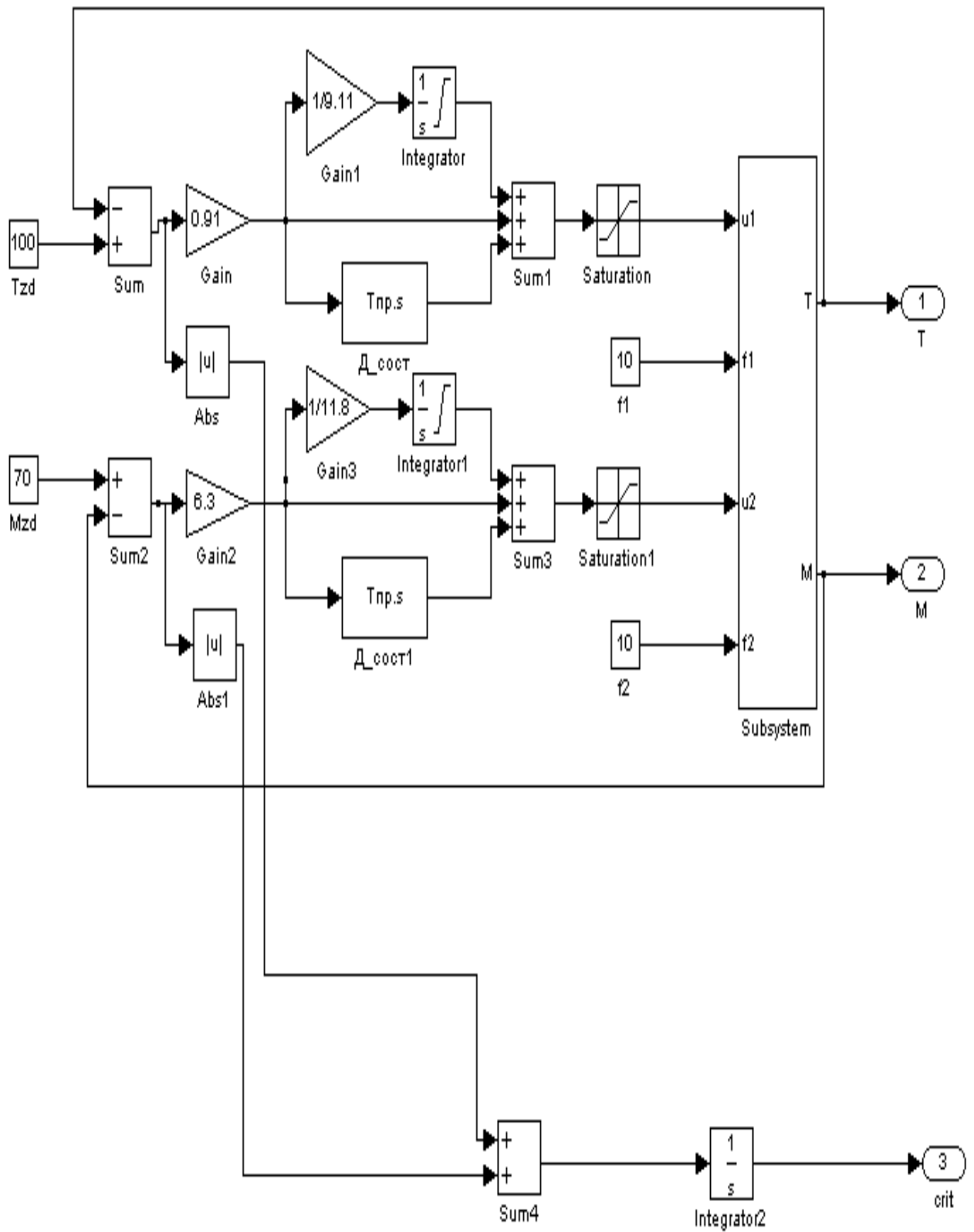


Рис. 2.24 – Структурна схема моделювання САР базової структури

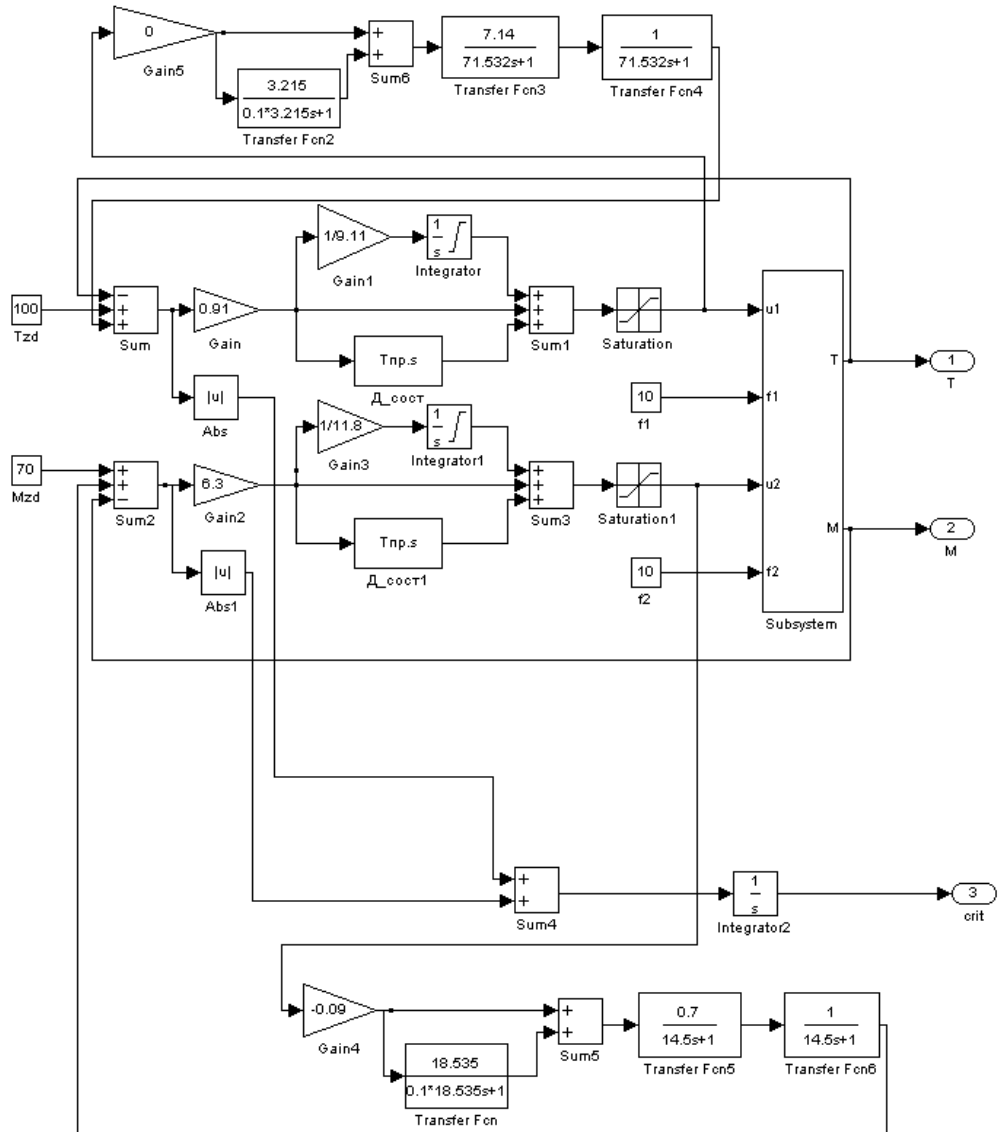


Рис. 2.25 – Структурна схема моделювання САР підвищеної динамічної точності

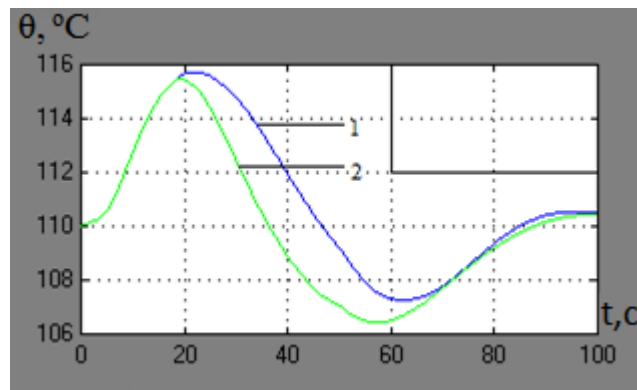


Рис. 2.26 – Результати порівняння якості роботи САР базової структури (1) і САР підвищеної динамічної точності (2) в КР температури

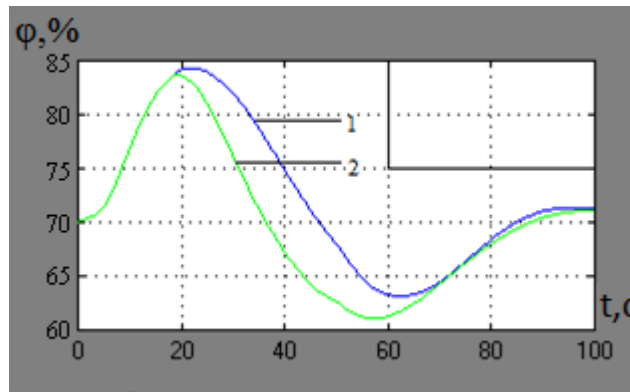


Рис. 2.27 – Результати порівняння якості роботи САР базової структури (1) і САР підвищеної динамічної точності (2) в КР вологості

### 2.5. Висновки за розділом.

В цьому розділі ми виконували розробку та параметричну оптимізацію алгоритмів регулювання, порівняльний аналіз САР, отримання цифрових аналогів обраних алгоритмів.

В результаті виконання даного розділу була розроблена САР підвищеної динамічної точності. В результаті синтезу САР підвищеної динамічної точності ми отримали систему, показники якості якої, з більш високою динамічною точністю в порівнянні з САР найпростішої структури, а головне більш грубу. Це означає підвищення працездатності і надійності системи. Як вже було вище сказано, більш грубою виявилася САР підвищеної динамічної точності в силу введення в САР коригуючого зв'язку. Введення коригуючого зв'язку в контурах регулювання, сприяє значному підвищенню динамічної точності і система стає більш працездатною і стійкою до різних змін параметрів ОУ для КР температури, а для КР вологості-навпаки. Таким чином, доцільніше використовувати отриману систему підвищеної динамічної точності для КР температури, а для КР вологості-базову САР. При роботі САР зі стохастичними впливами я переконався, що реакція системи на збурення залишилася практично колишньою, але в деяких випадках вплив зменшився. В КР температури середньоквадратичне відхилення не змінилось, а в КР вологості-збільшилось. В КР температури середньоквадратичний період зменшився, а в КР вологості-збільшився.

### РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

#### **3.1. Обґрунтування актуальності застосування систем управління, побудованих на базі апарату нечіткої логіки, для розглянутого об'єкта керування**

До останнього десятиліття ХХ-го століття в побудові регуляторів домінував традиційний підхід. Однак регулятори, побудовані на основі зазначеного підходу, не завжди дозволяють здійснювати робастне керування складними нестаціонарними об'єктами. Дана обставина дала поштовх розвитку нового наукового напрямку – інтелектуальних систем керування. *В основу концепції інтелектуальності покладене вміння працювати з формалізованими знаннями людини (експертні системи, нечітка логіка), або властиві людині навчання і мислення (штучні нейронні мережі і генетичні алгоритми). Нечітке керування (керування на основі методів теорії нечітких множин) використовується при недостатньому знанні об'єкта керування, але наявності досвіду керування їм, також нечітке керування використовується у нелінійних системах, ідентифікація яких занадто трудомістка, а також у випадках, коли за умовою завдання необхідно використовувати знання експерта. Прикладом може бути доменна піч або ректифікаційна колона, математична модель яких містить багато емпіричних коефіцієнтів, що змінюються в широкому діапазоні. У той же час кваліфікований оператор досить добре управляє такими об'єктами, користуючись показаннями приладів і накопиченим досвідом.*

Виходячи з вищесказаного актуальність використання нечіткої логіки у рамках синтезу систем автоматичного управління розглянутим об'єктом - стрічковою конвективною сушаркою цілеспрямовано якщо канал регулювання буде характеризуватись нелінійною характеристикою або параметричною невизначеністю в діапазоні регулювання. Це є особливою

проблемою в сфері автоматизації коли необхідно управляти об'єктами, функції яких описуються нелінійними залежностями. При проектуванні систем управління для нелінійних об'єктів зазвичай використовуються такі методи як лінійна апроксимація або кусочно-лінійна апроксимація. Однак застосування цих методів у реальних технічних пристроях не завжди дозволяє досягнути бажаного ефекту. У цьому випадку для забезпечення збільшення ефективності можна використовувати систему управління з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

Таким чином, в умовах наявності істотних невизначеностей у статичних і динамічних характеристиках стрічковій конвективній сушарки як об'єкта управління представляються труднощі в формалізації завдань синтезу регуляторів системи управління. У зв'язку з цим доцільним (актуальним) є застосування регуляторів, заснованих на нечіткій логіці.

### **3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделі каналу регулювання який характеризується нелінійною статичною характеристикою**

Для підтвердження актуальності застосування системи управління, побудованої на базі апарата нечіткої логіки, для розглянутого у даній роботі об'єкта управління, необхідно перейти до його нелінійної моделі. Таким чином, модель каналу регулювання розглянутого об'єкта управління повинна характеризуватися несуттєво нелінійною статичною характеристикою. Для представлення нелінійної моделі об'єкта управління необхідно до відповідної моделі каналу регулювання додати відповідну нелінійну ланку. Таким чином, нелінійність необхідно реалізувати за допомогою включення блоку Look up Table у відповідну модель каналу регулювання. Структурна схема повної моделі об'єкта управління з додатковим блоком Look up Table, що визначає нелінійність статичної характеристики, представлена на рисунку 3.1.

На рисунку 3.1 відображено повну модель об'єкту управління, яка є більш розширеною моделлю, розробка якої представлена в розділі 2 роботи. У блоці Look up Table у табличній формі задається нелінійний зв'язок (залежність) між вхідними змінними, який тягне «викривлення» статичної характеристики моделі каналу регулювання.

В остаточному підсумку в результаті моделювання була отримана статична характеристика моделі каналу регулювання « $u_1 - \varphi$ », яка має вигляд, представлений на рисунку 3.2.

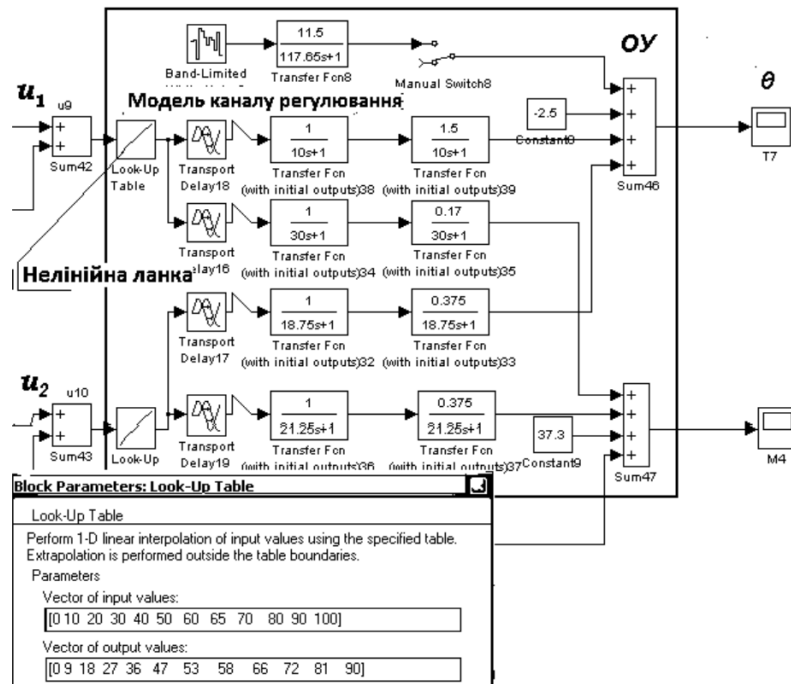


Рисунок 3.1 - Структурна схема моделі об'єкту управління, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

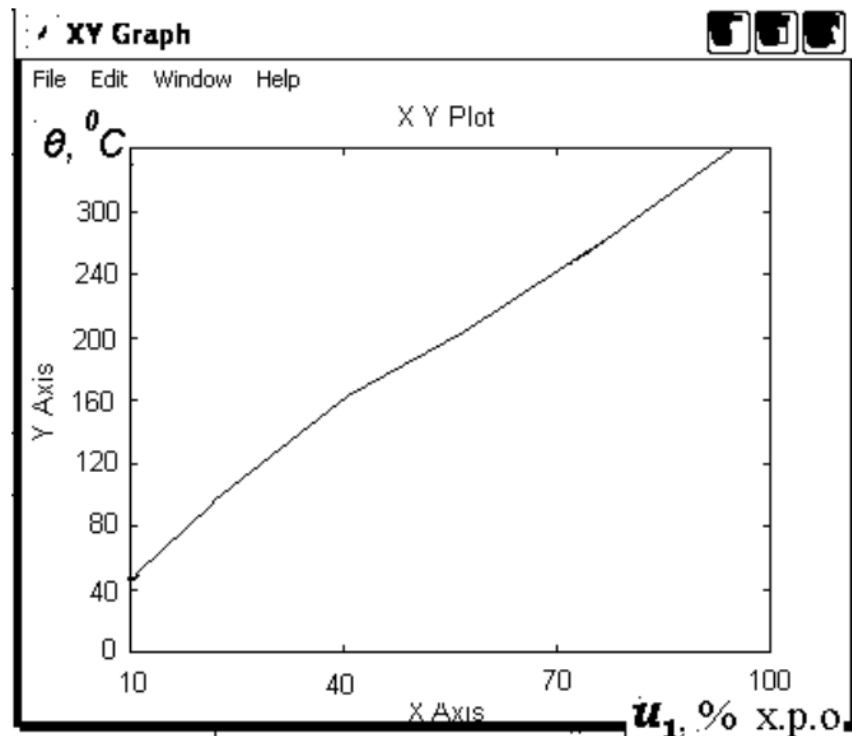


Рисунок 3.2 - Нелінійна статична характеристика моделі каналу регулювання

З рисунку 3.2 видно, що статична характеристика несуттєво нелінійна, це дає можливість виконати синтез САУ з традиційними ПД регуляторами і одержати необхідні показники якості регулювання.

### **3.3 Параметричний синтез САУ з традиційним ПД регулятором для об'єкта який характеризується нелінійною характеристикою за каналом регулювання**

У даній роботі був виконаний параметричний синтез САУ з традиційним – лінійним ПД регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання. Слід зазначити, що нелінійність статичної характеристики була реалізована в моделі, «гладкої» і несуттєвої для одержання стійких перехідних процесів при застосуванні традиційних – лінійних (П, ПІ, ПІД) регуляторів.

Параметри настроювання регуляторів були визначені на основі статичних і динамічних параметрів об'єкта управління в рамках лінійної моделі.

Для реалізації параметричної оптимізації регулятора системи управління в програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була розроблена схема моделювання системи управління з автоматичним оптимізатором, що забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів при мінімізації за наступним квадратичним та модульним критеріями якості: роботи системи

$e_i(t)$  – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням вологості повітря.

Розроблена схема моделювання системи управління з автоматичним оптимізатором у середовищі MATLAB\Simulink 5.2 представлена на рисунку 3.3.

У результаті параметричної оптимізації за обраним інтегральним показником якості роботи системи та за допомогою відповідного модуля – додатка MATLAB\Simulink 5.2 були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації і відповідні параметри настроювання регуляторів.

Початкові параметри настройки регуляторів були визначені наступним чином за відповідними формулами з урахуванням нелінійної характеристики каналу регулювання:

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів вологість повітря  $\varphi$  повинна підтримуватися на рівні 70 % з точністю -0,5 %. За цим параметром допустимі короточасні відхилення до - 4 % протягом часу не більше 40 с. Всі ці дані відповідають перехідній характеристиці представленої після оптимізації.

Відповідні початкові параметри оптимізації були введені у відповідному вікні за стандартними умовами (рисунок 3.4). Це 100 кроків оптимізації, достатньо великий діапазон пошуку значень оптимізуючи

параметрів більш чім на 50%. Параметри канали регулювання були визначені такими як у лінійній моделі отриманою в результаті відповідної ідентифікації.

Необхідно зазначити що оптимізацію проводили поетапно з урахуванням не лінійності характеристики каналу регулювання як за квадратичним так і за модульним інтегральним критерієм якості роботи системи. Але остаточні значення були отримані при тих же умовах що бали при оптимізації відповідної попередньої лінійної системи. На рисунку 3.5 представлена вікно результату оптимізації за модульним критерієм на 40 кроків. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання, за вологістю продукту на виході сушарки, помітно покращилася після оптимізації САУ. Однак слід зазначити, що при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можуть мати місце лише при відповідних режимах роботи чи початкових умовах системи управління. Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальні в іншому випадку, це визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів. Остаточні результати були отримані при оптимізації за квадратичним інтегральним критерієм якості роботи системи на 100 кроків. Оптимізація була закінчена на 85 кроці оптимізації при визначених оптимальних параметрах настройки ПІД-регулятора.



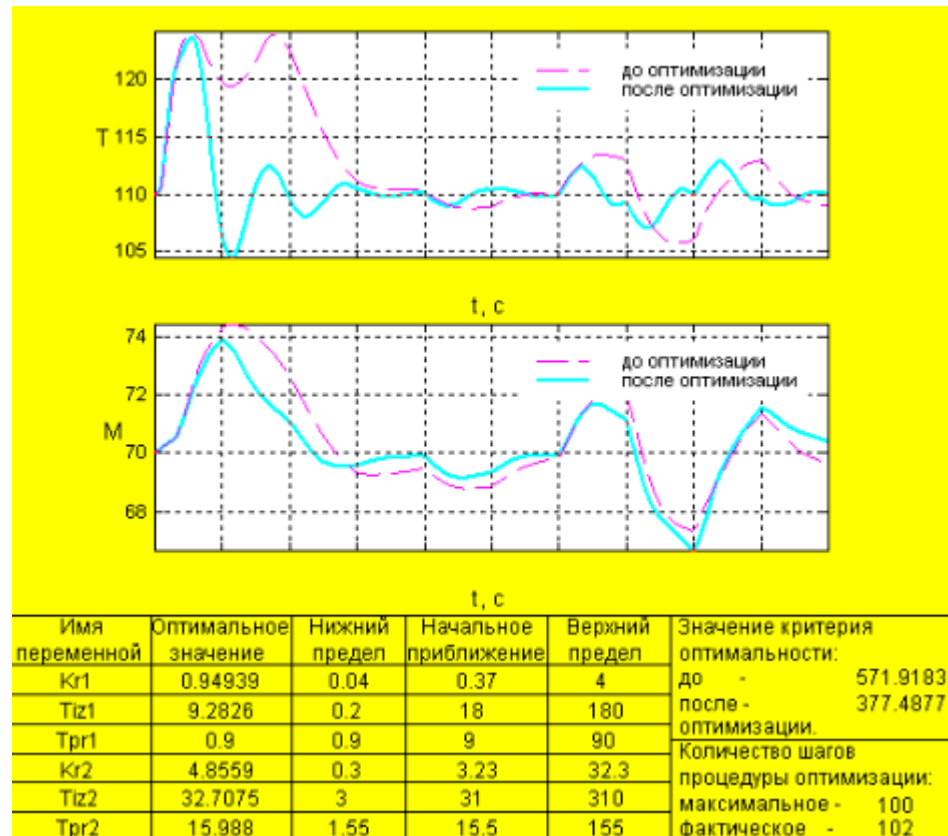


Рисунок 3.4 - Вікно результату оптимізації САР з традиційним ПД регулятором та нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

### 3.4 Розробка моделі САУ з нечітким регулятором (НР) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання

Нечітка логіка в ПД-регуляторах використовується переважно двома шляхами: для побудови самого регулятора і для організації підстроювання коефіцієнтів ПД-регулятора. Оба шляхи можуть використовуватися в ПД-контролері одночасно. В нашому випадку нечітка логіка використовується для побудови самого регулятора за відомими схемами. Складність опису статичних режимів роботи об'єкта приводить до того, що режими функціонування можуть бути описані з недостатньою точністю, пов'язаною з нечіткими (розмитими) різними експериментальними даними. Таким чином, у справжній роботі була реалізована модель САР із Fuzzy – нечітким регулятором.

В 1974 році Мамдани [Mamdani] показав можливість застосування ідей нечіткої логіки для побудови системи керування динамічним об'єктом, а роком пізніше вийшла публікація [Mamdani], у якій був описан нечіткий ПІ-регулятор і його застосування для керування парогенератором. З того часу область застосування нечітких регуляторів постійно розширюється, збільшується різноманітність їх структур і виконавчих функцій.

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фазиуправління: фазифікація, логічного висновку і дефазифікація. Спрощена структурна схема розробляємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.5. З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками.

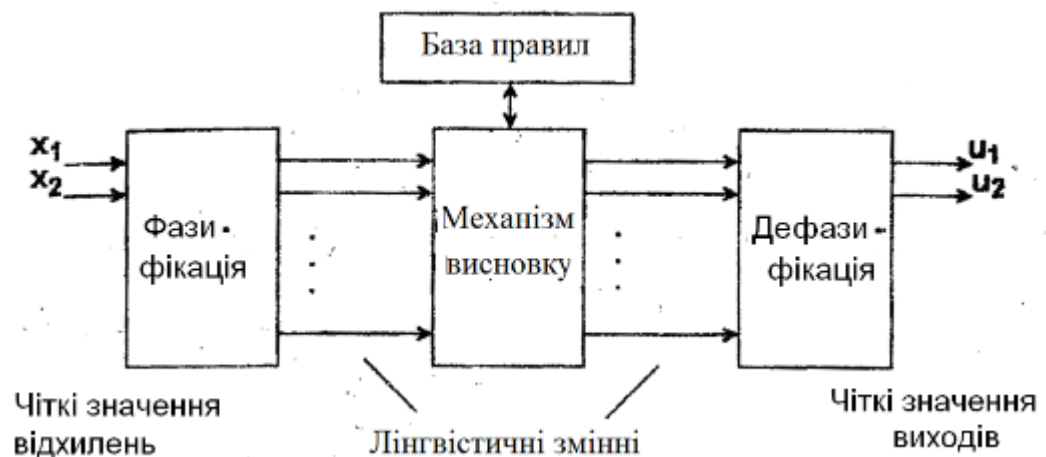


Рисунок 3.5 - Спрощена структурна схема нечіткого регулятора

Всі визначені блоки (фазифікація, блок логічного розв'язку, дефазифікація), що представлені на рисунку 3.10, редагуються у відповідному редакторі FIS Editor середовища MATLAB. Для запуску вікна fis-редактора в командному вікні MATLAB Window commander було прописано команду «Fuzzy». Після чого було вибрано алгоритм Sugeno та дві вхідні і дві вихідні змінні.

На рисунку 3.6 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора продукту на виході сушарки з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

До теперішнього часу запропоновано кілька алгоритмів нечіткого висновку (алгоритм Мамдані, Цукамото, Ларсена, Сугено та ін.). У даній роботі представляється алгоритм Сугено 0-порядку, так як він являється найпростішим алгоритмом нечіткого виводу.

Формально алгоритм Сугено, запропонований Сугено та Такагі, може бути визначений таким чином.

У базі правил використовуються тільки правила нечітких продукцій в формі:

де  $x_1, x_2$  - вхідні змінні,  $a_1, a_2$  - чисельні значення вхідних параметрів,  $f$  - довільна чітка функція.

Згідно з алгоритмом вихідні правила мають функції: та . Таким чином, результат дефазифкації обчислюється наступним чином:

Якщо як опція  $f$  використовується поліном , то говорять про *алгоритм Сугено 0-порядку*. Тоді правила будуть мати наступний вигляд:

де  $a_1, a_2$  звичайні (чіткі) числа.

Далі алгоритм виконується за наступними етапами:

1. Фазифікація вхідних змінних. На цьому етапі всім відомим конкретним значенням вхідних змінних системи нечіткого виведення ставиться у відповідність нечітку множину, тобто множина значень .

2. Агрегування передумови в нечітких правилах продукцій. Для знаходження ступеня істинності умов всіх правил нечітких продукцій, як правило, використовується логічна операція *min-кон'юнкції*. Ті правила,

ступінь істинності умов яких відмінна від нуля, вважаються активними і використовуються для подальших розрахунків.

3. Активізація висновків в нечітких правилах продукцій. Для заданого (чіткого) значення аргументу знаходяться ступеня істинності для передумов кожного правила. Далі знаходяться значення ступенів істинності всіх висновків правил нечітких продукцій з використанням методу *min*-активізації:

4. Акумуляція висновків нечітких правил продукцій. Фактично відсутня, оскільки розрахунки здійснюються із звичайними дійсними числами .

5. Дефазифікація вихідних змінних. Використовується модифікований варіант у формі методу центру тяжіння для одноточкових множин:

де  $n$  – загальна кількість активних правил нечітких продукцій

Розглядаючи структуру управління, можна визначити наступні п'ять правил функціонування НЛР у форматі «if – then», як показано вище у форматі (1):

П1: Якщо похибка регулювання  $e_i$  належить нечіткій множині «велика позитивна PE» і приріст похибки регулювання  $\Delta e_i$  належить множині «приблизно нульова Z », то керуюча дія  $u_i = w_1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_i = w_2$ ;

П2: Якщо похибка регулювання  $e_i$  належить нечіткій множині «велика негативна NE» і приріст похибки регулювання  $\Delta e_i$  належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія  $u_i = -w_1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_i = -w_2$ ;

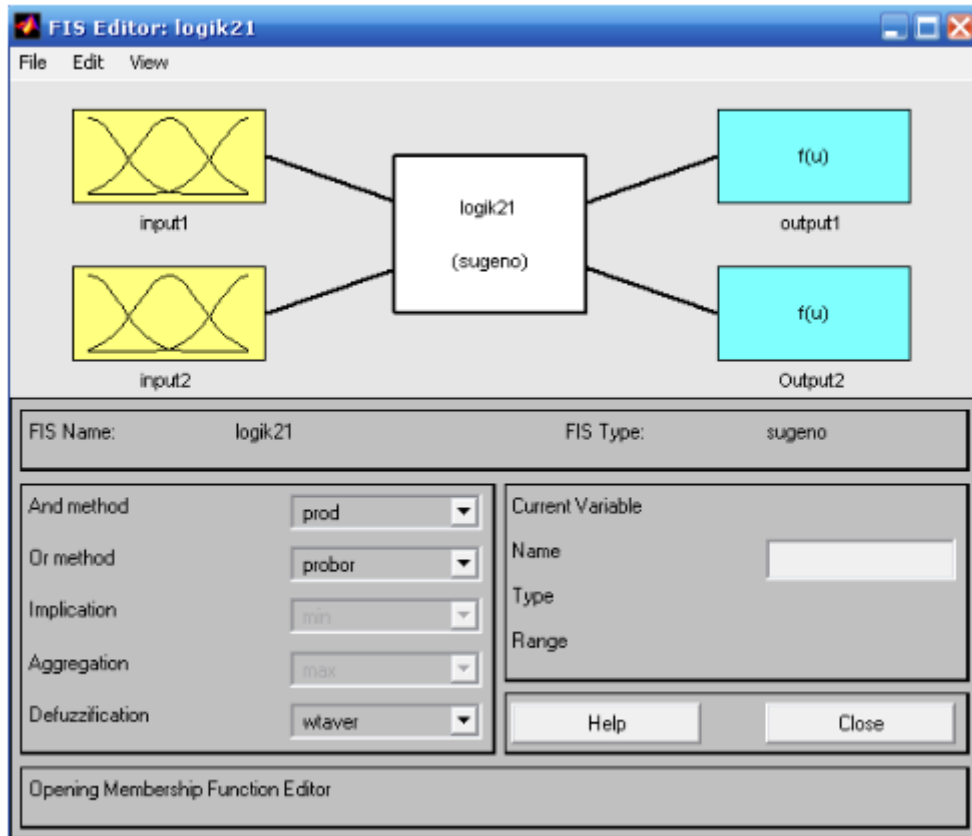


Рисунок 3.6 - Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

П3: Якщо похибка регулювання  $e_i$  належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання  $\Delta e_i$  належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія  $u_i = 0$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_i = 0$ ;

П4: Якщо похибка регулювання  $e_i$  належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання  $\Delta e_i$  належить множині «велика позитивна PE», то керуюча дія  $u_i = w1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_i = w2$ ;

П5: Якщо похибка регулювання  $e_i$  належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання  $\Delta e_i$  належить множині «велика негативна NE», то керуюча дія  $u_i = -w1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_i = -w2$ .

Відповідно вище представленим правилам складемо таблицю баз знань для НЛР вологості продукту на виході сушарки.

Як видно з рисунку 3.11, на вхід даного нечіткого регулятора будуть подаватись дві змінні – помилка регулювання (`input1`) та приріст помилки регулювання (`input2`). Для змінної `input1` задаємо три трикутні функції приналежності «`trimf`». Це проста функція приналежності і найбільш часто застосовується. Трикутна функція приналежності задається наступною аналітичною формулою:

[`a`, `c`] – діапазон зміни змінної, для справжнього випадку  $a = -70$ ,  $c = 70$ ;  
`b` - найбільш можливе значення змінної

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.7 зображено вікно налаштування функцій приналежності `mf1`, `mf2`, `mf3` до нечітких множин похибка регулювання «велика негативна», «приблизно нульова», «велика позитивна» відповідно. Також були визначені функції приналежності `mf1`, `mf2`, `mf3` до нечітких множин приріст похибки регулювання «великий негативний», «приблизно нульовий» та «великий позитивний», які представлені на рисунку 3.8.

Згідно з таблицею 1 бази правил функціонування регулятора, були прописані відповідні правила у вікні редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища `MATLAB\Simulink`. Це вікно з відповідними правилами зображено на рисунку 3.9.

Таблиця 3.1 –база знань для нечіткого логічного регулятора температури

$e_1 \backslash \Delta e_1$	NE (Велика негативна $\Delta e_1$ )	Z (приблизно нульова $\Delta e_1$ )	PE (Велика позитивна $\Delta e_1$ )
NE	–	$u_1 = 10;$ $\Delta u_1 = 0,012;$	–
Z	$u_1 = 10;$ $\Delta u_1 = 0,012;$	$u_1 = 0;$ $\Delta u_1 = 0;$	$u_1 = -10;$ $\Delta u_1 = -0,012;$
PE	–	$u_1 = -10;$ $\Delta u_1 = -0,012;$	–

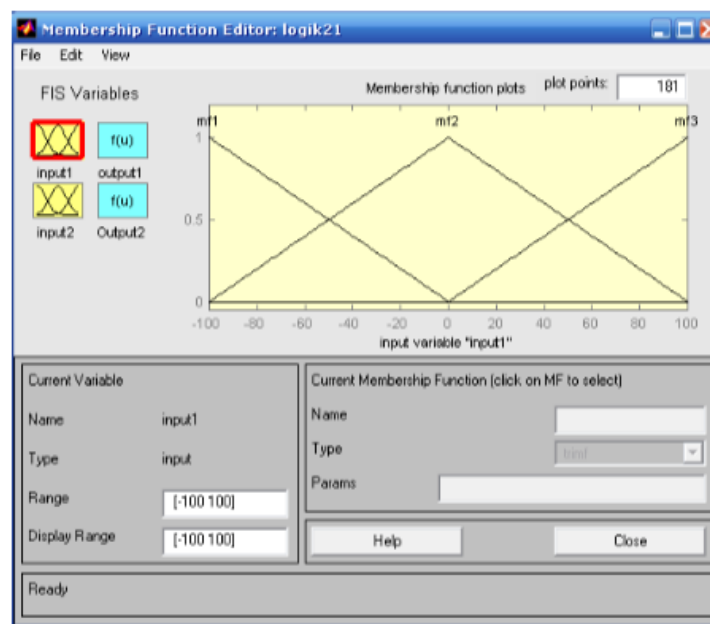


Рисунок 3.7 - Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

При дефазифікації вихідних змінних використовується модифікований варіант у формі методу центру тяжіння для одноточкових множин згідно з наступною формулою:

де  $n$  – загальна кількість активних правил нечітких продукцій, у нашому випадку – 5 правил;

– значення ступенів істинності всіх висновків правил нечітких продукцій з використанням методу *min*-активізації.

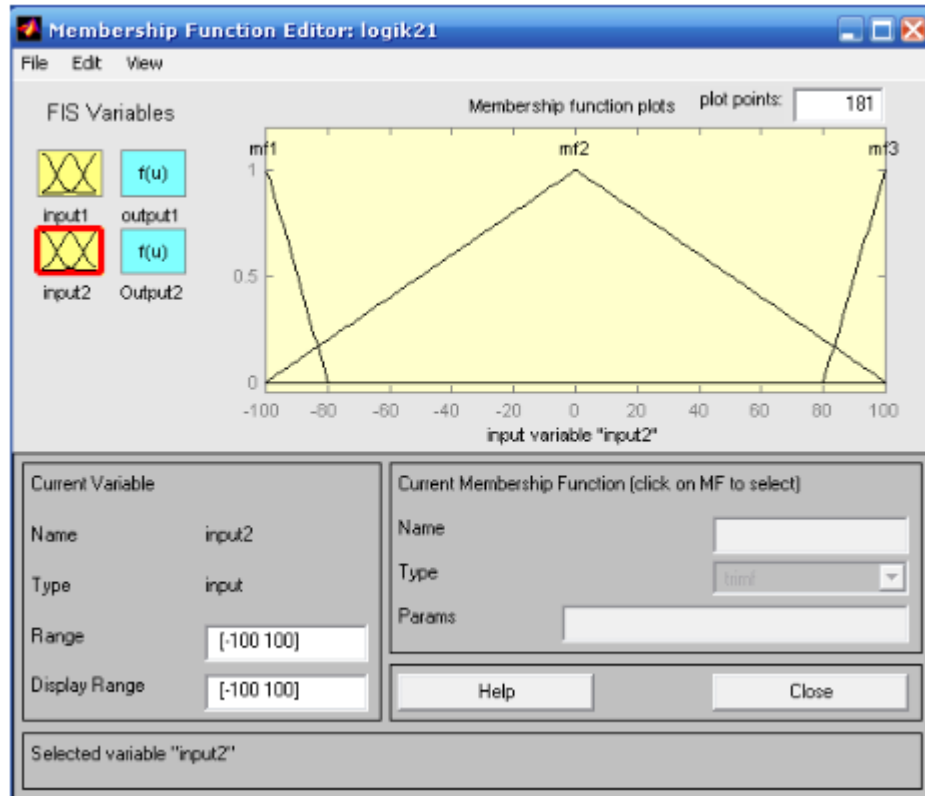


Рисунок 3.8 - Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У даному випадку вихідні значення сигналів  $C_i$  згідно з алгоритмом Сугено нульового порядку були визначені у вікні реактора, представленого на рисунку 3.10. Виходами синтезованого нечіткого регулятора визначені зміни «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відпрацьовувати інтегральну I-складову регулятора, а «output2» – відповідно П-складову.

Для запуску синтезованого алгоритму перетягнуто на робоче поле створення моделі SIMULINK блок «Fuzzy Logic Controller» зі стандартної бібліотеки. У відкритому вікні «Fuzzy Logic Controller» було записано в запропонованому полі ім'я *fis*-файлу, а в головному вікні налаштування *fis*-

файлу було вибрано File / Save to Workspace для завантаження у робочій простір середовища MATLAB нечіткого алгоритму управління.

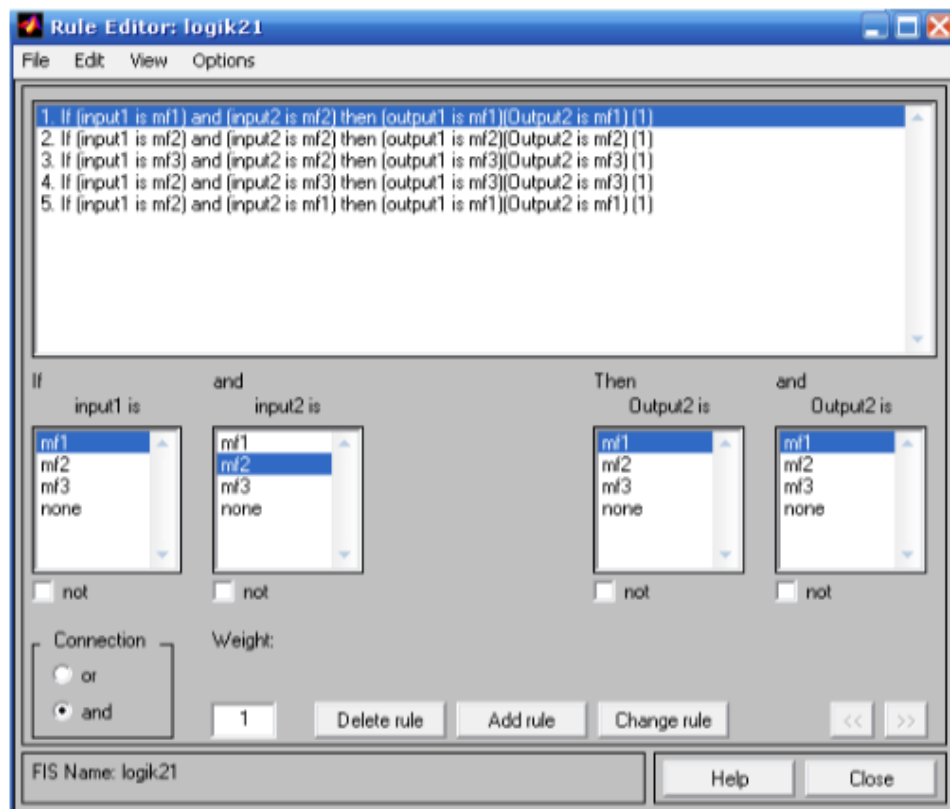


Рисунок 3.9 - Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

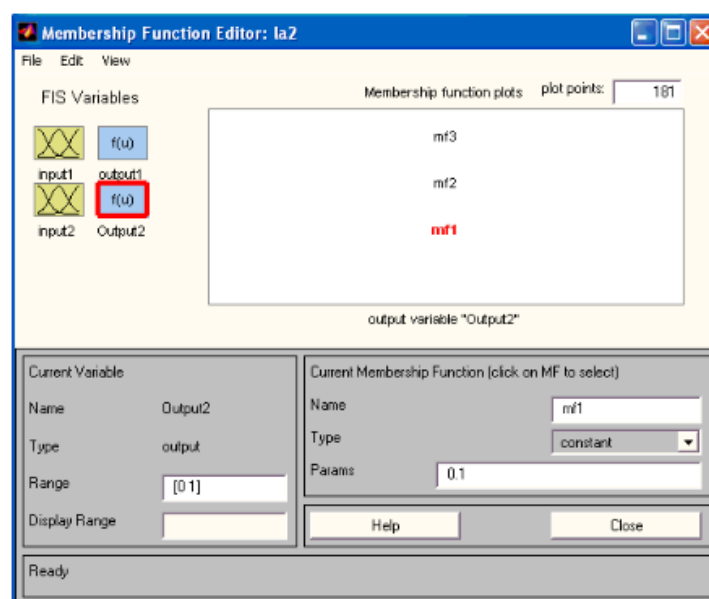


Рисунок 3.10 - Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink



### **3.5. Порівняльний аналіз функціонування САУ з традиційним ПД регулятором і САУ з нечітким регулятором**

У результаті моделювання САУ з нечітким регулятором були отримані графіки перехідних процесів з виходу системи на номінальний режим функціонування і також перехідні процеси при детермінованому впливі, що збурує. Для порівняльного аналізу також були представлені відповідні графіки перехідних процесів у САУ з традиційним ПД-регулятором.

На рисунку 3.12 представлені відповідні схеми моделювання САУ з ПД регулятором та САУ з нечітким регулятором якій відтворює ПІ складову ПД регулятора. Як можна побачити з рисунку диференціальна Д- складова однакова в різних системах управління. Такі системи були представлені паралельно для визначення значення відповідних перехідних характеристик для порівняльного аналізу за прямими показниками якості регулювання.

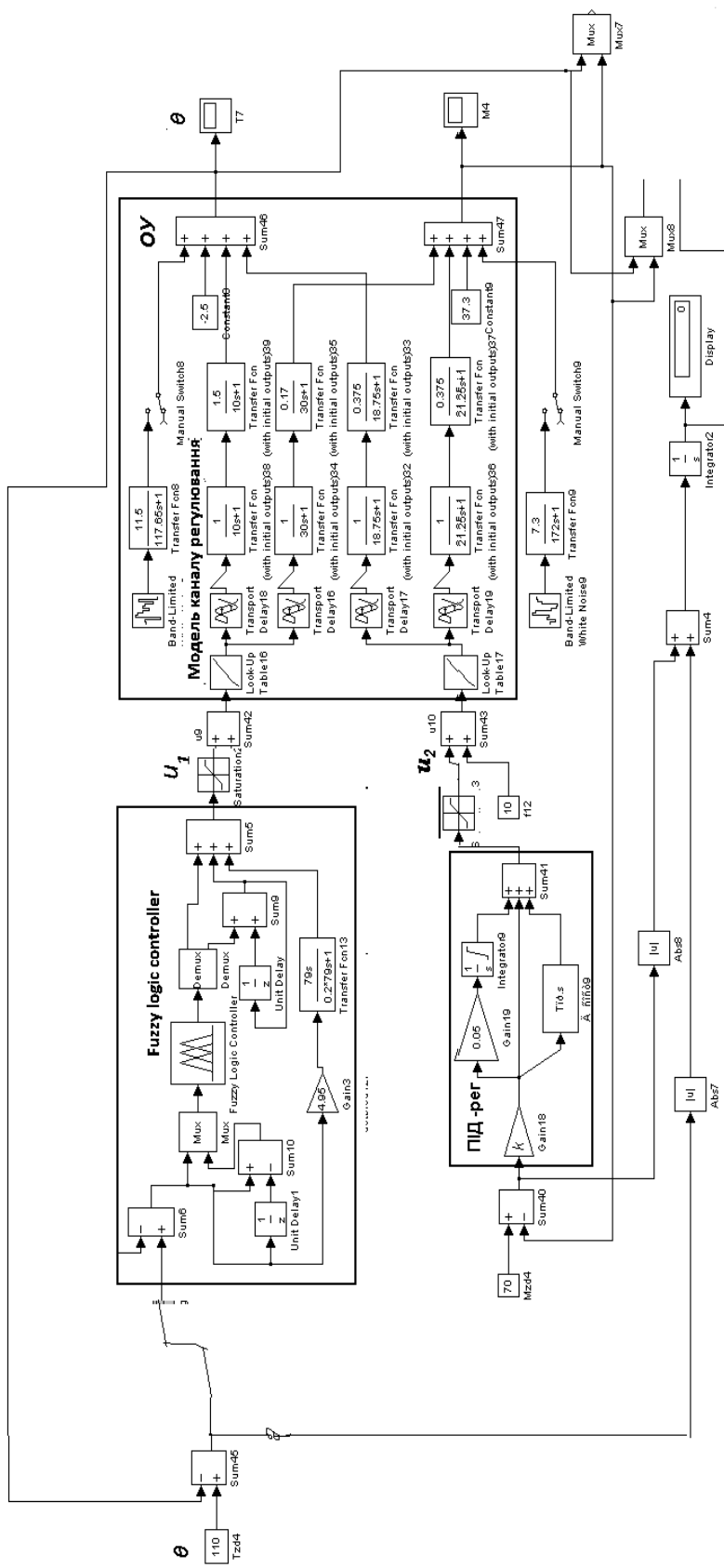


Рисунок 3.12 - Структурні схеми моделей САУ з ПІД-регулятором і САУ з нечітким регулятором для отримання графіків перехідних процесів з метою порівняльного аналізу функціонування різних САУ

Іншому випадку реалізація нечіткого регулятора може бути виконано при умові якщо відомі не вихідні значення регулятора при відповідних похибках регулювання а вихідні функції приналежності значень управляючого впливу. В даному випадку теж необхідно визначити функції приналежності до нечітких множин вологість  $\varphi$  «велика» PE, «нормальна» Z, та «занадто мала» NE. А далі висновок може бути зроблений згідно з алгоритмом Мамдані.

Алгоритм Мамдані — алгоритм нечіткого логічного виводу по базі знань (базі правил) формується в предметній області у вигляді нечітких предикатних правил виду:

П1: якщо  $x \in A1$ , тоді  $z \in B1$ ,

П2: якщо  $x \in A2$ , тоді  $z \in B2$ ,

.....

Пn: якщо  $x \in An$ , тоді  $z \in Bn$ ,

де  $x$  — вхідна змінна(ім'я для відомих значень даних),  $z$  — змінна виводу(ім'я для значення даних, яке буде обчислене).  $A_i$  та  $B_i$  — нечіткі множини, визначені на  $X$  та  $Z$  відповідно за допомогою функції приналежності та ( $z$ ).

У представлений ситуації даних вивід у формі алгоритму Мамдані математично можна представити наступним чином.

**1.** Введення нечіткості (fuzzification): для заданого(чіткого) значення аргументу  $x = x_0$  знаходяться степені істинності для передумов кожного правила  $a_i = (x_0)$ .

**2.** Нечіткий вивід: знаходиться рівні відсічення для передумов кожного з правил (з використання правила мінімуму):

$$\alpha_1 = A1(x_0) \wedge B1(y_0)$$

$$\alpha_2 = A2(x_0) \wedge B2(y_0)$$

де через  $\wedge$  позначено операцію логічного мінімуму.

Потім знаходяться усічені функції належності:

$$\begin{aligned} C'_1(z) &= (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \\ C'_2(z) &= (\alpha_2 \wedge C_2(z)) \end{aligned}$$

3. Композиція: з використанням операції  $\max$  (позначеної як  $\vee$ ) виконується об'єднання знайдених усічених функцій, що приводить до отримання підсумкової нечіткої підмножини для змінної виходу з функцією належності.

$$M(z) = C(z) = C'_1(z) \vee C'_2(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(z))$$

Таким чином, для переходу від Сугено 0-го порядку до алгоритму Мамдані необхідно визначити вихідні функції приналежності  $C_1(z)$ ,  $C_2(z)$ ,  $C_3(z)$  замість відповідних значень  $W_2$ ,  $-W_2$ , та  $C_1$ ,  $C_2$ . На рисунках 3.18 та 3.19 представлені такі відповідні вихідні функції приналежності к множинам – «приріст управляючого впливі» великій (PE), «приріст управляючого впливі» приблизно нульовий (Z), «приріст управляючого впливі» від'ємний (NE).

Приведення до чіткості (дефазифікації). для моделі Мамдані використовують дефазифікація центроїдним методом, коли чітке значення вихідної змінної визначається як центр ваги для кривої результуючої функції приналежності  $\mu_{\Sigma}(z)$ .

Для виконання чисельних розрахунків на етапі дефазифікації для алгоритму Мамадані використана формула центру ваги (тяжіння) (англ. *Centre of Gravity, CoG*) або центроїд площі що розраховується за формулою:

$$y = \frac{\int_{min}^{max} x \cdot \mu(x) \cdot dx}{\int_{min}^{max} \mu(x) \cdot dx},$$

де  $y$  – результат дефазифікації;  $x$  – змінна, що відповідає вихідній лінгвістичній змінній

$w_{i,j}; \mu(x)$  – функція приналежності нечіткої множини, що відповідає вихідній змінній  $w$  після етапу акумуляції;  $min, max$  – ліва та права точки інтервалу носія нечіткої множини вихідної змінної  $w$ .

При дефазифікації методом центру тяжіння звичайне (чітке) значення вихідної змінної дорівнює абсцисі центру ваги площі, обмеженою графіком кривої функції приналежності відповідної вихідної змінної.

Таким чином, на рисунку 3.13 представлені графіки перехідних процесів при детермінованому збурюванні. Згідно з графіками перехідних процесів можна зробити висновок що завдяки використанню нечіткого регулятора в системі не дало покращати якість регулювання за вологістю продукту на виході сушарки. Таким чином робота далі буде пов'язана з перетворенням системи з нечітким регулятором в нейромережеву систему управління для подальшої процедури оптимізації.

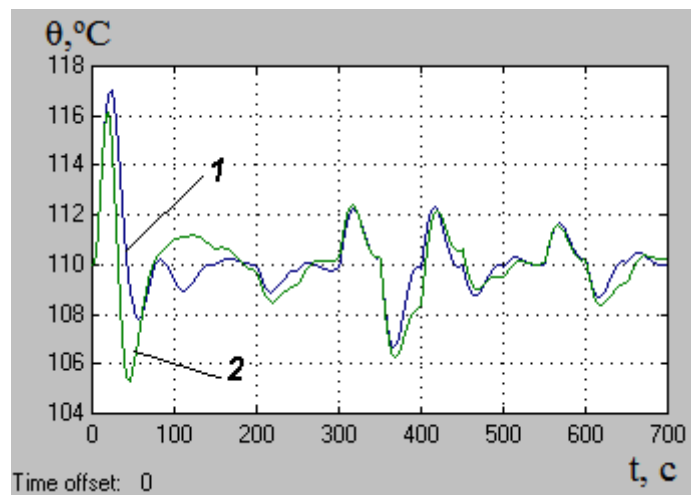


Рисунок 3.13- Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графіки 1– перехідний процес у САУ з ПД регулятором; 2 — перехідний процес у САУ з нечітким регулятором з висновком Сугено -0;

### 3.8. Синтез моделі САУ з нейрорегулятором як з альтернативним варіантом алгоритму управління

Нейрорегулятор у нашому випадку – це штучна нейронна мережа, що характеризується нелінійними характеристиками. Завдяки цьому застосування нейрорегулятора на базі нейронної мережі дозволить досягти більш високих результатів в управлінні. Нейронна мережа – це послідовність нейронів (нейронелементів), з'єднаних між собою синапсами. Структура нейронної мережі прийшла в світ програмування прямо з біології. Найбільш поширена структура – багат шарова, застосовується в якості регуляторів нейромережевих алгоритмів управління.

У зв'язку з тим, що нечіткій регулятор визначає приріст управляючої дія як позитивне значення, так і негативне значення, то при синтезі нейрорегулятора необхідно вибрати функції активації нейронів, які приймають значення від -1 до 1. В нашому випадку буде використано гіперболічну тангенціальну функцію ( $\tanh(x)$ ). Така функція дозволяє отримати на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1), що може бути необхідним в системі управління. Графічне представлення функції відображено на рисунку 3.14.

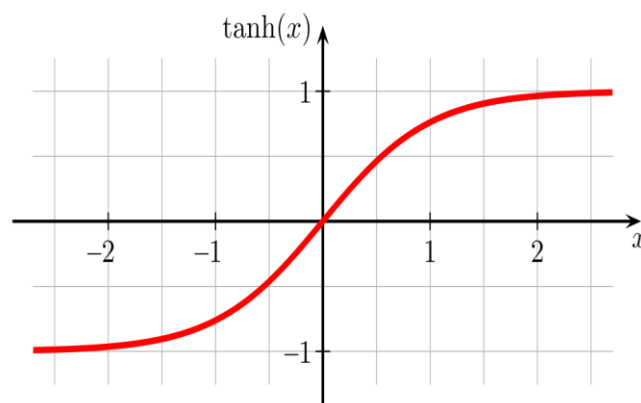


Рисунок 3.14. Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

$$f(net) = \frac{2}{1 + \exp(-\alpha \cdot net)} - 1, \text{ де } net - \text{вхідний аргумент}$$

Математична модель, що застосовується у якості нейронелементу у нейромереживому алгоритмі управління, аналогічна відомим найбільш розповсюдженим моделям, які схожі з формальною моделлю нейрона Маккаллоха – Питса. У даній моделі сигнали, що поступили на входи нейроелементу, множаться на свої ваги. Сигнал першого входу  $x_1$  множиться на відповідну вагу  $w_1$ . У підсумку отримуємо  $x_1 w_1$ . І так до n-ого входу. У підсумку на останньому вході отримуємо  $x_n w_n$ . Потім всі множення передаються в суматор. Уже виходячи з його назви можна зрозуміти, що він робить. Він просто підсумовує всі вхідні сигнали, помножені на відповідні ваги:

$$x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

Просто так подавати виважену суму на вихід досить безглуздо. Нейроелемент повинен якось обробити її і сформувати адекватний вихідний сигнал. Саме для цих цілей і використовують функцію активації. Вона перетворює зважену суму в якесь число, яке і є виходом нейрона.

Графічне представлення моделі нейроелемента з графічним представленням різних функцій активації що диференцовані відображено на рисунку 3.15. Таки нейронелементи будуть складати нейронні мережі які відтворюють нелінійне перетворення в різних складових регулятора як показано на рисунку 3.14.

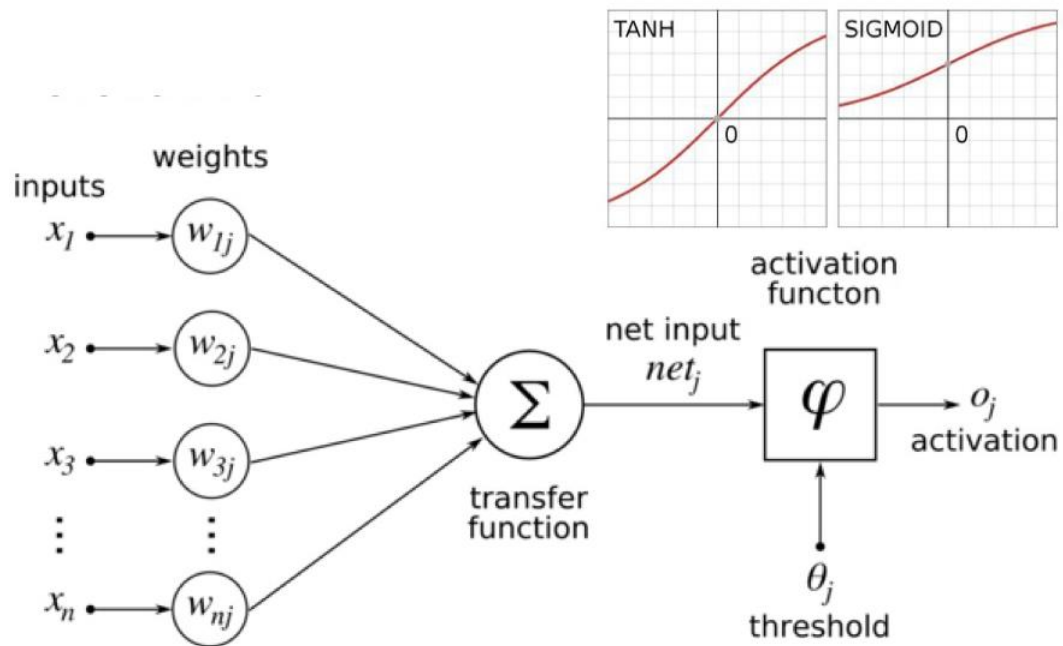


Рисунок 3.15 - Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

В одній з перших робіт з нейроуправління представляється дискретна СУ із НК, що одержує на вхід сигнал керування системою  $u_r(k)$  і затримані в кілька разів сигнали з виходу об'єкта керування. У загальному випадку НК такого типу може одержувати і затримані сигнали зі свого виходу (рисунок 3.36). Таким чином, він формує керуючий вплив за наступним законом:

$$\mathbf{u}(k) = NN(\mathbf{y}(k), \mathbf{y}(k-1), \dots, \mathbf{y}(k-l_1), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{u}(k-2), \dots, \mathbf{u}(k-l_2), \mathbf{u}_r(k)), \quad (5)$$

де  $l_1$  і  $l_2$  — глибини затримок зворотних зв'язків за виходом і входом об'єкта керування відповідно.

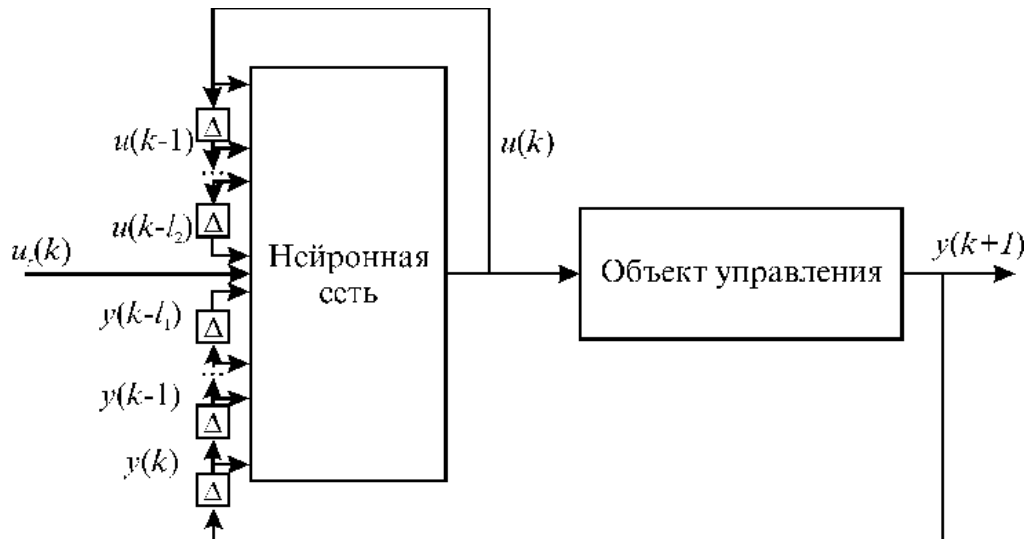


Рисунок 3.16 - Система керування з нейроконтролером

Якщо перший тип САУ з комбінованим регулятором є компромісним розв'язком у рамках класичного підходу, то другий тип що представлений на рисунку 3.16 побудований тільки на ШНМ.

В цьому другому випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рисунку 3.17.

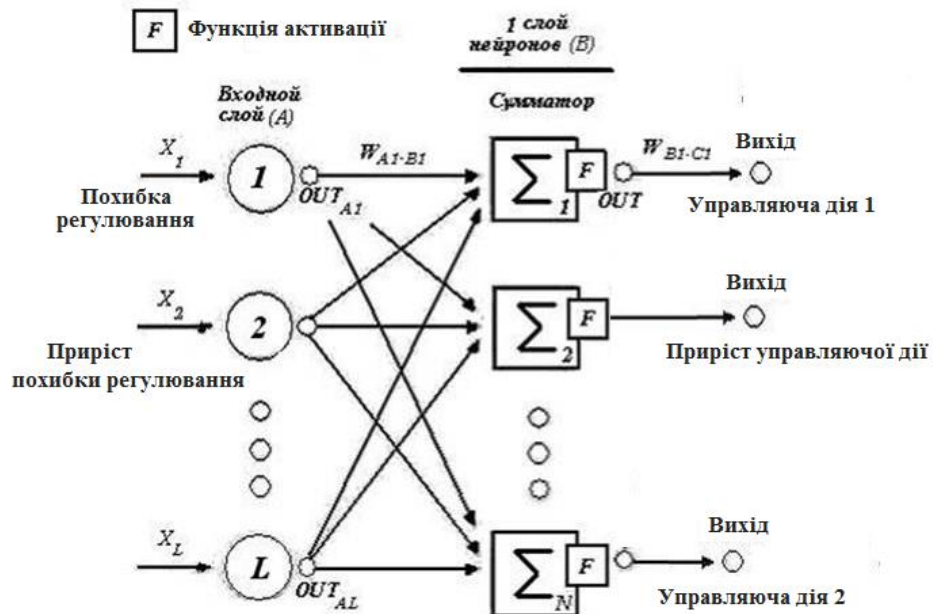


Рис. 3.17 – Одношарова нейронна мережа що виконує функції регулятора нейромережевого алгоритму управління

Метою навчання НК, у даному випадку, є одержання закону керування, що забезпечує задане (звичайно екстремальне) значення деякого функціонала якості  $I$ :

$$\mathbf{u}(t) \Rightarrow I(\mathbf{y}(t)) \rightarrow \text{ext}$$

Такий функціонал відповідає за поточний станом системи як показано на рисунку 3.18.

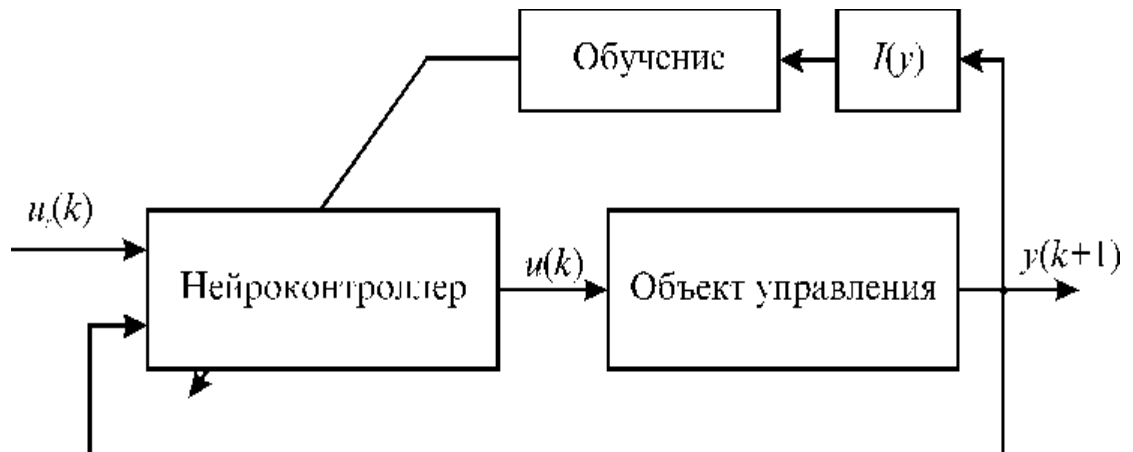


Рисунок 3. 18 - Нейромержева система керування з екстремальним показником якості регулювання

Якщо розглядати варіант нейромержевого алгоритму управління то нейрорегулятор можливо спочатку налаштувати за методом зворотного поширення. В цьому випадку треба визначити кількість визначених похибок регулювання для тренування нейронної мережі. На рисунку 3.41 також зображені похибки на кожному нейроні для коректування ваг за методом зворотного поширення. Якщо така структура буде недостатня, то необхідно буде збільшити кількість нейронів в вхідному шарі мережі та збільшити кількість шарів до трьох.

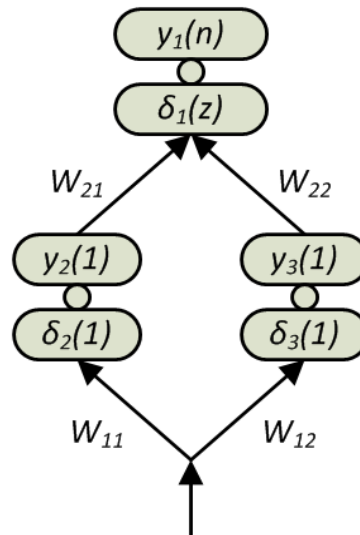


Рисунок 3.19 - Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

Для визначення ваг між нейронними з'єднаннями за методом зворотного поширення було використано програмне середовище MATLAB, що дозволяє згенерувати задану нейрону мережу на базі вхідних і вихідних значень сигналів. Таким чином, для тренування нейронної мережі необхідно указати вхідні і вихідні значення сигналів нейрорегулятора, а точніше, значення похибок регулювання та приріст управляючого впливу.

Штучна нейрона мережа, що виконує роль регулятора, синтезується на базі характеристик нечіткого логічного регулятора. Ці характеристики представляються у табличній формі у вигляді вхідних і вихідних значень нечіткого регулятора (таблиця 2). Дані, представлені у таблиці 2, визначені на базі моделювання нечіткого регулятора.

Далі створюємо М-файл в середовищі Matlab і в цьому файлі прописуємо команди для створення і навчання нашого нейрорегулятора. Вхідні і вихідні значення нейрорегулятора були отримані на основі характеристик нечіткого логічного регулятора, отриманих на основі схеми моделювання, представленій на рисунку 3.20.

№	$l$	$u$	$\Delta u$
1	-60	0,8571	0,1071
2	-30	0,4285	0,05357
3	-10	0,1429	0,01786
4	0	0	0
5	5	-0,07139	-0,008566
6	10	-0,1428	-0,01714
7	30	-0,4285	-0,05142
8	60	-0,8571	-0,1029

Таблиця 2 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

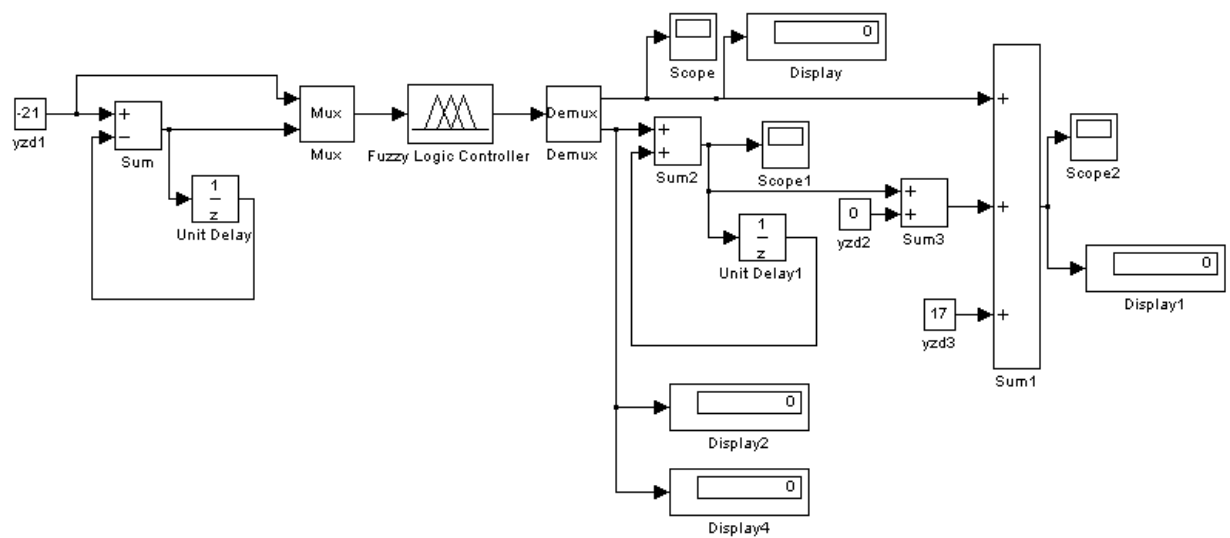


Рисунок. 3.20 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.21 і 3.22 відповідно для інтегральної та пропорційної складової регулятора. Представлений виконавчий код також можливо записати у командній строчці Matlab – command window, в результаті чого згенерується відповідна нейронна мережа.

```

>> p=[-60 -30 -10 0 5 10 30 60];
t=[0.8571 0.4285 0.1429 0 -0.07139 -0.1428 -0.4285 -0.8571];
net=newff([-10 10],[2 1],{'tansig' 'tansig'});
net.trainParam.epochs=50;
net=train(net, p, t);

TRAINLM, Epoch 0/50, MSE 1.53363/0, Gradient 4.40694/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/50, MSE 0.0262133/0, Gradient 0.219667/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/50, MSE 0.00184611/0, Gradient 0.0723525/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

>> a=sim(net,p)

a =

Columns 1 through 7

    0.8018    0.4792    0.1197    0.0125   -0.0496   -0.1481   -0.4924

Column 8

   -0.7950

>> gensim(net)

```

Рисунок 3.21 - Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

```

>> p=[-60 -30 -10 0 5 10 30 60];
t=[0.1071 0.05357 0.01786 0 -0.008566 -0.01714 -0.05142 -0.1029];
net=newff([-10 10],[2 1],{'tansig' 'tansig'});
net.trainParam.epochs=50;
net=train(net, p, t);

TRAINLM, Epoch 0/50, MSE 0.457634/0, Gradient 5.29391/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/50, MSE 1.51588e-008/0, Gradient 0.00121021/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/50, MSE 5.17987e-009/0, Gradient 1.30855e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

>> a=sim(net,p)

a =

Columns 1 through 7

    0.1071    0.0536    0.0177    0.0001   -0.0086   -0.0172   -0.0514

Column 8

   -0.1029

>> gensim(net)

```

Рисунок 3.22 - Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

В даному виконавчому коді  $p$  – вхідні значення нейромережі (похибка регулювання),  $t$  – відповідне значення виходу нейромережі. На третій строчці задаємо діапазон, кількість шарів нейромережі та функції активації. Також задаємо кількість кроків тренування, команду тренування нейромережі та генерації

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу  $i$ -того вихідного нейрону мережі. На рисунках 3.23 зображено бажані та фактичні значення вихідного сигналу  $i$ -того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову та II – складову нейрорегулятора вологості окремо.

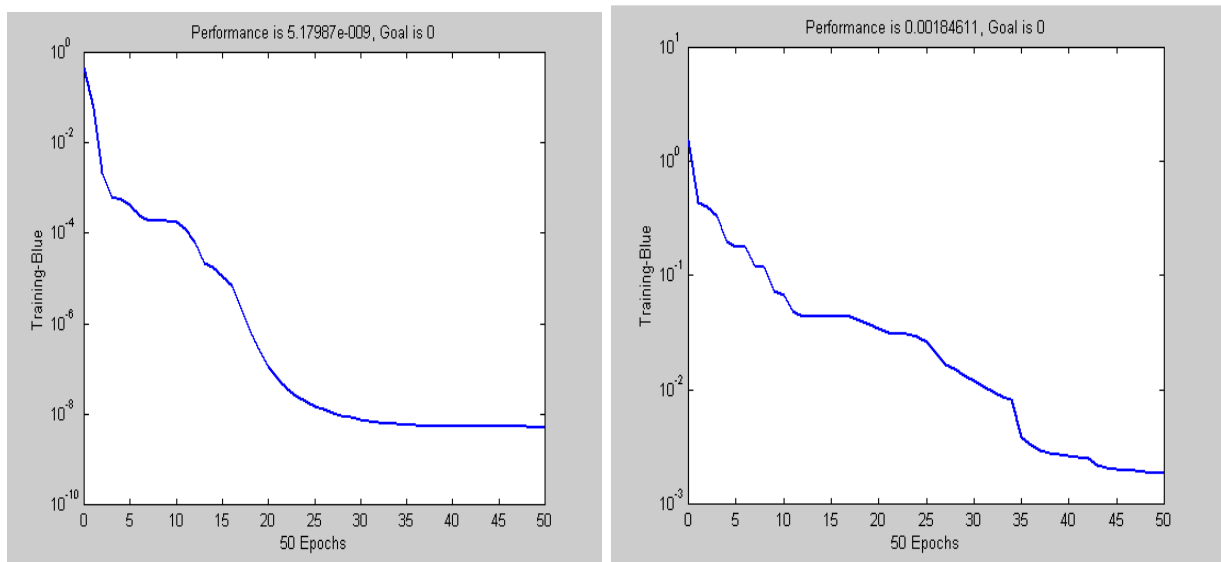


Рисунок 3.23 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Розрахуємо похибки для вихідного шару та похибки для  $i$ -тих нейронів прихованого шару НМ за методом зворотного поширення для оцінки якості тренування нейронної мережі.

Згідно навчання штучної нейронної мережі за методом зворотного розповсюдження похибки, похибка для вихідного шару нейронної мережі визначається за наступною формулою (1):

$$\delta_i(n) = (y_i(n) - d_i) \cdot y_i(n) \cdot (1 - y_i(n)) \quad (1)$$

де  $d_i$  – бажане значення вихідного сигналу  $i$ -того вихідного нейрону мережі.

$y_i$  – фактичне значення вихідного сигналу  $i$ -того вихідного нейрону мережі.

Похибка для  $i$ -того нейрону прихованого шару розраховується за наступною формулою (2):

$$\delta_i(n) = y_i(n) \cdot (y_i(n) - d_i) \cdot \sum w_{in+1} \cdot \delta_i(n+1) \quad (2)$$

де  $w_{in+1}$  – вага міжнейронного з'єднання  $n+1$  шару;  $\delta_i(n+1)$  – похибка  $i$ -того нейрону  $n+1$  шару.

Таким чином, розрахунок похибок для  $\Pi$  – складової нейрорегулятора наступний:

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 2.23:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) = \\ &= (-0.0529 - 0.0535) * (-0.0529) * (1 - -0.0529) = 0.00000085 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для  $i$ -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.7543 * (1 - 0.7543) * (-0.090802279331460109) * 0.00000085 = \\ &= -0.0000000143 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.5327 * (1 - 0.5327) * (-0.1663176858009808) * 0.00000085 = \\ &= 0.0000000351 \end{aligned}$$

Розрахунок помилок для  $I$  – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) = \\ &= (0.04996 - 0.05) * (0.04996) * (1 - 0.04996) = 0.03330085 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для  $i$ -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.9599 * (1 - 0.9599) * 7.3655548636428527 * 0.0333 = 0.009443 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.9766 * (1 - 0.9766) * (-7.3307275810928836) * 0.0333 = -0.005578\end{aligned}$$

Результати розрахунків показали, що помилки практично нульові, отже ними можна знехтувати, а розрахунок значень наведеної погрішності не проводити.

Сформовані нейроні мережі були визначені у схемі моделювання замість нечіткого регулятора, як показано на рисунку 3.16. У такий спосіб була синтезована модель САУ з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink, фрагмент структурної схеми якої представлений на рисунку 3.24.

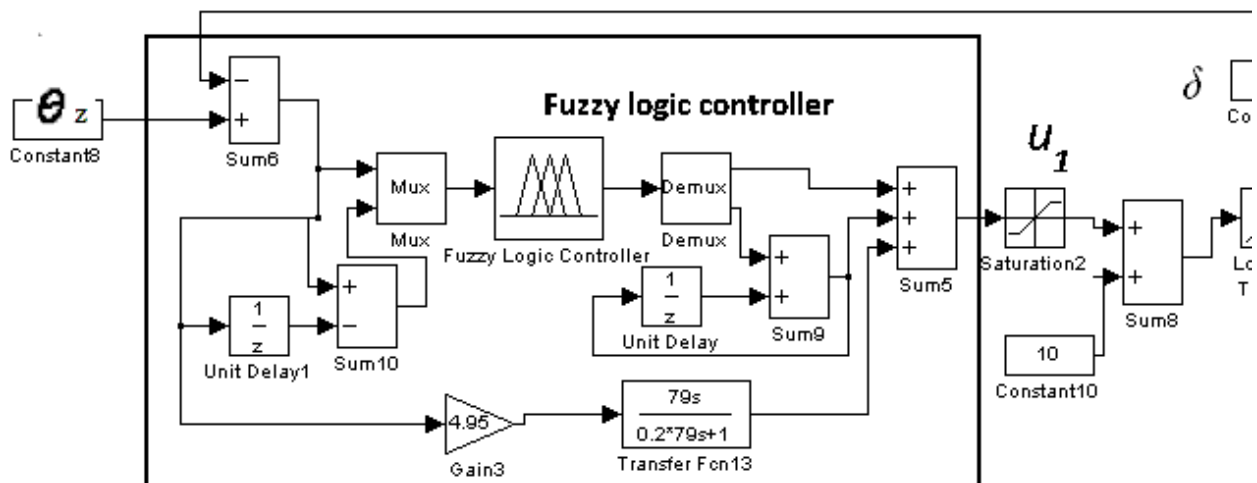


Рисунок 3.24 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.25, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.24.

У результаті моделювання САУ з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САУ з нечітким регулятором та традиційним ПІД-регулятором. Ці графіки представлені на рисунку 3.50. З графіків перехідних процесів можливо

побачити, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором працює незначно гірше, ніж САУ з нечітким регулятором.

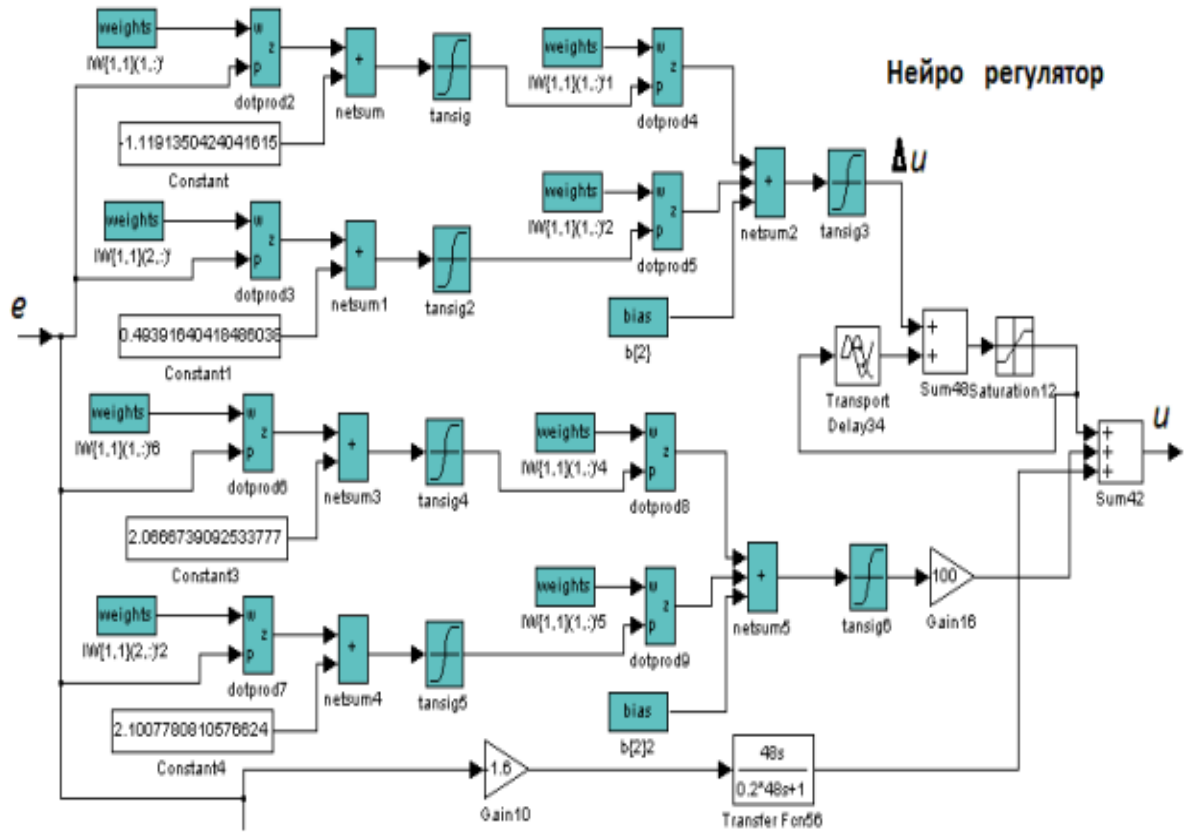


Рисунок 3.25– Схема моделювання нейронного регулятора

Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування складає 2000 секунд при САУ з нечітким та традиційним ПД регулятором, і 1800 секунд, при САУ з нейронним регулятором. Також максимальне динамічне відхилення при детермінованому збуренні значно більше в САУ з нейрорегулятором, як показано на рисунку 3.50. Незважаючи на це регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має 8-м ваг між нейронних з'єднань, а саме параметри які можна оптимізувати для покращення якості регулювання. Також, як видно з рисунку 3.26, є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

Можливо зробити висновок, що виходячи з якості регулювання різних САУ необхідно нейрорегулятор оптимізувати при тих же умовах, як і

попередній традиційний ПД-регулятор для визначення остаточного висновку про доцільність застосування різних САУ.

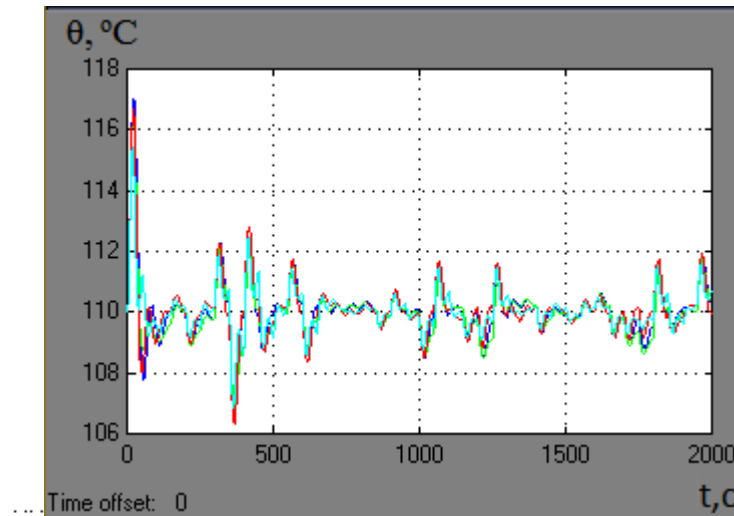


Рисунок 3.26 - Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 (червоний) – перехідний процес у САУ з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж; графік 2 (синій) – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором

3.9. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором.

Для покращення якості регулювання у роботі була проведена параметрична оптимізація САУ з нейронним регулятором. Оптимізувались чотири параметри настроювання нейрорегуляторів – це вагові коефіцієнти нейронних з'єднань першого-вхідного шару штучної нейронної мережі. Оптимізація нейронного регулятора проводилась при таких же умовах, які були при оптимізації САУ з традиційним ПД регулятором.

Таким чином, інтегральний показник якості функціонування при оптимізації був обраний відповідно таким же, як при оптимізації САУ з традиційним ПД регулятором. У програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була визначена модель САУ з нейрорегулятором і параметричним оптимізатором, структурна схема яка відображена на рисунку 3.27.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені

ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі. Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у відповідному вікні результатів оптимізації, представленому рисунку 3.29. На рисунку 3.29 представлений результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації САР з ПД регулятором з визначеному інтегральному критерії якості роботи системи.

Згідно з рисунків 3.7 та 3.29 можна побачити що вдалося значно покращити якість регулювання порівнявши значення інтегральних критеріїв якості роботи системи. Значення інтегрального показника при САР з ПД регулятором 6472 а при САР з нейрорегулятором 5257.

Таким чином можливо ще покращити роботу нейрорегулятора за якістю функціонування, ще далі оптимізувавши обрані вагові коефіцієнти, а також вагові коефіцієнти між нейронних з'єднань вихідного шару нейронної мережі.

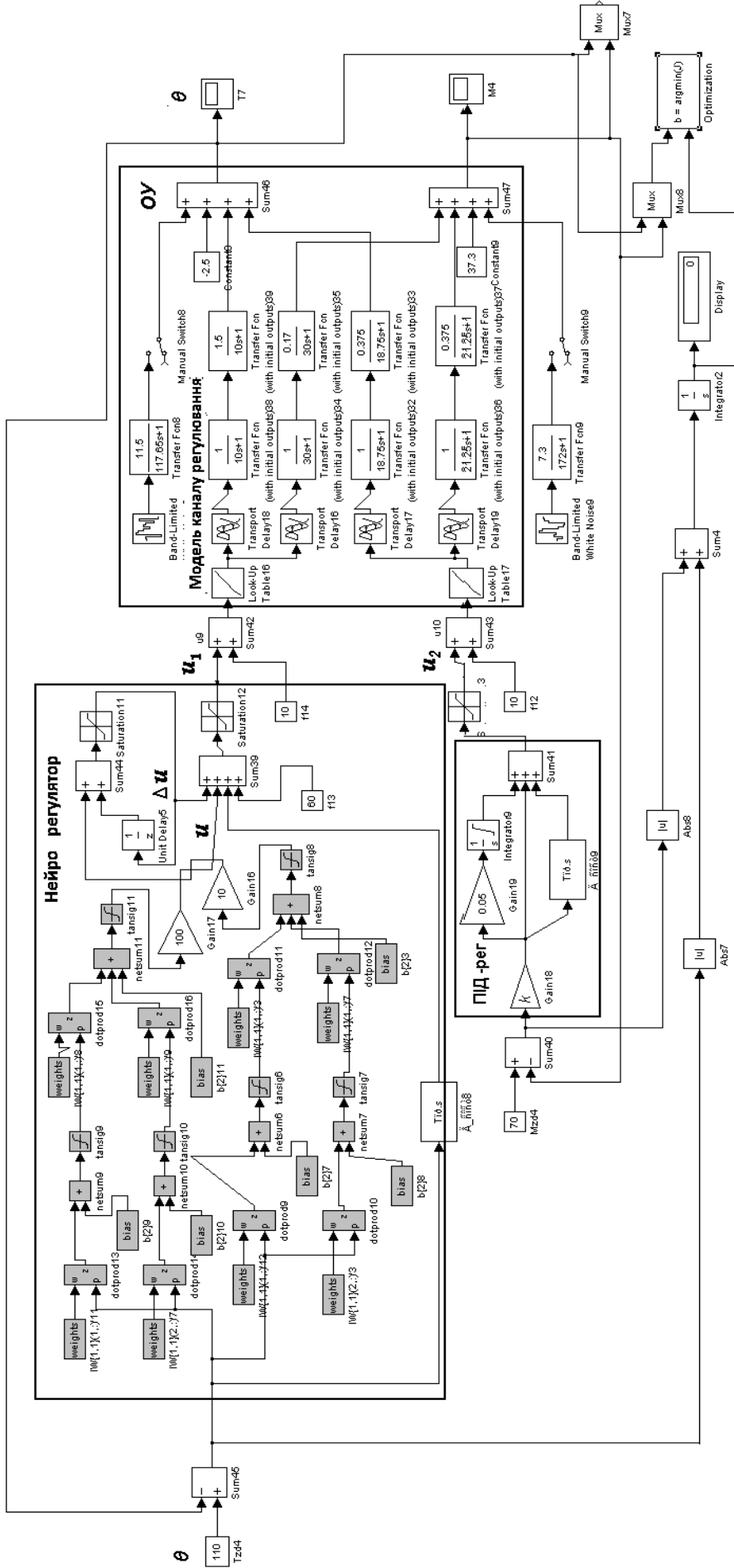


Рисунок 3.27 – Структурна схема моделі САУ з нейронним регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink для визначення оптимальних параметрів системи управління за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання

**Оптимизация**

**Конкретизация задачи оптимального параметрического синтеза (ОПС)**

ОПС в условиях параметрической неопределенности ОУ.  
 ОПС при фиксированных параметрах ОУ.

**Параметры объекта управления (ОУ)**

Имена параметров: ko tau T T1  
Номинальные значения: 3.4 2.5 12 10  
Нижние значения диапазонов: 0.8\*3.4 0.8\*2.5 0.8\*12  
Верхние значения диапазонов: 1.2\*3.4 1.2\*2.5 1.2

**Оптимизируемые параметры (аргументы)**

Имена параметров: k1 k2 k3 k4  
Начальные приближения: -0.96514470310649692  
Нижние ограничения: -2 -2 -2 -2  
Верхние ограничения: 2 2 2 2

**Условия оптимизации (Симплекс метод Нелдера-Мида)**

Максимальное количество шагов процедуры оптимизации: 100  
Минимальное приращение аргументов: 0.01  
Минимально значимое приращение критерия: 0.001

**Визуализация результатов**

Количество графиков: 1  
Имена переменных отображаемых на графиках: y

Старт Отмена

Рисунок 3.28 – Вікно оптимізатора до початку оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

Результати параметричної оптимізації показують, що нейрорегулятор на відмінність від традиційного нечіткого регулятора, має велику можливість налаштування під обраний об'єкт з нелінійною статичною характеристикою каналів регулювання. Для визначення принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора необхідно визначити, чи не втрачає стійкість САУ при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених на етапі розробки моделі у діапазоні +/- 20 %.



системи на номінальний режим функціонування значно меншій при САУ з регулятором, що представлений на базі штучної нейронної мережі.

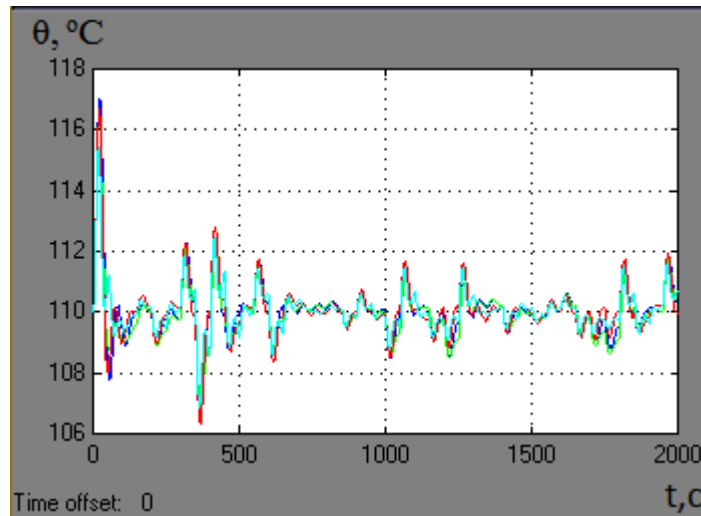


Рисунок 3.30 - Графіки переходних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в САУ з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором графік; 3 – перехідний процес у САУ з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж;

Також на основі аналізатора імовірнісних характеристик, що був вбудований у середовище MATLAB\Simulink, була визначена якість регулювання різних САУ при випадкових впливах що збурюють. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень похибки регулювання різних САУ при випадкових впливах. Результати представлені на рисунку 3.31, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання при різних САУ.

З рисунку 3.31 можливо побачити, що за середньо квадратичним відхиленням САУ з традиційним ПІД-регулятором і САУ з нейронним регулятором практично функціонують ідентично, а САУ з нечітким регулятором незначно гірше. В кінцевому випадку показники функціонування різних САУ за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.

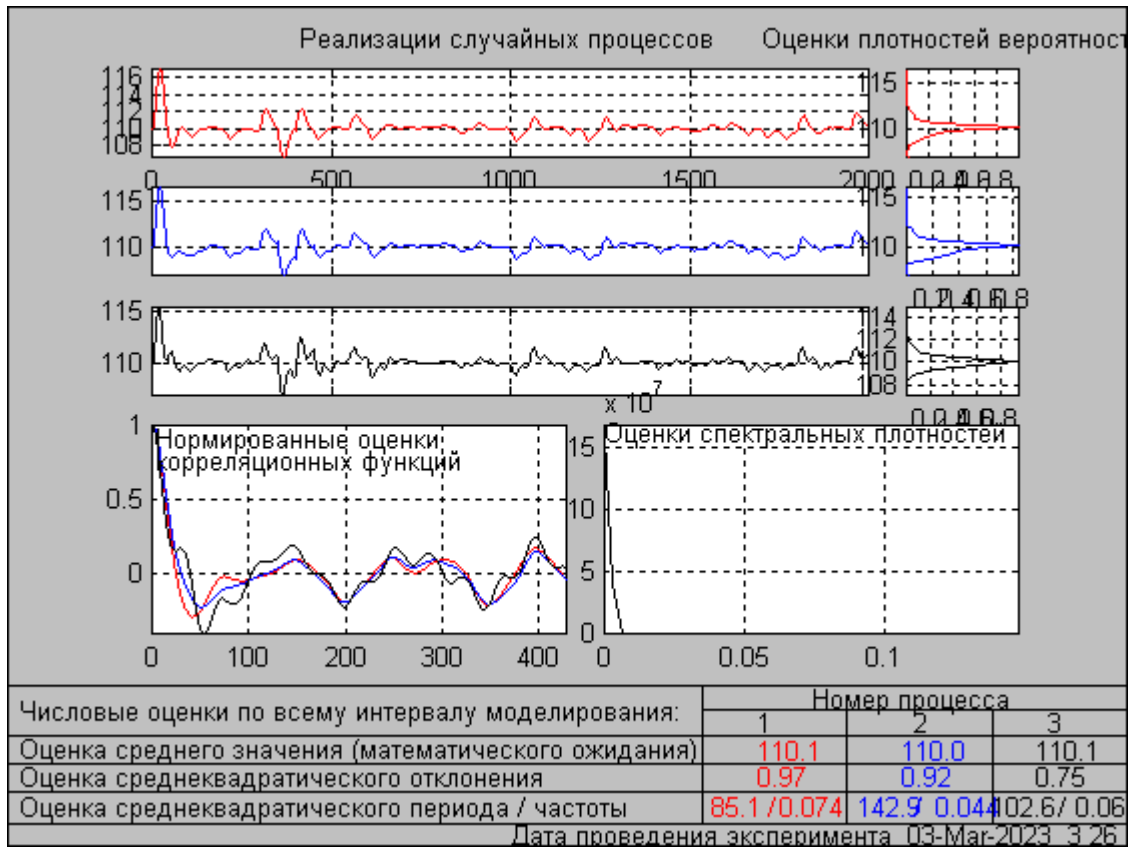


Рисунок 3.31 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

Таблица 3 – Показники якості регулювання різних САУ

САУ	САУ з традиційним ПД-регулятором	САУ з нечітким регулятором	САУ з регулятором, представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈200 с	≈200 с	≈200 с
Максимальне динамічне відхилення	≈5,5	≈6,1	≈4,4
Інтегральний показник	377	-	307

Математичне очікування	110.1	110	110.1
Середньоквадратичне відхилення	0,97	0,92	0,75

З таблиці 3 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САУ з нейронним регулятором краще функціонує, ніж інші розглянуті САУ. САУ з традиційним ПІД-регулятором і САУ з нечітким регулятором функціонують за якістю регулювання практично ідентично при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

### **3.11. Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера**

За допомогою Simulink PLC Coder автоматично одержуємо згенерований код для промислових систем управління. А саме, згенерований вихідний код у структурованому текстовому форматі з моделі Simulink. Для генерації коду необхідна програма Matlab, починаючи з версії 2010a. Розробляти необхідно програму для ПЛК Siemens SIMATIC STEP 7.

Спочатку вибираємо Subsystem Parametrs на блоці регулятора, синтезованого на основі штучної нейронної мережі. У цьому вікні відзначаємо «Treat as atomic unit» і натискаємо кнопку Ок. На функціональному блоці натискаємо праву клавішу миші і вибираємо PLC Coder / Options. Далі вибираємо, у який тип ПЛК буде згенерований код (Target IDE) і натискаємо клавішу Generate code. Згенерований код для SIMATIC STEP 7 наступний:

```
(*
*
* File: sh7.scl
*
```

\* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem  
"shihov7/Subsystem"

\*

\* Model name : sh  
 \* Model version : 1.9  
 \* Model creator : Udovik  
 \* Model last modified by : lapenkov  
 \* Model last modified on : Thu Jan 17 01:27:24 2033  
 \* Model sample time : 0s  
 \* Subsystem name : sh/Subsystem  
 \* Subsystem sample time : 0s  
 \* Simulink PLC Coder version : 1.3 (R2012a) 29-Dec-2011  
 \* ST code generated on : Thu Jan 17 01:44:26 2013

\*

\* Target IDE selection : Siemens SIMATIC Step 7 5.4  
 \* Test Bench included : No

\*

\*)

FUNCTION\_BLOCK Subsystem

VAR\_INPUT

ssMethodType: INT;

In1: REAL;

END\_VAR

VAR\_OUTPUT

Out1: REAL;

END\_VAR

VAR

UnitDelay\_DSTATE: REAL;

rtb\_Sum1\_g: REAL;

END\_VAR

CASE ssMethodType OF

0:

(\* InitializeConditions for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay' \*)

UnitDelay\_DSTATE := 0.0;

1:

(\* Sum: '<S1>/Add8' incorporates:

- \* Constant: '<S12>/one'
- \* Constant: '<S12>/one1'
- \* Constant: '<S13>/one'
- \* Constant: '<S13>/one1'
- \* Constant: '<S14>/one'
- \* Constant: '<S14>/one1'
- \* Constant: '<S1>/Constant23'
- \* Constant: '<S1>/Constant24'
- \* Constant: '<S1>/Constant32'
- \* Constant: '<S1>/Constant34'
- \* Constant: '<S1>/Constant35'
- \* Constant: '<S1>/Constant36'
- \* Constant: '<S1>/Constant37'
- \* DotProduct: '<S2>/Dot Product'
- \* DotProduct: '<S3>/Dot Product'
- \* DotProduct: '<S8>/Dot Product'
- \* DotProduct: '<S9>/Dot Product'
- \* Gain: '<S12>/Gain'
- \* Gain: '<S12>/Gain1'
- \* Gain: '<S13>/Gain'
- \* Gain: '<S13>/Gain1'
- \* Gain: '<S14>/Gain'
- \* Gain: '<S14>/Gain1'
- \* Inport: '<Root>/In1'
- \* Math: '<S12>/Exp'
- \* Math: '<S12>/Reciprocal'

- \* Math: '<S13>/Exp'
- \* Math: '<S13>/Reciprocal'
- \* Math: '<S14>/Exp'
- \* Math: '<S14>/Reciprocal'
- \* Sum: '<S14>/Sum'
- \* Sum: '<S14>/Sum1'
- \* Sum: '<S1>/netsum6'
- \* Sum: '<S1>/netsum7'
- \* Sum: '<S1>/netsum8'
- \* UnitDelay: '<S1>/Unit Delay'

\*

\* About '<S12>/Exp':

\* Operator: exp

\*

\* About '<S12>/Reciprocal':

\* Operator: reciprocal

\*

\* About '<S13>/Exp':

\* Operator: exp

\*

\* About '<S13>/Reciprocal':

\* Operator: reciprocal

\*

\* About '<S14>/Exp':

\* Operator: exp

\*

\* About '<S14>/Reciprocal':

\* Operator: reciprocal \*)

rtb\_Sum1\_g := (((1.0 / (EXP((((((1.0 / (EXP(((0.06269820241061 \* In1) + -  
1.1191350424041615) \* -2.0) + 1.0)) \*  
2.0) - 1.0) \* -0.08022731460109) + (((1.0 / (EXP((-0.006244911 \* In1) + -  
0.916404486038) \*

-2.0) + 1.0)) \* 2.0) - 1.0) \* 0.1663176858009808)) + 0.0046932421489396)  
 \* -2.0) + 1.0)) \* 2.0) - 1.0) + UnitDelay\_DSTATE;

(\* Saturate: '<S1>/Saturation' \*)

IF rtb\_Sum1\_g >= 100.0 THEN

    rtb\_Sum1\_g := 100.0;

ELSIF NOT (rtb\_Sum1\_g > 0.0) THEN

    rtb\_Sum1\_g := 0.0;

END\_IF;

(\* End of Saturate: '<S1>/Saturation' \*)

(\* Output: '<Root>/Out1' incorporates:

\* Constant: '<S10>/one'

\* Constant: '<S1>/Constant29'

\* Constant: '<S1>/Constant38'

\* Constant: '<S1>/Constant39'

\* DotProduct: '<S4>/Dot Product'

\* DotProduct: '<S5>/Dot Product'

\* DotProduct: '<S6>/Dot Product'

\* DotProduct: '<S7>/Dot Product'

\* Gain: '<S10>/Gain'

\* Gain: '<S10>/Gain1'

\* Gain: '<S11>/Gain'

\* Gain: '<S11>/Gain1'

\* Gain: '<S15>/Gain'

\* Gain: '<S15>/Gain1'

\* Gain: '<S1>/Gain'

\* Inport: '<Root>/In1'

\* Math: '<S10>/Exp'

\* Math: '<S10>/Reciprocal'

\* Math: '<S11>/Exp'

\* Math: '<S11>/Reciprocal'

- \* Math: '<S15>/Exp'
- \* Math: '<S15>/Reciprocal'
- \* Sum: '<S10>/Sum'
- \* Sum: '<S10>/Sum1'
- \* Sum: '<S11>/Sum'
- \* Sum: '<S11>/Sum1'
- \* Sum: '<S15>/Sum'
- \* Sum: '<S15>/Sum1'
- \* Sum: '<S1>/Add9'
- \* Sum: '<S1>/netsum10'
- \* Sum: '<S1>/netsum11'
- \* Sum: '<S1>/netsum9'
- \*
- \* About '<S10>/Exp':
- \* Operator: exp
- \*
- \* About '<S10>/Reciprocal':
- \* Operator: reciprocal
- \*
- \* About '<S11>/Exp':
- \* Operator: exp
- \*
- \* About '<S11>/Reciprocal':
- \* Operator: reciprocal
- \*
- \* About '<S15>/Exp':
- \* Operator: exp
- \*
- \* About '<S15>/Reciprocal':
- \* Operator: reciprocal \*)

Out1 := (((1.0 / (EXP((((1.0 / (EXP(((0.052714570200064 \* In1) +  
1.6739092533777) \* -2.0) + 1.0)) \* 2.0) -

```

1.0) * -5.33275810928836) + (((1.0 / (EXP((-0.015563587879813916 *
In1) + 2.1007780810576624) * -2.0) + 1.0)) *
2.0) - 1.0) * 7.3655548636428527)) + -0.049757494315143369) * -2.0) +
1.0)) * 2.0) - 1.0) * 100.0) + rtb_Sum1_g;

```

```
(* Update for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay' *)
```

```
UnitDelay_DSTATE := rtb_Sum1_g;
```

```
END_CASE;
```

```
END_FUNCTION_BLOCK
```

Програма представлена структурованою мовою управління Structured Text (ST), за синтаксисом близька до Pascal; Structured Text (ST) — мова програмування стандарту IEC61131-3. Призначена для програмування промислових контролерів і операторських станцій. Основою St-програми є вираження. Вираження складаються з операндів (констант і змінних) і операторів.

### 3.12. Висновки по розділу 3.

В процесі виконання роботи була розроблена модель САУ з нечітким регулятором. Нечіткий регулятор розроблений у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Були визначені функції приналежності до нечітких множин, сформована база правил функціонування регулятора у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначений алгоритм нечіткого виводу – Сугено 0-порядку. Було встановлено, що за якістю регулювання така САУ функціонує незначно гірше, ніж САУ з традиційним ПД-регулятором при об'єкті управління з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої параметричної оптимізації САУ, за характеристиками нечіткого регулятора було виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може виконувати роль нейрорегулятора. Тренування

штучної нейронної мережі було виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink за відповідним виконавчим кодом. Була розроблена модель САУ з регулятором, що представляється штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором були проведена при тих же умовах, що і САУ з традиційним ПД-регулятором.

У результаті моделювання різних САУ було встановлено, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором функціонує краще, ніж інші САУ, це за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 5257 при САУ з нейрорегулятором і 6472 при САУ з традиційним ПД-регулятором.

В заключній частині для практичної реалізації нейрорегулятора була сформована програма для промислового контролера.

Таким чином, на основі виконаного синтезу і аналізу різних САУ можна зробити заключний висновок, що нейрорегулятор має принципову придатність для практичного використання на базі промислового контролера при об'єктах управління з нелінійними характеристиками за каналам регулювання.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ САУ, ЩО РЕАЛІЗУЄ ФУНКЦІЮ

### 4.1. Обґрунтування актуальності додаткової функції САР для підвищення енергоефективності.

- низька ефективність роботи ОК завжди;
- найбільш несприятлива ситуація апіорі невідома, тому гарантувати відсутність події S неможливо навіть з урахуванням прийнятих несприятливих умов.

### 4.2. Доопрацювання математичної моделі ТП як ОР до його моделі як ОУ (об'єкта оптимізації, об'єкта, що гарантує управління) для вирішення задачі оптимізації, що гарантує управління.

В основу підвищення динамічної точності САР буде покладено принцип двоканальний Петрова, суть якого у введенні додаткових каналів впливу через коригуючий зв'язок. Відповідно до принципу інваріантності Петрова структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 2.

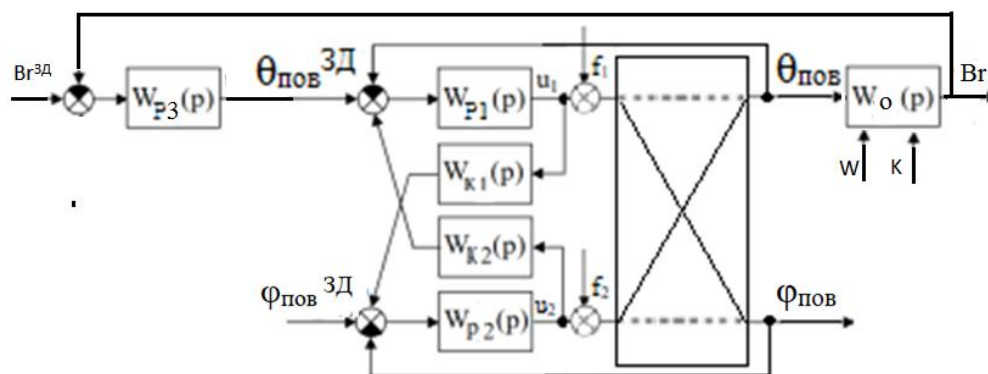


Рис. 4.1 – Структурна схема САР підвищеної динамічної точності  
На схемі:

$u_1$  – положення регулюючого органу нагрівача;

$\theta_{пов}$  – температура повітря;

$f_1$  – вектор неконтрольованих збурень в контурі регулювання температури;

$W_{P1}(p)$  – передаточна функція регулятора температури повітря;

$\theta_{пов}^{3Д}$  – задане значення температури;

$u_2$  – положення регулюючого органу подачі пари;

$\varphi_{пов}$  – вологість середовища;

$f_2$  – вектор неконтрольованих збурень в контурі регулювання вологості;

$W_{P2}(p)$  – передаточна функція регулятора вологості повітря;

$\varphi_{пов}^{3Д}$  – задане значення вологості;

$W_{K1}(p), W_{K2}(p)$  – корегуючі зв'язки;

$W_{P3}(p)$  – передаточна функція регулятора кольору корки хлібу;

$B_r$  – коричневість корки хлібу;

$B_r^{3Д}$  – задане значення коричневої корки хлібу;

$W$  – властивість заготовок перед 3 етапом випічки;

$K$  – якісні показники муки.

### 4.3. Вибір та опис принципу реалізації функції.

Реалізувати систему гарантуючого управління (СГУ), тобто. таку САК, яка поряд із функціями регулювання та захисту, реалізувала б функцію гарантованого дотримання встановлених обмежень наперед заданою ймовірністю.

Концепція побудови таких систем полягає у безперервному оцінюванні (на кожному інтервалі часу) поточного значення ймовірності відсутності порушення та такого коригування режиму роботи об'єкта, щоб ця ймовірність відповідала наперед заданої ймовірності. Безпосередньо вимірювати значення цієї ймовірності неможливо, тому необхідна розробка спеціальної моделі, яка дозволить за оцінками доступних для вимірювання змінних отримати необхідну оцінку. Таку модель можна назвати моделлю порушення регламенту (МНР). Її найпростіший варіант вже розглядали у дисципліні ІтаМОА.

**4.4. Розробка структурної схеми САУ, формалізація алгоритму управління обґрунтування значень їх настроювальних параметрів.**

**4.4.1. Розробка структурної схеми САК та опис принципу її дії.**

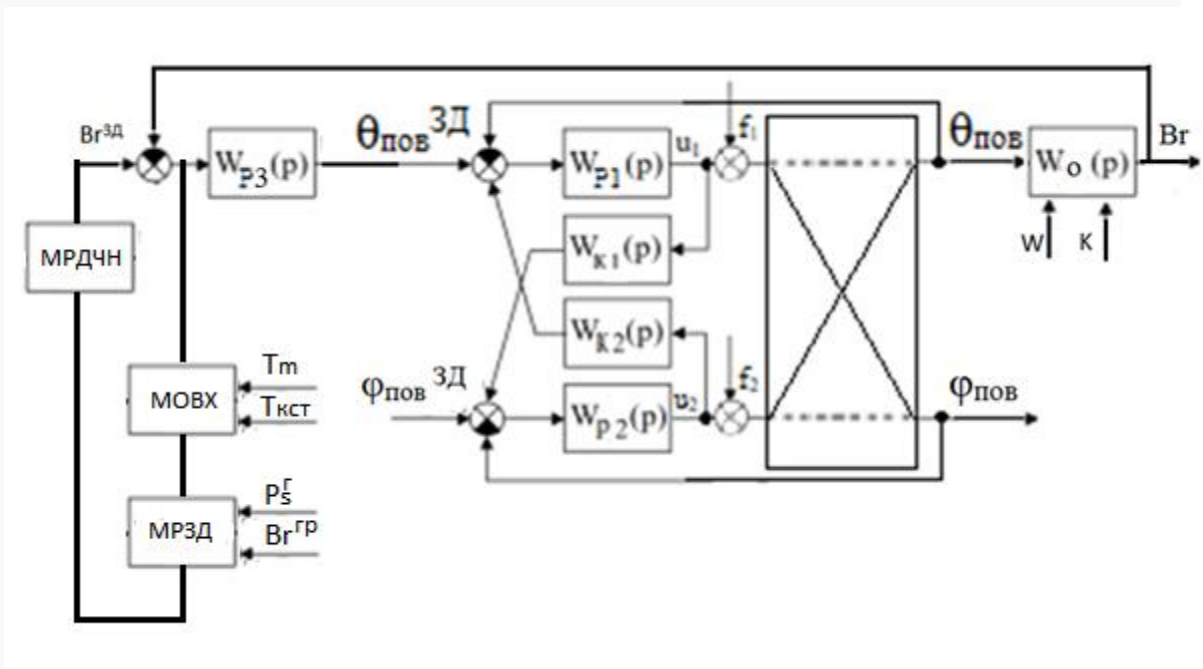


Рис.4.2 – САК системи гарантуючого управління

**4.4.2. Обґрунтування настроювальних параметрів нових алгоритмів керування.**

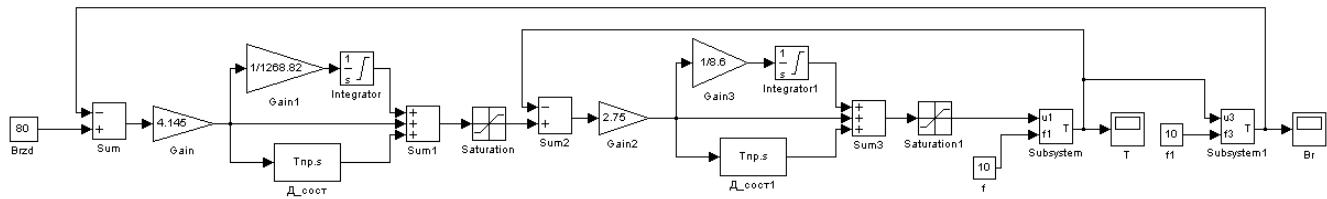


Рис. 4.3 – Схема моделювання звичайної САР

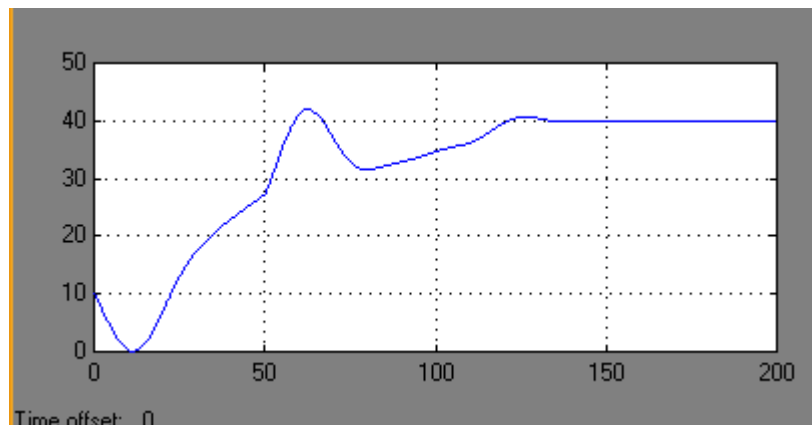


Рис.4.4 – перехідні характеристики САР у КР температури

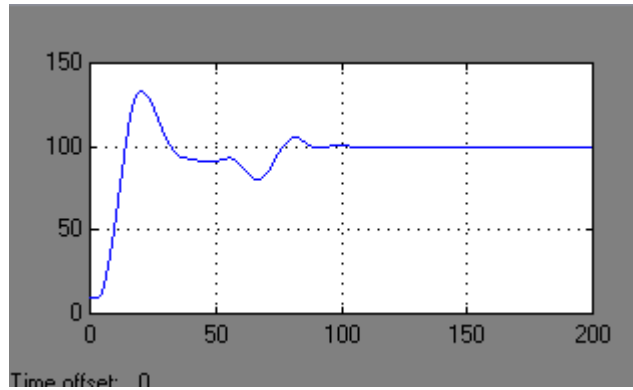


Рис.4.5 – перехідні характеристики САР у КР кольору корки хлібу

**4.5. Розробка схеми імітаційного моделювання САУ та плану комп'ютерних експериментів щодо дослідження її ефективності, подання та аналіз результатів моделювання.**

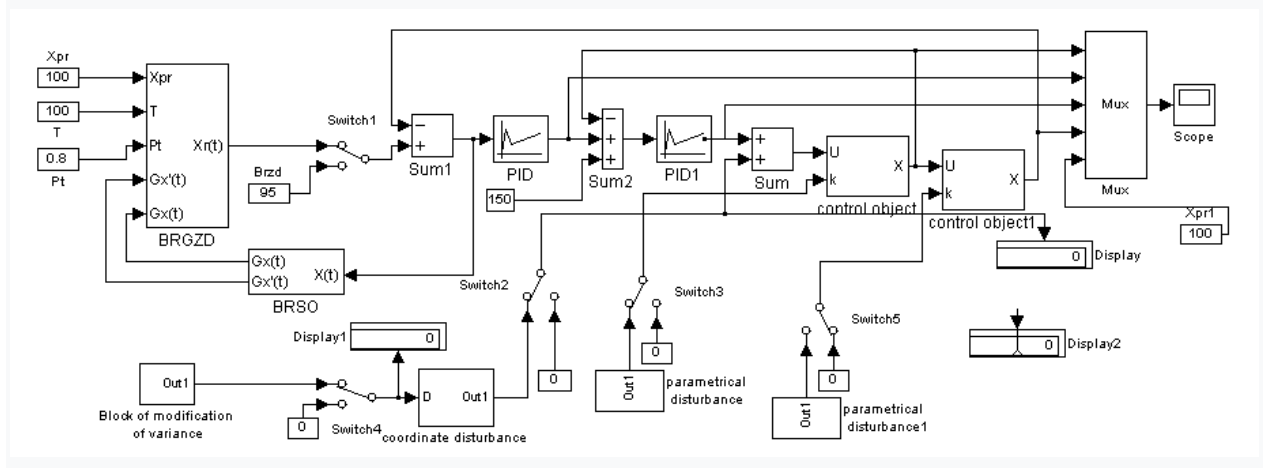


Рис. 4.6 – Схема моделювання САР гарантуючого управління

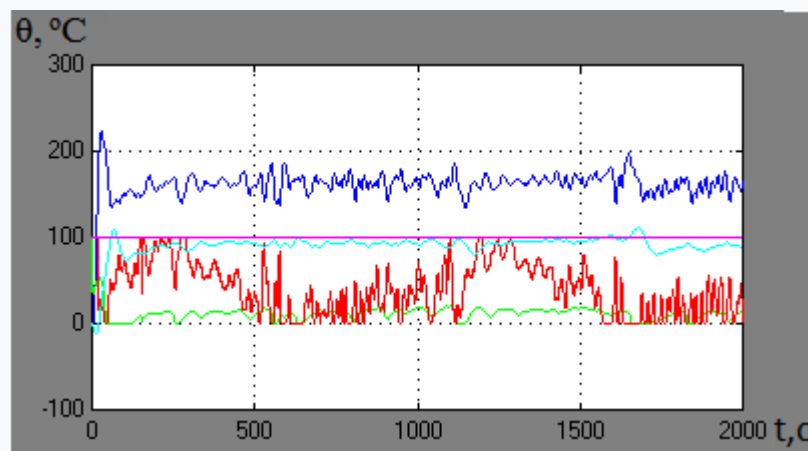
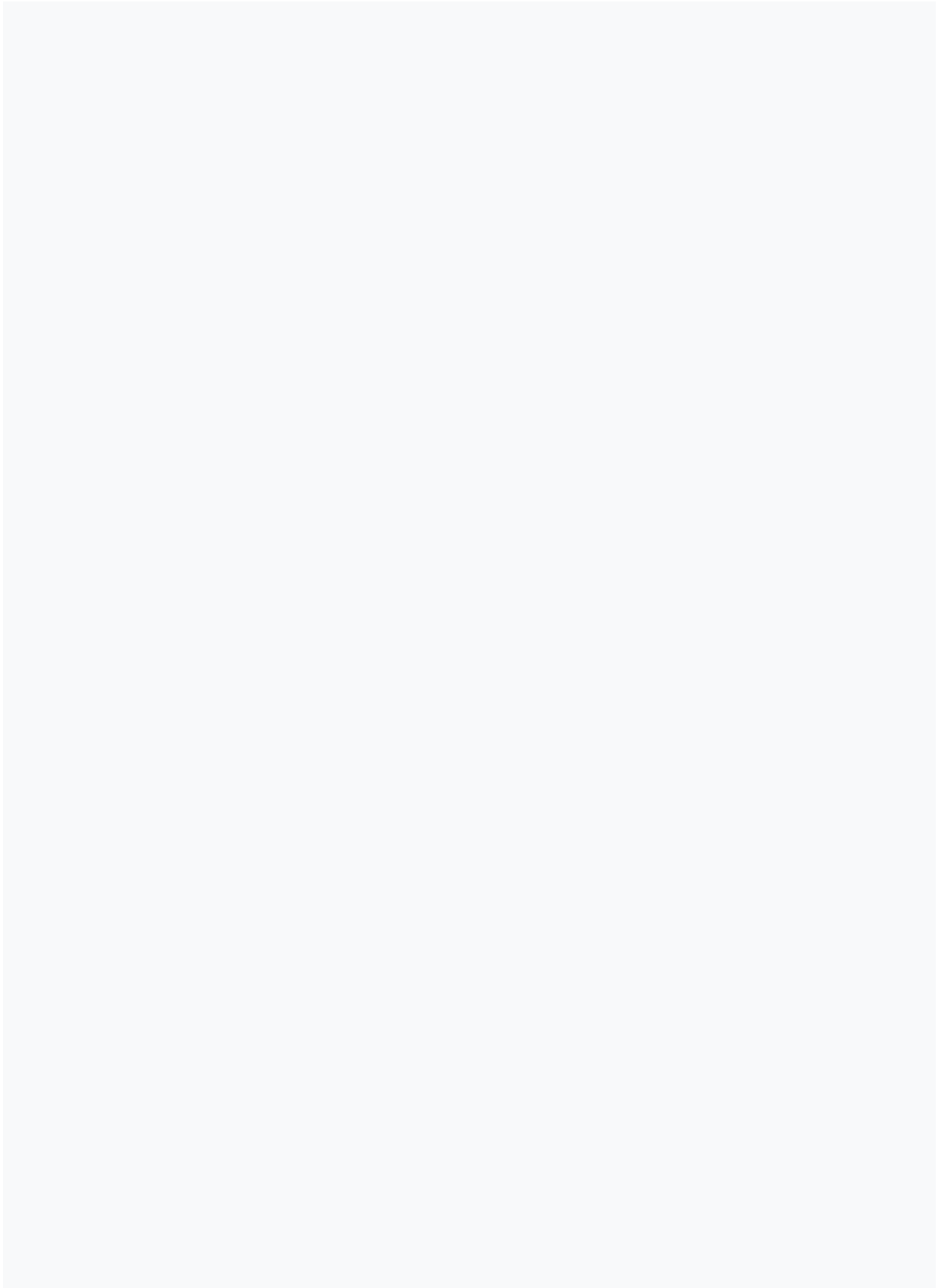


Рис 4.7 – перехідні характеристики САР гарантуючого управління

**4.6. Висновки за розділом.** В цьому розділі ми розробили структурну схему та перехідні характеристики САР гарантуючого управління.



## РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ В РОТАЦІЙНІЙ ПЕЧІ В РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

### **5.1. Існуюча програмно-технічна структура (ПТС) підсистеми управління процесом АСУТП підприємства та формулювання завдань щодо її розвитку для впровадження розробок.**

#### 5.1.1. Конкретизація задачі логічного керування технологічним процесом в ротаційній печі з теплоелектронагрівачем (ТЕНом)

В якості об'єкта модернізації системи автоматизації обраний процес випікання хліба в ротаційній печі з ТЕНом, апаратурно-технологічна схема котрого наведена на рис.5.1.

Візок із хлібними заготовками в ручному режимі подається в піч, куди після закриття і блокування двері (засувка ЗС, що блокує), подають вентилятором В1 (привод М1) атмосферне повітря, котре фільтрується та нагрівається за допомогою ТЕНу. Потужність ТЕНа складає 24кВт. При цьому, вентилятором В2 (привод М2) здійснюється виведення відпрацьованого повітря з печі в атмосферу. Для зволоження заготовок в піч подається пара з котельні через регулюючий клапан (Кл.). Візок із хлібними заготовками, під час випікання, обертається завдяки електроприводу М3. Зміна температури в печі забезпечується завдяки подачі на ТЕН змінного струму через регулюючий перетворювач (ЕУ). Вимірювання температури в печі здійснюється датчиком ТЕ, а відносної вологості – датчиком МЕ. Наявність пари необхідного тиску в паропроводі перевіряється датчиком-сигналізатором PS, а факт закриття двері датчиком GS. Процес випікання хліба в ротаційній печі складається з етапів: завантаження в піч візка із заготовками і закриття двері, етапу нагріву і зволоження, першого та другого етапів випікання, а також охолодження.

Послідовність етапів, що складає процес випікання хліба, після завантаження візка із заготовками і закриття двері (з їхнім блокуванням), є наступною.

Спочатку вмикається електропривод М3 для обертання візка з заготовками, потім вмикається вентилятор В2 (витяжка) і, протягом усього циклу випікання забезпечує висмоктування відпрацьованого повітря з печі. При цьому, вентилятором В1 подається в атмосферне повітря. Повітря, що подається в піч, фільтрується і нагрівається ТЕНОм спочатку до  $\theta_{\text{пов}} = 110^{\circ}\text{C}$ , а потім, через зволожувач, з котельні подається пара, завдяки чому вологість в печі досягає 70%. Через 3 хв. (180 с), на протязі котрих здійснюється етап зволоження хлібних заготовок, починається 1-й етап випікання, на котрому середовище в печі нагрівається до  $\theta_{\text{пов}} = 255^{\circ}\text{C}$ , та прогріває хліб у візку, який обертається, при цьому подача пара в піч припиняється. Через 10 хв. (600 с) починається 2-й етап випікання, на котрому температура середовища становить  $\theta_{\text{пов}} = 185^{\circ}\text{C}$ . Другий (останній) етап випікання триває 94 хв. (5640 с), після чого подається звуковий та світловий сигнал про завершення випікання хлібу, а нагрівач, вимикається, внаслідок чого хліб в печі остигає. Після остигання середовища в печі до температури  $\theta_{\text{пов}} = 35^{\circ}\text{C}$  (відносної вологості –  $M_{\text{пов}} = 40\%$ ), вимикаються вентилятори В1, В2 і привод М3, що обертає візок. Цикл вважається завершеним, виконується розблокування дверей, подається сигнал про завершення циклу випікання хлібу, і дозволяється відкривання дверей та вивантаження готового хлібу.

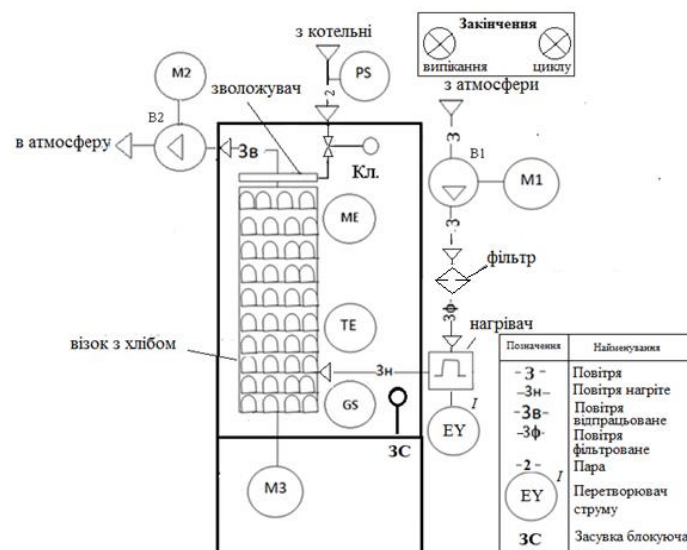


Рис. 5.1 – Апаратурно-технологічна схема процесу випікання хліба  
в ротаційній печі

Згідно до отриманих раніше вихідних даних (за дослідженнями з ідентифікації ОК) розглядалися регламенти на роботу ротаційної печі, основні з них наведені в табл. 5.1. Зазначимо, що в даному розділі використано для позначення відносної вологості повітря ідентифікатор М(%) замість прийнятого раніше –  $\varphi(\%)$ , тому що перший на відміну від другого співпадає з умовними позначеннями параметрів згідно до ДСТУ на умовні позначення в схемах автоматизації, котрі використані на рис. 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні нормативи ведення технологічного процесу

№	Найменування параметрів на етапі та його тривалість	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
					Тривалі (t→∞)		Тривалі (t→∞)
					Велич.	Велич.	
1	Температура середовища на етапі зволоження (3 хв.)	$\theta_{\text{пов1}}$	°С	110	±3	± 10	120
2	Температура середовища на 1-му етапі випічки (10 хв.)	$\theta_{\text{пов2}}$	°С	255	±3	± 10	120
3	Температура середовища на 2-му етап	$\theta_{\text{пов3}}$	°С	185	±3	± 10	120

	випічки (94 хв.)						
4	Відносна вологість (3 хв.)	$M_{пов}$	%	70	-0.5	-4	40

5.1.2. Формалізація регламентів, розробка алгоритмів автоматичного логічного керування пуском ділянки в роботу та нормальною зупинкою

Для складання регламенту функціонування ротаційної печі, як вихідні дані розглянемо такі характеристики обладнання(рис. 1):електродвигуни М1, М2та М3 керуються дискретно; засувка ЗС – запірна (дискретної дії); клапан подачі пари Кл. регульований (аналогової дії); через перетворювач струму здійснюється плавне регулювання ТЕНом.

Також використаємо дані попередніх досліджень з ідентифікації ОК за каналами керування температурою та вологістю, відповідно « $u_1 - \theta_{пов}$ » ,« $u_2 - M_{пов}$ », а також результати синтезу системи регулювання, що наведемо у табл.5.2.

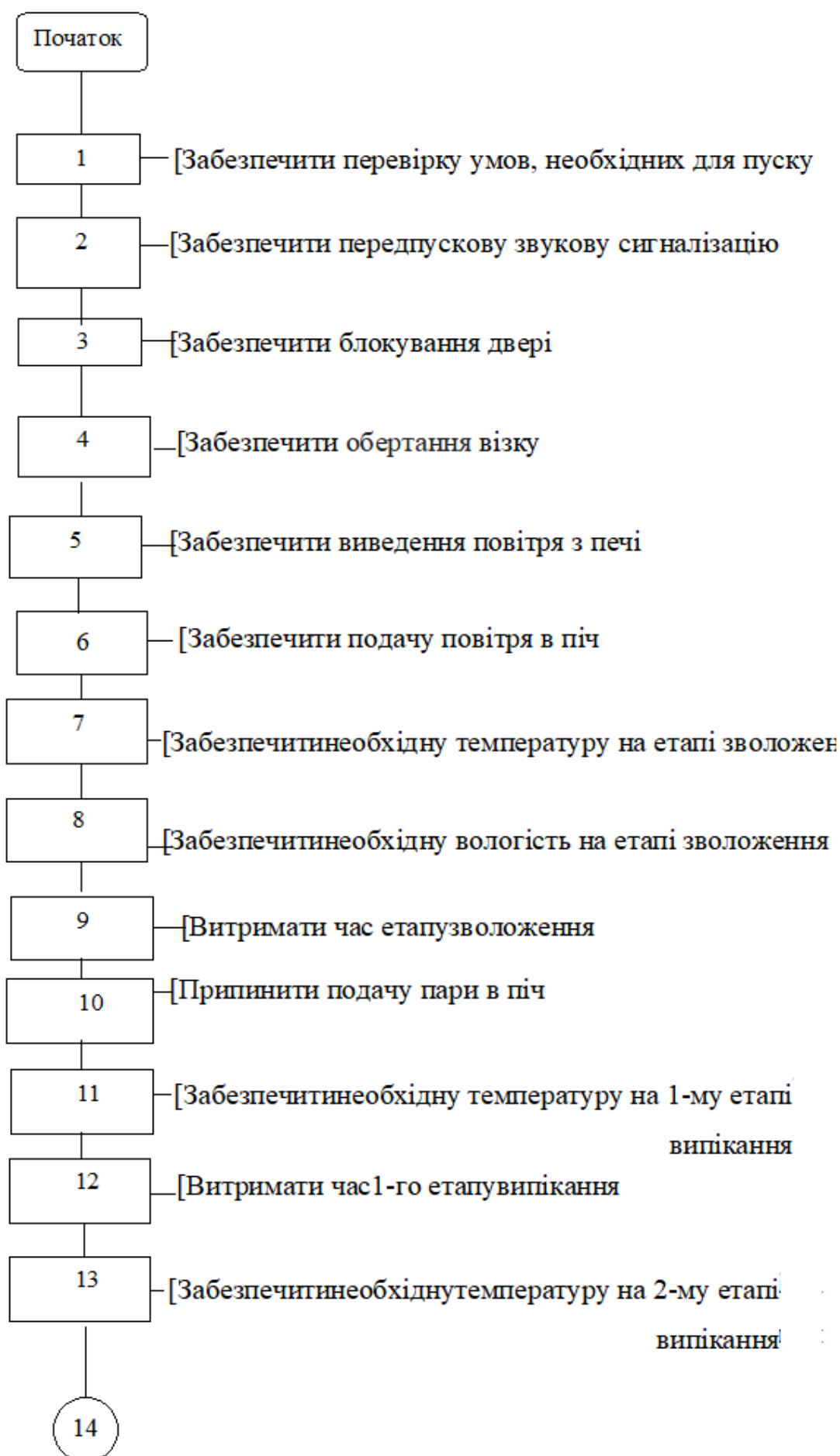
Таблиця 5.2 – Передатні функції прямих каналів об’єкта регулювання та параметри налаштування ПІ – регулятора

№	Канал	Модель 2-го порядку	Параметри ПІ – регулятора	
			$K_p$	$T_{из}$

1	$u_1 - \theta$	$W_0(p) = \frac{1,5 \cdot e^{-3p}}{(10p+1)^2}$	2,63	24,45
2	$u_2 - M$	$W_0(p) = \frac{0,375 \cdot e^{-12,5p}}{(21,25p+1)^2}$	7,35	58,2

5.1.3.Формалізація регламентів та розробка алгоритмів логічного управління для підсистем зупинки в нештатних ситуаціях.

Складемо блок-схему регламенту функціонування ротаційної печіза її пуском (рис.5.2.), згідно до наведеного вище словесного опису.



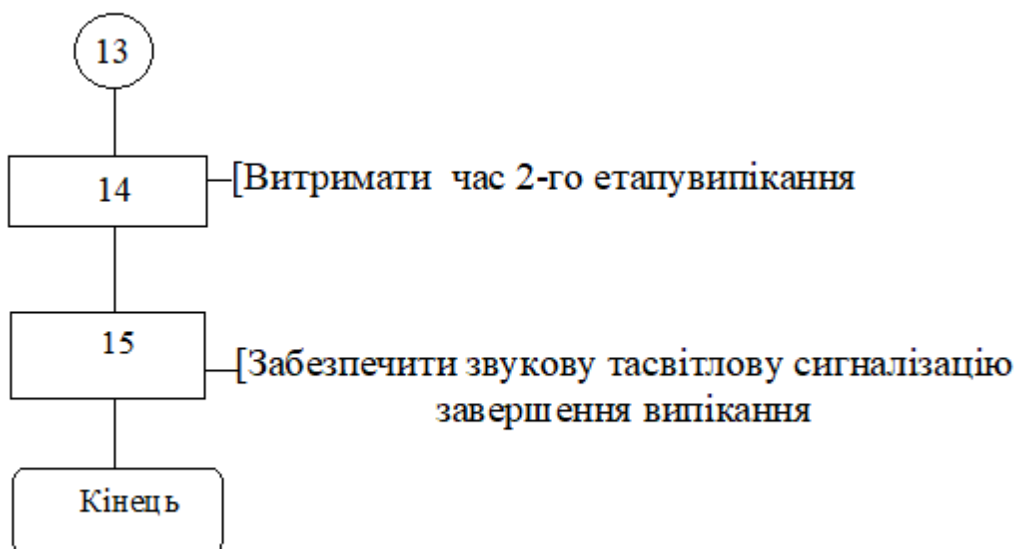


Рис.5.2 – Блок-схема регламенту функціонування ротаційної печі за її пуском  
 Складемо блок-схему регламенту функціонування ротаційної печі за її штатною зупинкою (рис. 5.3.).

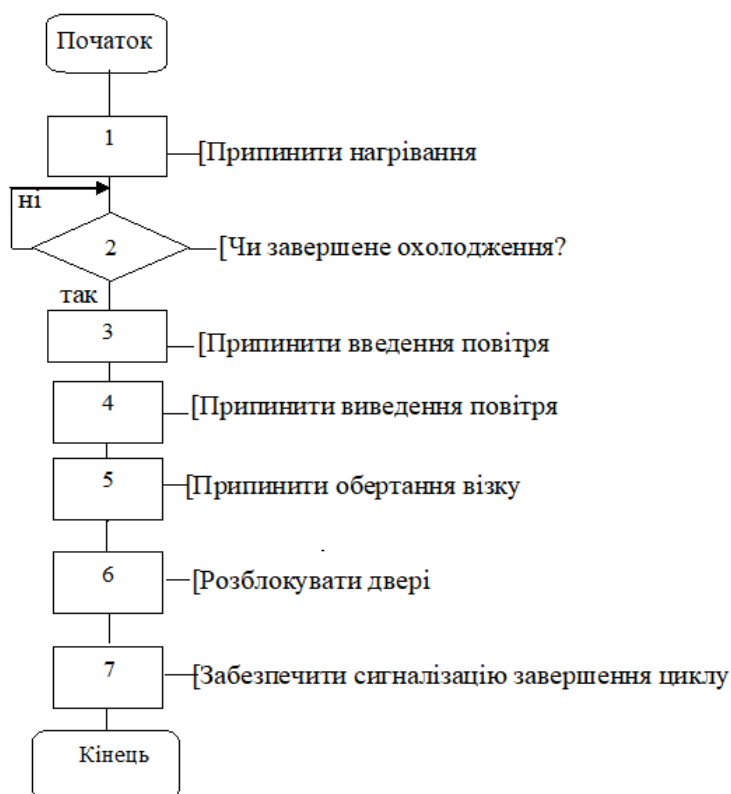


Рис. 5.3– Блок-схема регламенту функціонування ротаційної печі за штатною зупинкою

Розглянемо регламент функціонування ротаційної печі за аварійною зупинкою. Причиною аварійної зупинки печі, будемо вважати аварійну зупинку приводу М1 вентилятору повітря В1. Якщо перевірка в процесі випікання показує наявність аварії ( $M1=0$ ), необхідно негайно вимкнути ТЕН. Після чого, треба дочекатися охолодження повітря в печі (до температури  $\theta_{\text{пов}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  та відносної вологості  $-M_{\text{пов}} = 40\%$ ). Якщо охолодження завершено, треба припинити введення повітря та його виведення з печі, а також зупинити обертання візка. На завершення аварійної зупинки печі необхідно розблокувати двері та подати сигнал про зупинку агрегату.

Складемо блок-схему регламенту функціонування за аварійною зупинкою ротаційної печі (рис. 5.4.).



Рис. 5.4.– Блок-схема регламенту функціонування ротаційної печі за аварійною зупинкою ротаційної печі

Розробка алгоритмів автоматичного керування: за пуском, технологічною та аварійною зупинкою ротаційної печі.

На основі регламенту функціонування ТОК, складеному в попередньому підрозділі, розробимо алгоритми керування (тобто послідовність формування та видачі керуючих дій на ТОК) у вигляді окремих блок-схем, на аналогічних етапах циклу функціонування агрегату: керування за пуском та технологічною зупинкою.

**Пуск процесу** здійснюється за натисканням оператором кн. «PUSK».

Перед початком технологічного процесу перевіряються передпускові умови, тобто: зачинені двері печі ( $GS=1$ ) та наявний достатній тиск ( $PS=1$ ) в паропроводі. Якщо умови виконані, то починається процес. Спочатку включається передпускова сигналізація. Через 10 сек. вона виключається, засувка ЗС для блокування дверей закривається, а потім включається електропривод, який обертає візок з хлібом (МЗ), Оскільки потужність  $M3 \ll M2$ , витримку часу після його включення робити необов'язково. Після включення МЗ, включається електропривод М2 вентилятора, що виводить повітря з печі (В2), через витримку часу 10с включається електропривод М1 вентилятора В1, котрий подає повітря в піч. Після створення циркуляції повітря в печі включається регульований нагрівач, та задатчиком подається величина струму на 30% від максимально можливого. Коли температура середовища досягне нижньої межі діапазону –  $\theta_{пов} > 107^{\circ}\text{C}$  (за датчиком ТЕ), переключається керування ТЕНОм на вихід регулятора температури (КР  $\theta$ ), при цьому зовнішній задатчик регулятора ( $\theta^{зд}_{пов} = 110^{\circ}\text{C}$ ) повинен бути до нього підключений. Після включення КР  $\theta_{пов}$  відкривається Кл. пари в піч. Задатчик спочатку встановлюється на 80% діапазону, а після досягнення вологості до нижньої межі діапазону –  $M_{пов} = 67\%$  (за датчиком МЕ), переключається керування Кл. пари на вихід регулятора вологості (КР М), при цьому внутрішній задатчик регулятора вологості встановлений на 80%. Здійснення етапу зволоження триває 3хв. (180с), після чого для реалізації першого етапу випікання, відключається КР  $M_{пов}$  та підвищується

температура середовища печі до  $\theta_{\text{пов}} = 255^{\circ}\text{C}$  шляхом підключення до КР  $\theta_{\text{пов}}$  зовнішнього задатчика регулятора ( $\theta_{\text{пов}}^{\text{зд}} = 255^{\circ}\text{C}$ ). Здійснення 1-го етапу випікання триває 10хв. (600с), після чого для реалізації другого етапу випікання, знижується температура середовища печі до  $\theta_{\text{пов}} = 185^{\circ}\text{C}$  шляхом підключення до КР  $\theta_{\text{пов}}$  зовнішнього задатчика регулятора ( $\theta_{\text{пов}}^{\text{зд}} = 185^{\circ}\text{C}$ ). Здійснення 2-го етапу випікання триває 94хв. (5640 с), після чого подається звуковий сигнал (тривалістю 2с) та світловий про закінчення випікання.

Блок-схема алгоритму керування за пуском ротаційної печі наведена на рис.

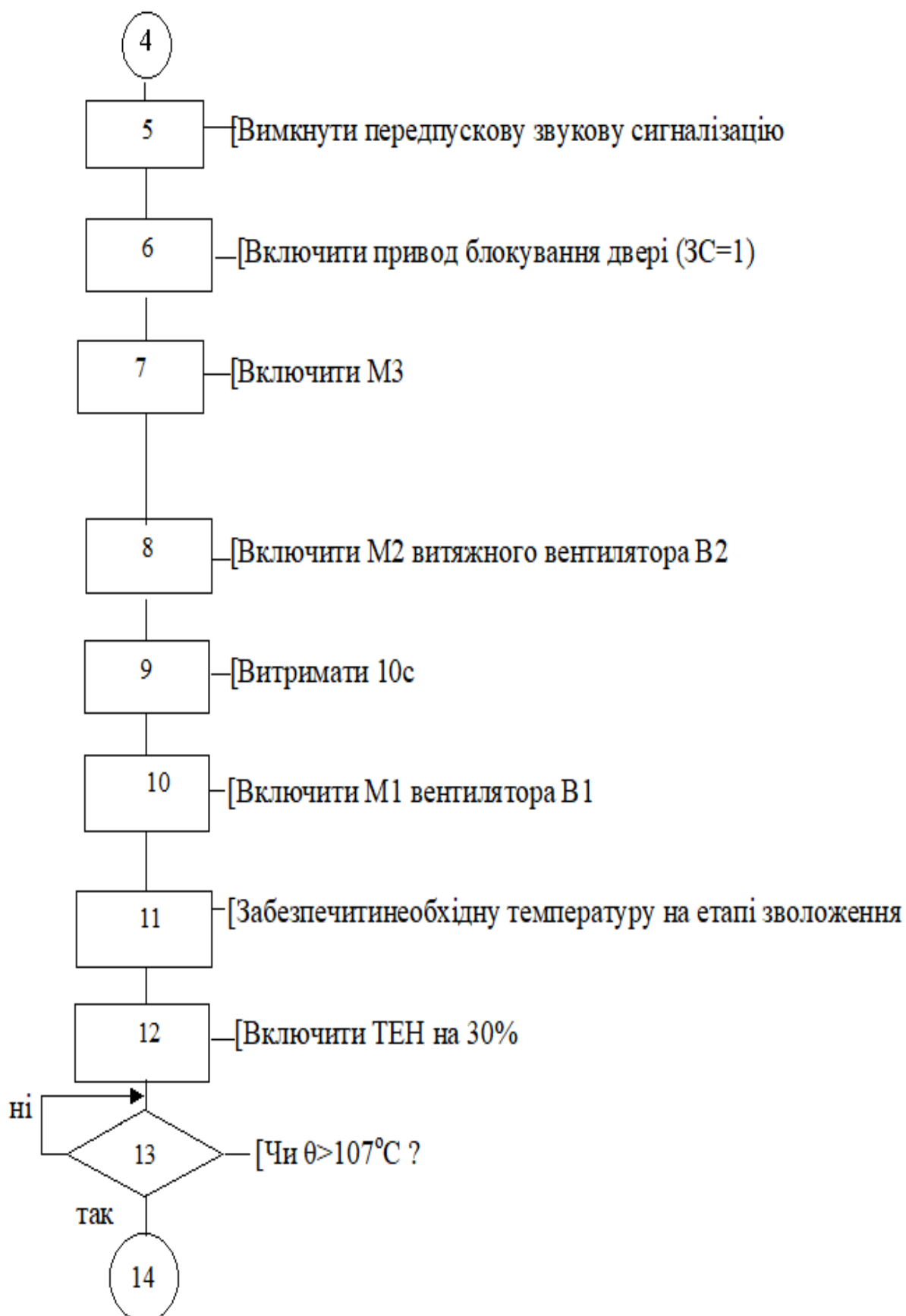
**5.5. Технологічна зупинка** здійснюється після появи звукового сигналу (2с)

та світловий про закінчення випікання, шляхом натискання оператором

кн. «STOP», після чого реалізується алгоритм технологічної зупинки печі.

По-перше, необхідно вимкнути КР  $\theta_{\text{пов}}$ , внаслідок чого відключається ТЕН, завдяки чому починається процес охолодження. За досягненням початкових значень температури охолодження –  $\theta_{\text{пов}} = 35^{\circ}\text{C}$ , відносної вологості  $M_{\text{пов}} = 40\%$ , вимикають електроприводи М1 та М2 вентиляторів В1 та В2. Після чого вимикають електропривод М3, обертання візку. Останньою дією є розблокування дверей вимиканням ЗС та подання сигналу про завершення циклу випікання. Блок-схема алгоритму керування за штатною зупинкою ротаційної печі наведена на рис. 5.6.





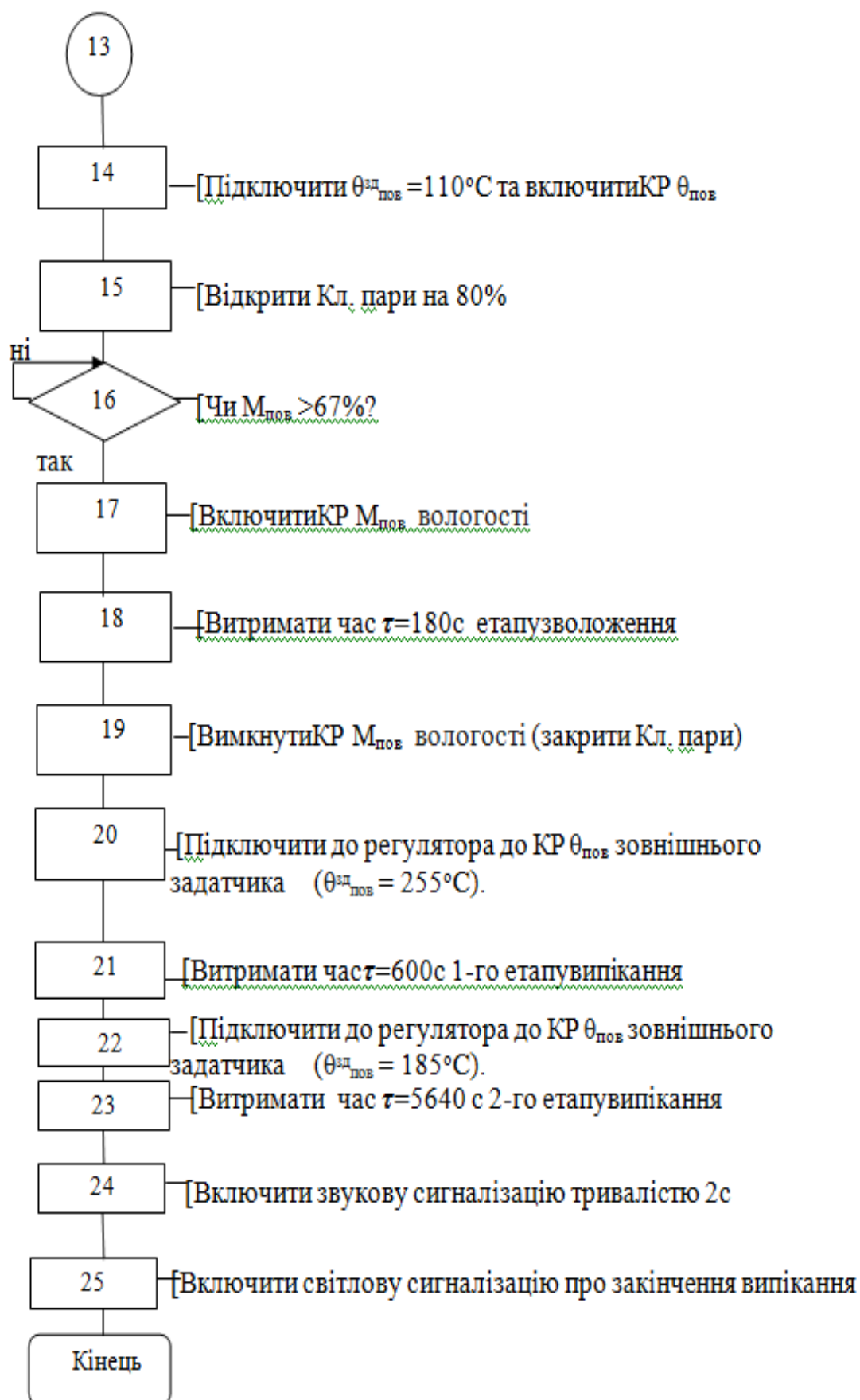


Рис. 5.5 – Блок-схема алгоритму керування ротаційною піччю за її пуском

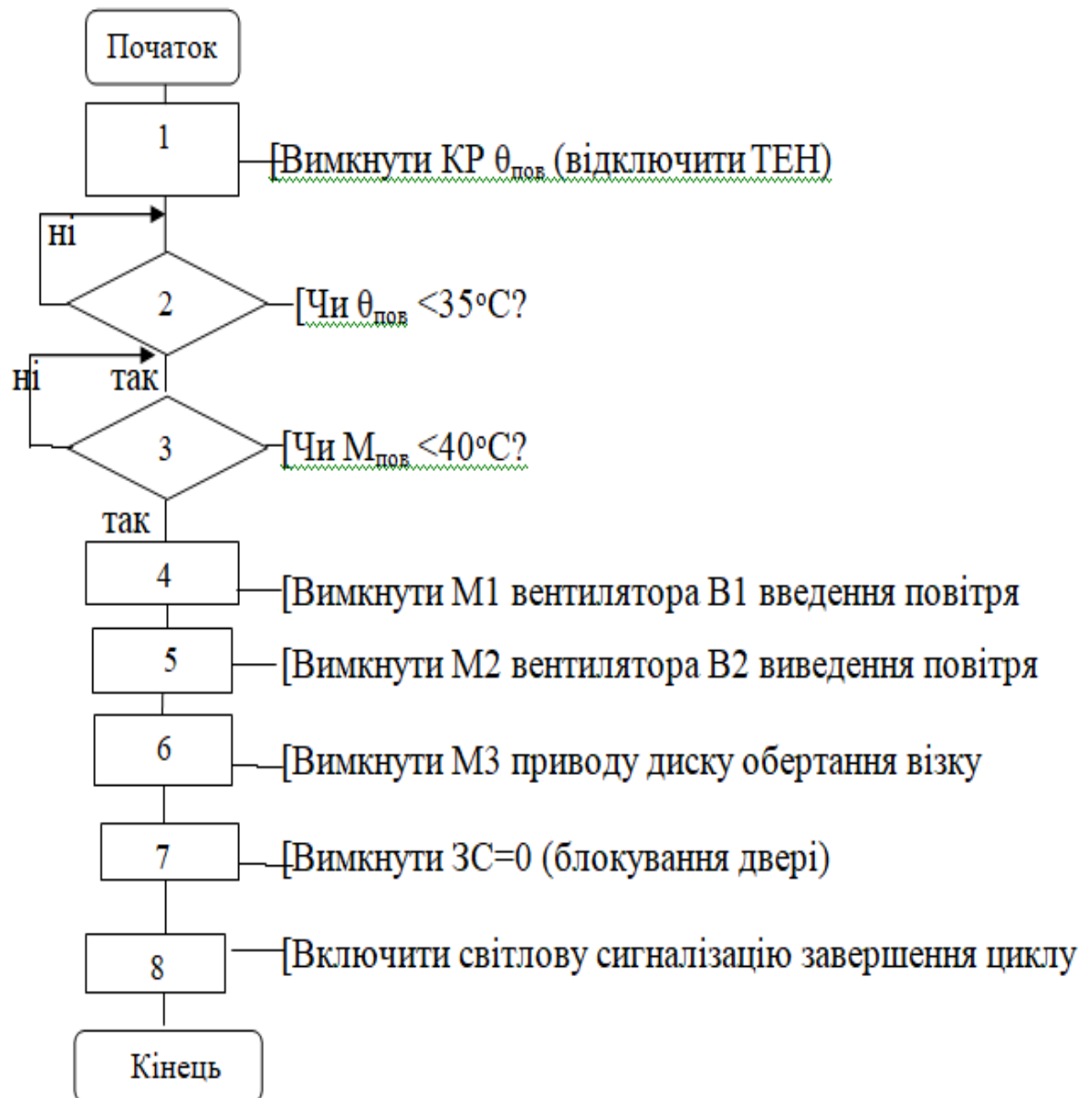


Рис. 5.6 – Блок-схема алгоритму керування ротаційною піччюзаштатною зупинкою

*Аварійна зупинка* здійснюється автоматично за сигналом аварійного вимикання електроприводу М1. Блок-схема наведена на рис. 5.7. Спочатку перевіряється наявність аварії, якщо її нема алгоритм завершений. Якщо перевірка в процесі випікання показує наявність аварії ( $M1=0$ ), негайно вимикається контур регулювання (КР  $\theta_{\text{пов}}$ ), внаслідок чого відключається ТЕН. Після чого, треба дочекатися охолодження повітря в печі (до температури 35 °С та відносної вологості 40%). Якщо охолодження завершено, треба вимкнути М2 (В2), а також вимкнути М3. На завершення

аварійної зупинки печі необхідно відключити блокування дверей ( $3C=0$ ) та подати сигнал про зупинку агрегату.

Складемо блок-схему регламенту функціонування за аварійною зупинкою ротатійної печі (рис. 5.7).

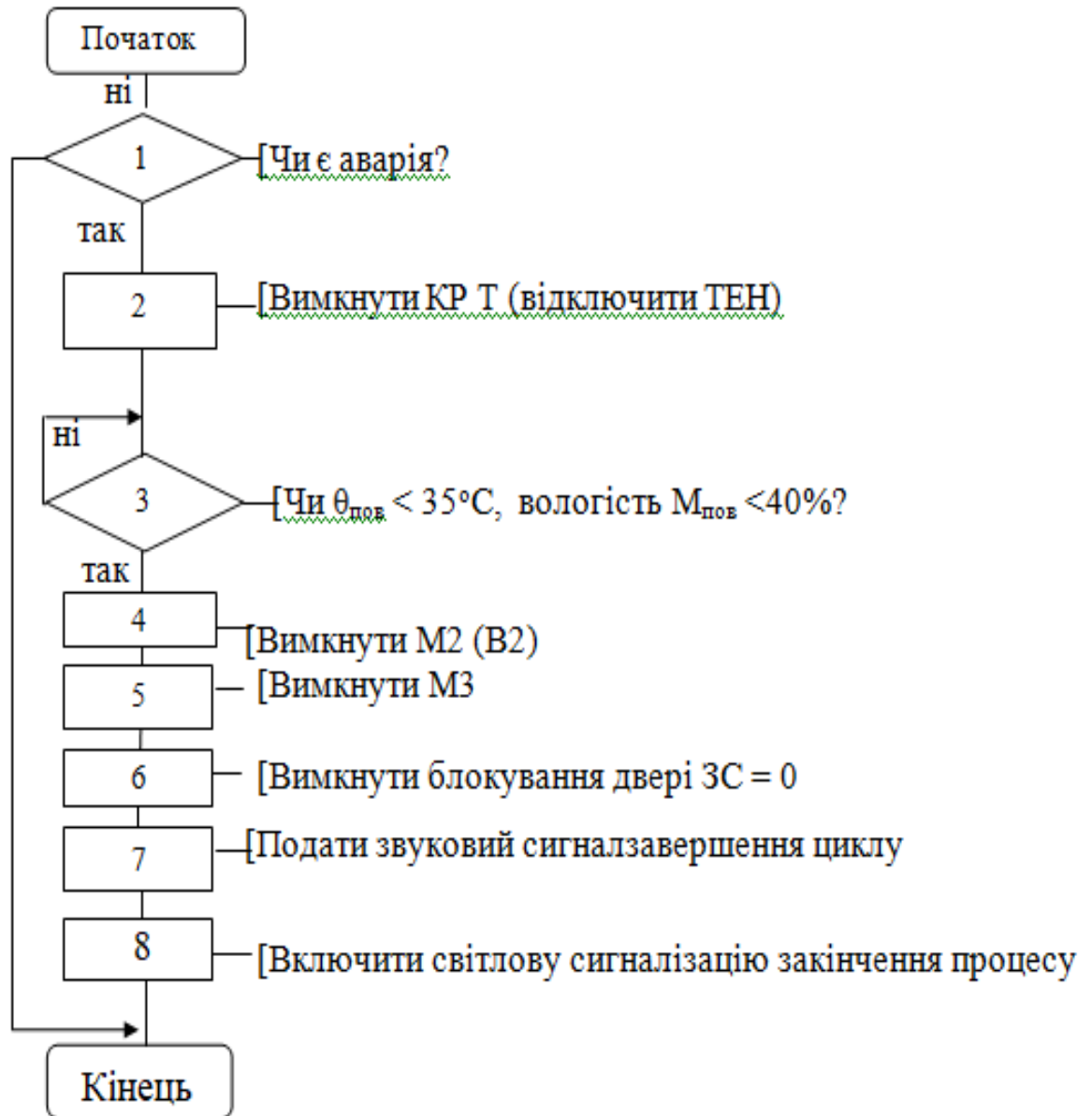


Рис. 5.7 – Блок-схема регламенту функціонування ротатійної печі за аварійною зупинкою ротатійної печі

5.1.4. Реалізація алгоритмів логіко-програмного управління в виді функціональної логічної схеми

ФЛС процесу наведена на рис. 5.8. Формування умов необхідних для запуску здійснюється елементом 12 за сигналами від датчику реле 1, який

вказує на зачинені двері ( $GS=1$ ), датчику реле 2 тиску( $PS=1$ ) пари в паропроводі, а також від кнопки «**PUSK**» 3, котрі приходять у схему, через ДЦП6-8. Підхоплення сигналу пуску здійснює RS-тригер 14. Після появи логічної «**I**» на виході RS-тригера включається передпускова звукова сигналізація (ППЗС). Витримку часу забезпечує таймер 15 (10 с). Формує сигнал включення на ППЗС елемент 16 «&» через ЦДП 17. По завершенні дії ППЗС від таймера 15 подається сигнал «**I**» на RS-тригер 22, потім на ЦДП 23 для блокування двері. Одночасно сигнал «**I**» подається на RS-тригер 25, потім на М3 (привод обертання візка), через ЦДП 26. Крім того, сигнал «**I**» подається на RS-тригер 27 і через ЦДП 28 включає М2 (привод витяжного вентилятора В2). Витримку часу забезпечує таймер 31 (10 с). Після витримки часу сигнал «**I**» подається на RS-тригер 29 і через ЦДП 30, включає М1 (привод вентилятора В1). Після включення М1, від RS-тригера 29, також, сигнал «**I**» подається на блок «&» 45, а потім на RS-тригер 46, від котрого сигнал іде до задатчика 47 (30%), звідки сигнал подається до перемикача 48 (зверху), та включає нагрівач ТЕН (на відповідний % потужності), через ЦАП 49 та перетворювач струму.

Датчик температури через АЦП 50 подає сигнал на регулятор 53, через який він подається на перемикач 48 (збоку). Одночасно датчик температури через АЦП 50 подає сигнал на пороговий елемент 51 ( $\theta > 107^\circ\text{C}$ ), через який (за виконанням умови) він подається на блок «&» 52, куди також, сигнал раніше подається від RS-тригера 46. Від блоку «&» 52 сигнал подається на перемикач 48 (знизу). Внаслідок перемикання блока 48, на ТЕН через ЦАП 49 та перетворювач току подається сигнал керування ( $u_1$ ) від регулятора температури 53. Від RS-тригера 46 сигнал «**I**», також, подається на задатчики 54 ( $35^\circ\text{C}$  – початкова температура в печі), 59 ( $110^\circ\text{C}$ ), та на перемикач 55 (знизу), завдяки чому, сигнал завдання від Н1 ( $110^\circ\text{C}$ ) передається через перемикачі 56, 57 та фільтр 58 на регулятор 53 (як зовнішнє завдання).

Після нагріву печі більш  $97^\circ\text{C}$  включається КР вологості. При цьому від RS-тригера 29, сигнал «**I**» подається на блок «&» 74 та 37, RS-тригер 38 і

датчик 39 (80%), подається сигнал до перемикача 40 (зверху), котрий відкриває клапан пари до зволожувача (на 70%), через ЦАП 43.

Датчик вологості через АЦП 44 подає сигнал на регулятор вологості, через який він подається на перемикач 40 збоку. Також, датчик вологості через АЦП 44 подає сигнал на пороговий елемент 42 ( $M > 69,5\%$ ), через який він (за досягненням нижнього порогового значення діапазону) подається на блок «&» 41. Туди, також, раніше поданий сигнал від RS-тригера 38. Від блоку «&» 41 сигнал подається на перемикач 40 знизу, що забезпечує підключення сигналу керування ( $u_2$ ) від регулятора вологості до клапану пари до зволожувача через ЦАП 43.

Переключення зовнішнього програмного датчика на режими згідно до етапів випікання здійснюється наступним способом. Витримку часу 180с (3хв.) етапу зволоження здійснює таймер 62 після чого, датчик **H2** 60 (255°C) подає сигнал на перемикач 60. Від таймеру 62 (180с) сигнал «I» ще йде на вхід «R» RS-тригер 38, та з інверсією на блок 37, що забезпечує скидання RS-тригеру 38 та закриття клапану пари. Крім того, той же сигнал «I» подається на перемикач 56 (знизу), завдяки чому завдання з **H2** 60 (255°C) подається через перемикач 57 і фільтр 58 на регулятор температури.

Аналогічно, за закінченням часу етапу зволоження та першого етапу випікання 780с (3+10 хв.), що здійснюється таймером 63, підключається датчик **H3** 61 (185°C), котрий подає сигнал через фільтр 58 до регулятора температури.

Від RS-тригеру 46, також, сигнал подається на таймер 64, котрий імітує час 6420с (3+10+ 93 хв.) етапів зволоження, першого та другого етапу випікання, після чого сигнал «I» поступає на вхід «S» RS-тригер 65, котрий зводиться і через ЦДП 75 включає світлову сигналізацію «Закінчення випікання» та одночасно забезпечує подачу імпульсу (таймер 73 – 2с) на пристрій звукової сигналізації НА.

Оператор почувши звуковий сигнал і побачивши світовий сигнал закінчення випікання (2-го етапу) перевіряє візуально (через вікно у двері печі) кольоровий стан виробів, і за задовільним результатом натискає кнопку «STOP», завдяки чому здійснюється штатна зупинка.

За натисканням кнопки «STOP» (імпульс 2-3хв.) сигнал «I» з ДЦП 5 поступає через суматор 24 на вхід «R» RS-тригера 14, завдяки чому він скидається до 0, і на входи «S» RS-тригерів 22, 25, 27 поступає сигнал 0, що дозволить їх скинути за приходом сигналів «I» на їхні «R» входи. Також сигнал «I» поступає на вхід «S» RS-тригера 9, звідки сигнал «I» через суматор 66 поступає на вхід «R» RS-тригера 46 та інверсний сигнал на вхід суматора 45, що забезпечить обнуління RS-тригера 46, внаслідок чого КР температури вимикається і ТЕН відключається. Процес охолодження в печі вважається закінченим, коли температура та вологість в ній повернуться до початкових значень, факт чого визначається за появою сигналів «I» на виході порогових елементів відповідно 70 та 69. Сигнали «I» через суматори 71, 33 та 36 поступає на входи «R» RS-тригерів 29, 27, 25, 22, що призводить до вимикання приводів М1, М2, М3 та розблокування двері, і, як наслідок, зупинки відповідних механізмів (В1, В2, обертання візка), а через витримку часу (через таймер 18) включає світлову сигналізацію закінчення циклу випікання. Остання сигналізація вказує на можливість для оператора відкриття двері та вивантаження готової продукції. .

Імітування аварійної зупинки після включення системи відображає аварійну виробничу ситуацію, пов'язану з виходом з ладу електроприводу М1. При цьому, сигнал «I» проходить через ДЦП 11 поступає на вхід «S» RS-тригера 67, звідки через суматор 66 повторює послідовність проходження сигналу для відключення ТЕНу, як за штатною зупинкою, та після охолодження послідовне відключення приводів М2, М3 та розблокування двері, а через витримку часу (через таймер 18) на зупинку відповідних механізмів (В2, обертання візка), включає світлову сигналізацію закінчення

циклу випікання. При цьому скидання тригеру 14 здійснюється через таймер 35 (2с для створення імпульсу), суматори 34 и 24.

Скидання низки тригерів 9, 19, 65, 67 для підготовки наступного циклу роботи здійснюється за наступним натисканням кнопки «PUSH».

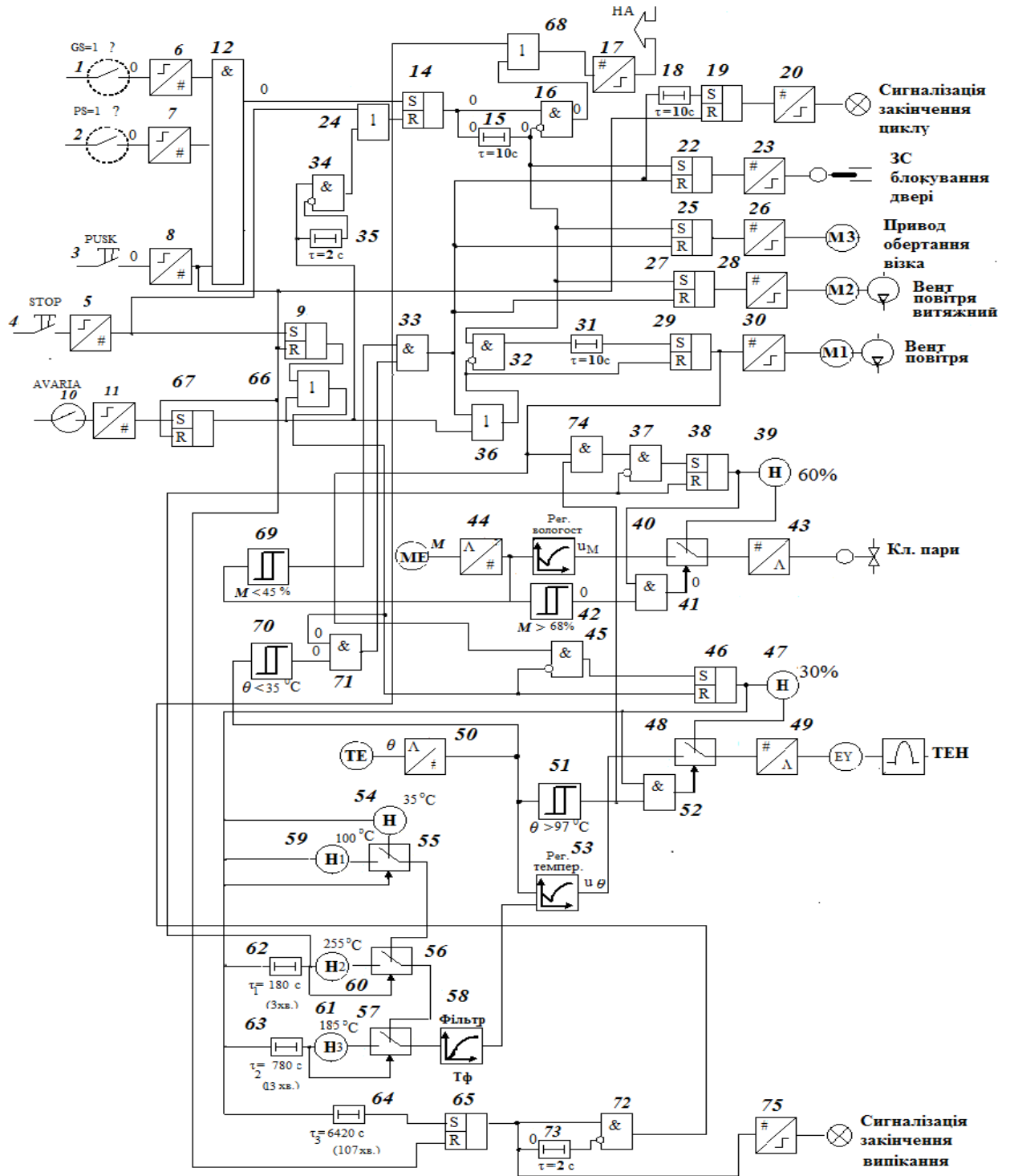


Рис. 5.8 – Функціонально логічна схема керування процесом випікання хліба в ротатійній печі

### 5.1.5. Імітаційне моделювання роботи алгоритмів логічного керування

#### 5.1.5.1. Розробка моделі системи логічного управління ТО засобами середовища MatLab/Simulink

Програма моделювання роботи САК наведена на рис.4.9. Для скорочення часу моделювання деякі параметри блоків масштабовані (зменшені), а саме: блок 180с Timer4 – 90с, блок 780с Timer5 – 380с, блок 6420с Timer6 – 1700с.

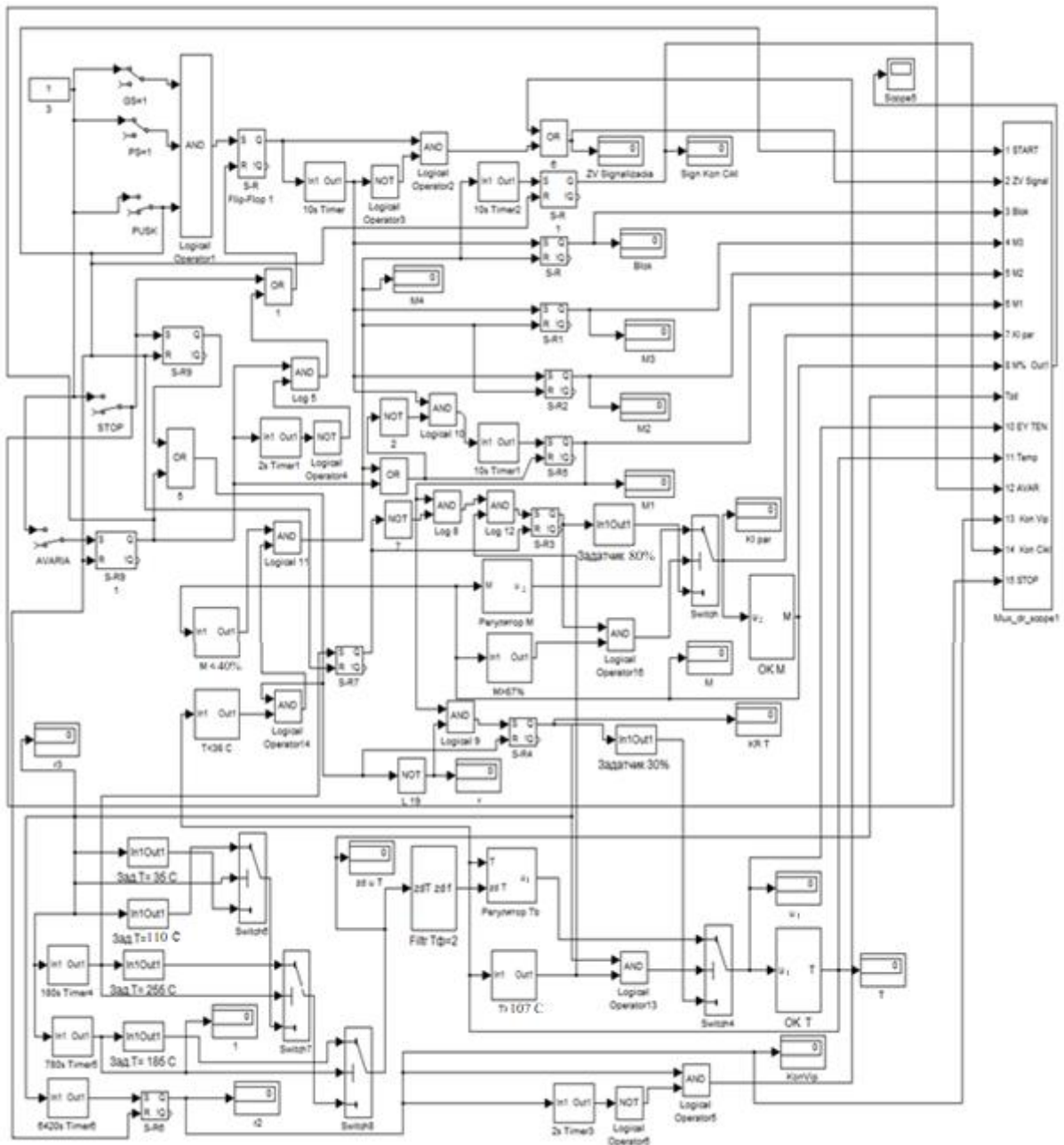


Рис. 5.9 – Схема моделювання роботи алгоритму керування за пуском, технологічною та аварійною зупинкою котла, реалізована в MATLAB

Моделювання роботи САК здійснюється в середовищі MATLAB, при цьому використані характеристики ОК, регламенти, параметри налаштування регуляторів та програми зміни температурних режимів випікання ідентичні здобутим у попередніх дослідженнях.

Формування умов необхідних для *запуску* здійснюється елементом AND (Logicaloperator1 – AND1) за сигналами від датчику реле GS=1, який вказує на зачинені двері, датчику реле тиску PS=1 наявність пари в паропроводі, також від кнопки PUSK. З AND1 сигнал надходить на вхід «S» тригера SRFlip-Flop 1, котрий зводиться, і через AND2 починає працювати передпускова звукова сигналізація (ППЗС). Витримку часу на ППЗС забезпечує таймер 10sTimer, сигнал від якого через інвертор (NOT3), потрапляє в логічний елемент AND2, вихідний сигнал із котрого, формує сигнал на ППЗС.

По завершенні дії ППЗС від таймера подається сигнал на вхід «S» тригера S-R для блокування дверей. Одночасно той же сигнал подається на вхід «S» тригера S-R1 для включення M3 та на S-R2 для включення M2 (B2). Через витримку часу, що забезпечує 10s таймер1, сигнал подається на вхід «S» тригера S-R5 для включення M1 (B1). Після включення B1, сигнал включення подається на AND8 (Logicaloperator8) та AND9 (Logicaloperator9) для включення контурів регулювання (КР) вологості та температури. КР температури починає працювати після приходу сигналу від AND9 через тригер S-R4 до задатчика 30%, котрий подає сигнал керування до перемикача Switch4 (знизу), через який подається на ОК Т, тобто включається через перетворювач струму нагрівач, відповідно на 30%. Сигнал виходу ОК Т, де імітується процес нагрівання, подається на регулятор температури (вх.1), вихід з котрого подається на перемикач Switch4 зверху. Також, сигнал температури подається на пороговий елемент ( $\theta > 107^{\circ}\text{C}$ ), за виконанням умови, сигнал з котрого, подається на блок AND13, куди, також, подається сигнал з виходу S-R4. Сигнал «I» від блоку AND13 подається на перемикач Switch4, що забезпечує перемикання виходу регулятора на вхід ОК Т. Крім

того, сигнал «I» зпорогового елемента ( $\theta > 107^\circ\text{C}$ ) подається на AND12, що дозволяє включення КР вологості.

Включення КР вологості здійснюється за поданням сигналу «I» на вхід «S» тригера S-R3 та через нього на датчик (80%). Сигнал завдання (ступень відкриття Клапана пари) подається до перемикача Switch знизу, і через нього подається на ОК М, тобто забезпечує відкриття на 80% клапан зволожувача.

Сигнал з виходу ОК М, де імітується процес зволоження, подається на регулятор вологості (М), вихід з котрого подається на перемикач Switchзверху. Також, сигнал вологості подається на пороговий елемент ( $M > 67\%$ ), за виконанням умови, сигнал з котрого, подається на блок AND16, куди, також, подається сигнал з виходу S-R3. Сигнал «I» від блоку AND16 подається на перемикач Switch, що забезпечує перемикання виходу регулятора на вхід ОК М.

Крім того, сигнал «I» від S-R4, також, подається на датчики ( $35^\circ\text{C}$ ), ( $100^\circ\text{C}$ ) та перемикач Switch6, що забезпечує формування зовнішнього завдання ( $100^\circ\text{C}$ ) через Switch7, Switch8 та Filtr на вх.2 регулятора температури. Після витримки часу зволоження, що здійснюється через таймер4 (180s), як зовнішній підключається датчик ( $255^\circ\text{C}$ )через Switch7, Switch8 та Filtrна вх.2 регулятора температури. Такожвід таймеру4 (180c) йде сигнал «1» на«S» вхід тригера S-R7, з виходу котрого сигнал «I» йде на«R» вхід тригера S-R3та одночасно через елементи NOT7, AND8, AND12, для встановлення «0» на «S» входітригера S-R3, що забезпечує вимикання КР вологості та закриття клапана пари.

Після витримки часу 1-го етапу випічки, що здійснюється через таймер5 ( $180+600=780\text{s}$ ), як зовнішній підключається датчик ( $185^\circ\text{C}$ )через Switch8 та Filtrна вх.2 регулятора температури.

Після витримки часу 2-го етапу випічки, що здійснюється через таймер6 ( $180+600+5640 = 6420\text{s}$ ), сигнал «I» подається на вхід«S» тригера S-R6, з виходу котрого сигнал одночасно забезпечує включення сигналізації про закінчення випікання та одночасно на вузол, що складається з2таймеру3,

елементів NOT6 та AND6 формування імпульсу (2с) на звукову сигналізацію (НА).

Оператор почувши звуковий сигнал і побачивши світовий сигнал закінчення випікання (2-го етапу) перевіряє візуально (через вікно у двері печі) кольоровий стан виробів, і за задовільним результатом натискає кнопку **STOP**», завдяки чому здійснюється штатна зупинка.

За натисканням кнопки «STOP» (імпульс 2-3хв.) сигнал «I» поступає через суматор OR1 на вхід «R» тригеру S-R Flip-Flop1, завдяки чому він скидається до 0, і на входи «S» тригерів S-R, S-R1, S-R2, поступає сигнал 0, що дозволить їх скинути за приходом сигналів «I» на їхні «R» входи. Також сигнал «I» поступає на вхід «S» тригеру S-R9, звідки сигнал «I» через суматор OR5 поступає на вхід «R» тригера S-R4 та інверсний (через NOTL19) сигнал на вхід суматора AND9, що забезпечить обнуління тригера S-R4, внаслідок чого КР температури вимикається і ТЕН відключається. Процес охолодження в печі вважається закінченим, коли температура та вологість в ній повернуться до початкових значень, факт чого визначається за появою сигналів «I» на виході порогових елементів відповідно  $T < 36^{\circ}\text{C}$  та  $M < 40\%$ . Сигнали «I» через суматори AND14, AND11 та OR поступає на входи тригерів «R» S-R5, S-R2, S-R1, S-R, S-R\_1, що призводить до вимикання приводів M1, M2, M3 та розблокування дверей, відповідно до зупинки відповідних механізмів (B1, B2, обертання візка), а через витримку часу (через 10с таймер2) включає світлову сигналізацію закінчення циклу випікання. Остання сигналізація вказує на можливість для оператора відкриття дверей та вивантаження готової продукції. .

Імітування аварійної зупинки здійснюється після включення системи, її пуску та виникнення АВАРІЇ, що відображає аварійну виробничу ситуацію, пов'язану з виходом з ладу електроприводу M1. При цьому, сигнал «I» поступає на вхід «S» тригеру S-R9\_1, звідки через суматор OR5 повторює послідовність проходження сигналу для відключення ТЕНу, як за штатною зупинкою, та після охолодження послідовне відключення приводів M2, M3

та розблокування дверей, відповідно, як наслідок, зупинку відповідних механізмів (B1, B2, обертання візка), а через витримку часу (через 10s таймер2) включає світлову сигналізацію закінчення циклу випікання. При цьому скидання тригеру S-RFlip-Flop1 здійснюється через 2s таймер1 (2с для створення імпульсу), блок інверсії, суматори AND5 и OR1.

Скидання низки тригерів S-R91, S-R1, S-R6, S-R9 для підготовки наступного циклу роботи здійснюється за наступним натисканням кнопки «**PUSK**», за рахунок подання імпульсу на входи «R» відповідних тригерів.

Програма ПІ-регулятора із зовнішнім завданням в КР температури наведена на рис. 5.10,а вологості - на рис. 5.11.

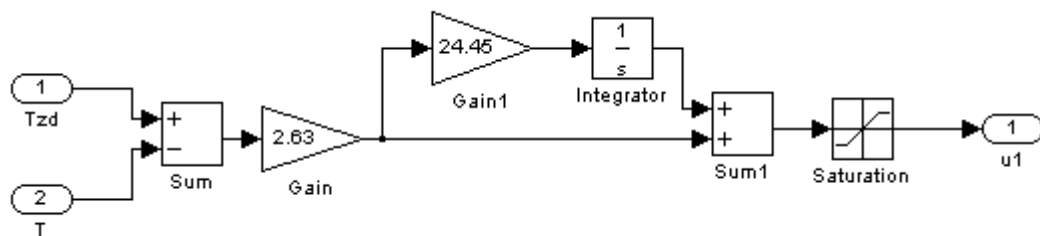


Рис.5.10 – Схема програми регулятора із зовнішнім задатчиком в КР температури

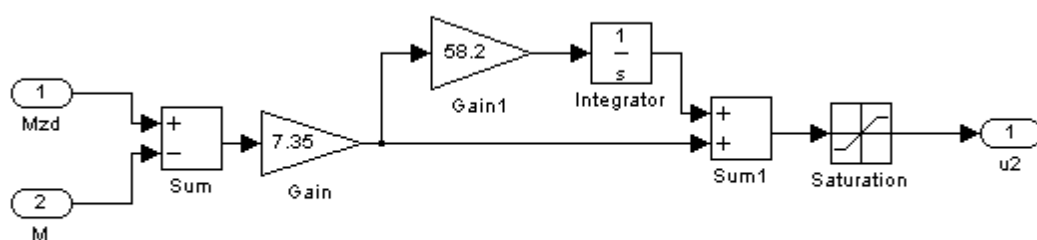


Рис.5.11 – Схема програми регулятора із зовнішнім задатчиком в КР вологості

Усі сигнали контрольованих змінних, а також ті, що керують ТЕНом, клапаном пари, двигунами електроприводів та сигнали, що формуються

оператором, від кнопок «START» і «STOP» подаються на Score5 через MUX\_dr\_score 1, схема котрого наведена на рис. 4.12.

Таким чином, робота ФЛС, що розроблена, повністю відображена в роботі програми в середовище MATLAB.

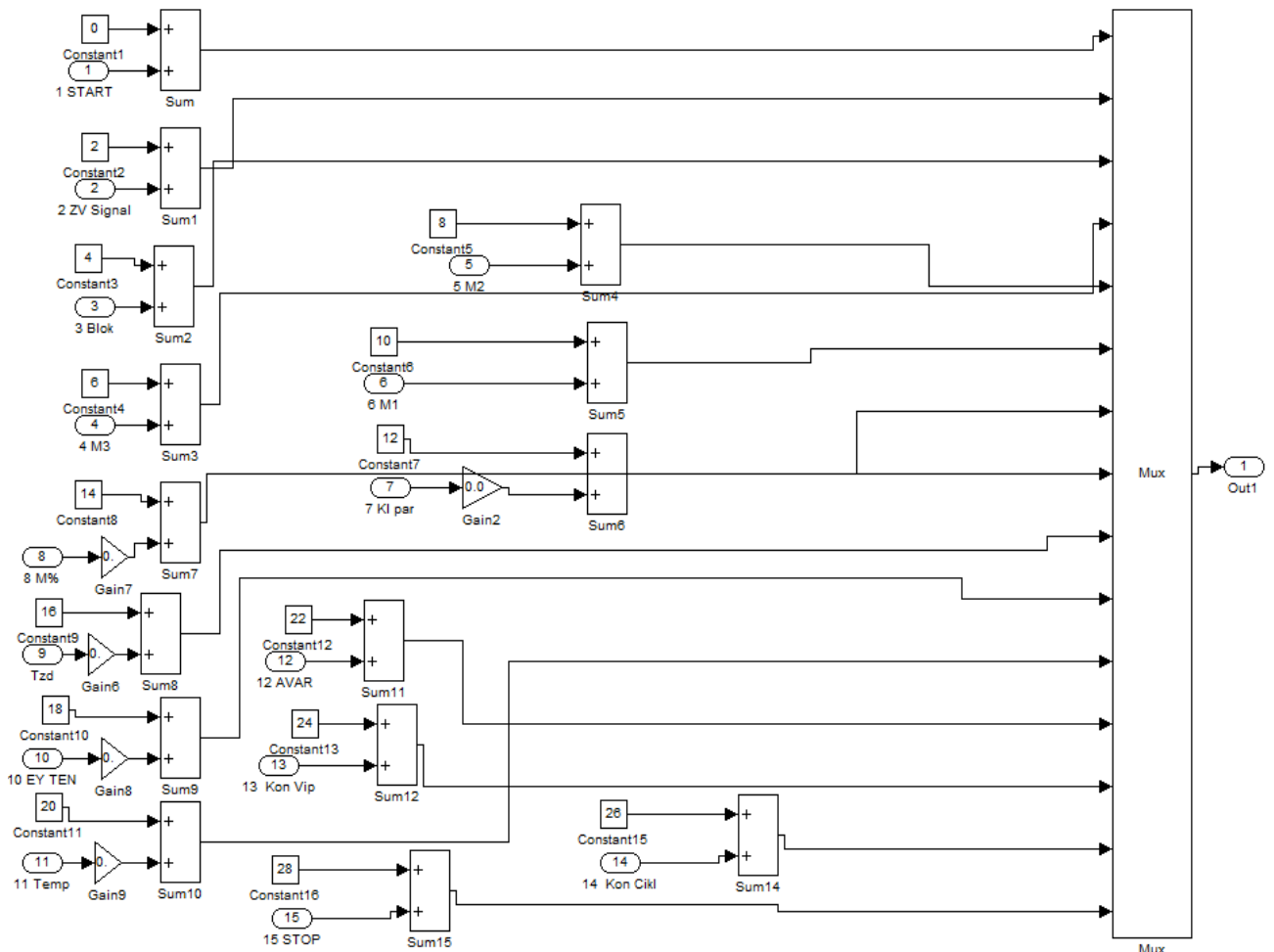


Рис.5.12 – Схема моделювання роботи блоку MUX\_dr\_score 1, що реалізована в MATLAB

#### 5.1.5.2. Результати моделювання роботи САК/СЛК

На рис. 5.13, 5.14 наведені часові графіки змінних (Діаграма роботи системи керування), що відображають реальну послідовність керування пристроями КТЗ (ТЕНом, клапаном пари, приводами вентиляторів, диском обертання, пристроєм блокування замку, світлової та звукової сигналізації і ін.).

На рис. 5.13 наведено діаграму роботи системи керування за пуском та в штатному режимі зупинки, що здійснюється за натисканням оператором кнопки «STOP».

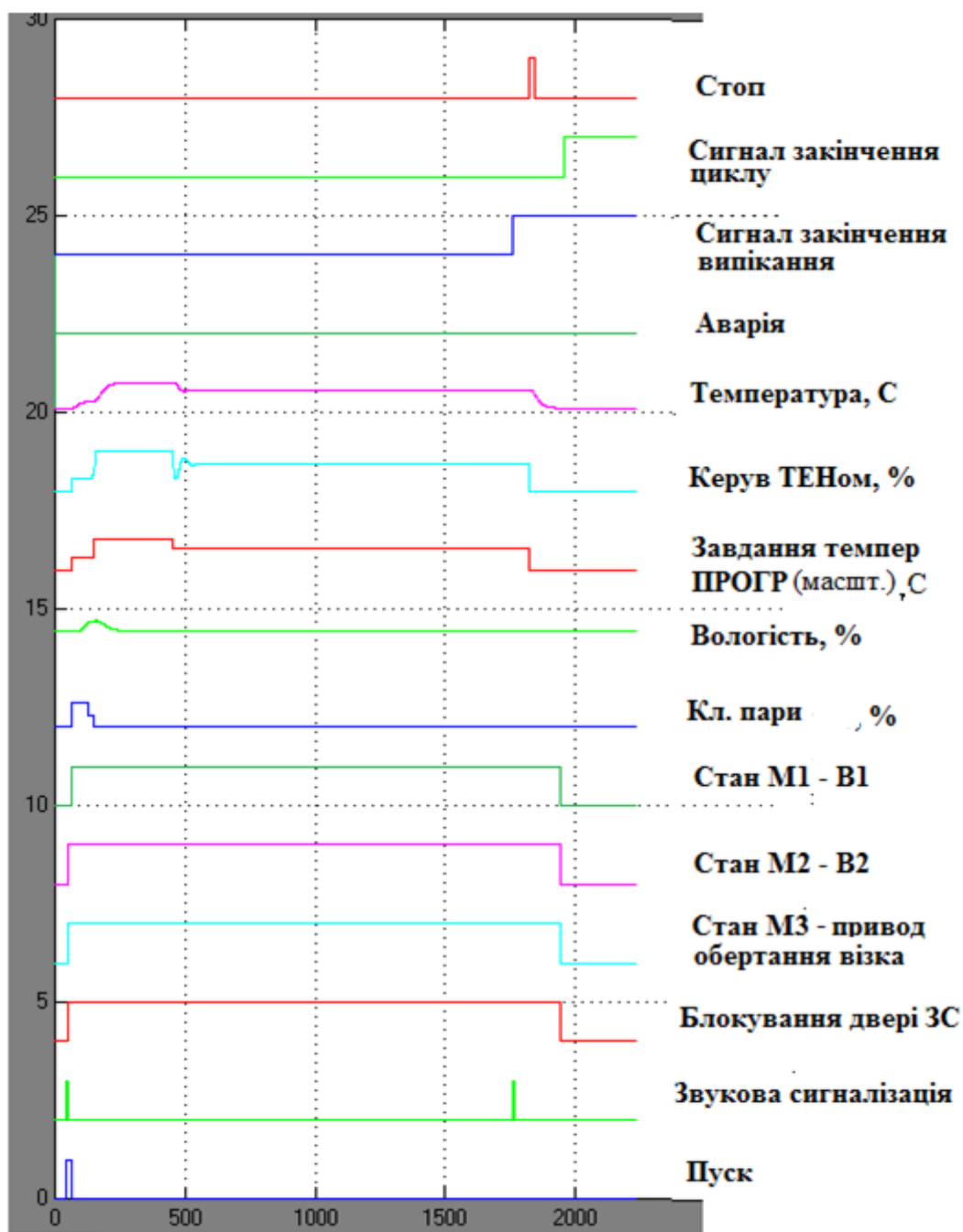


Рис. 5.12 – Діаграма роботи системи керування ротаційною піччю в штатному режимі

На рис. 5.14 наведено діаграму роботи системи керування за пуском та в аварійному режимі зупинки, що відповідає аварійній зупинці електроприводу

M1 вентилятору повітря. При цьому кнопка «STOP» оператором не натискається.

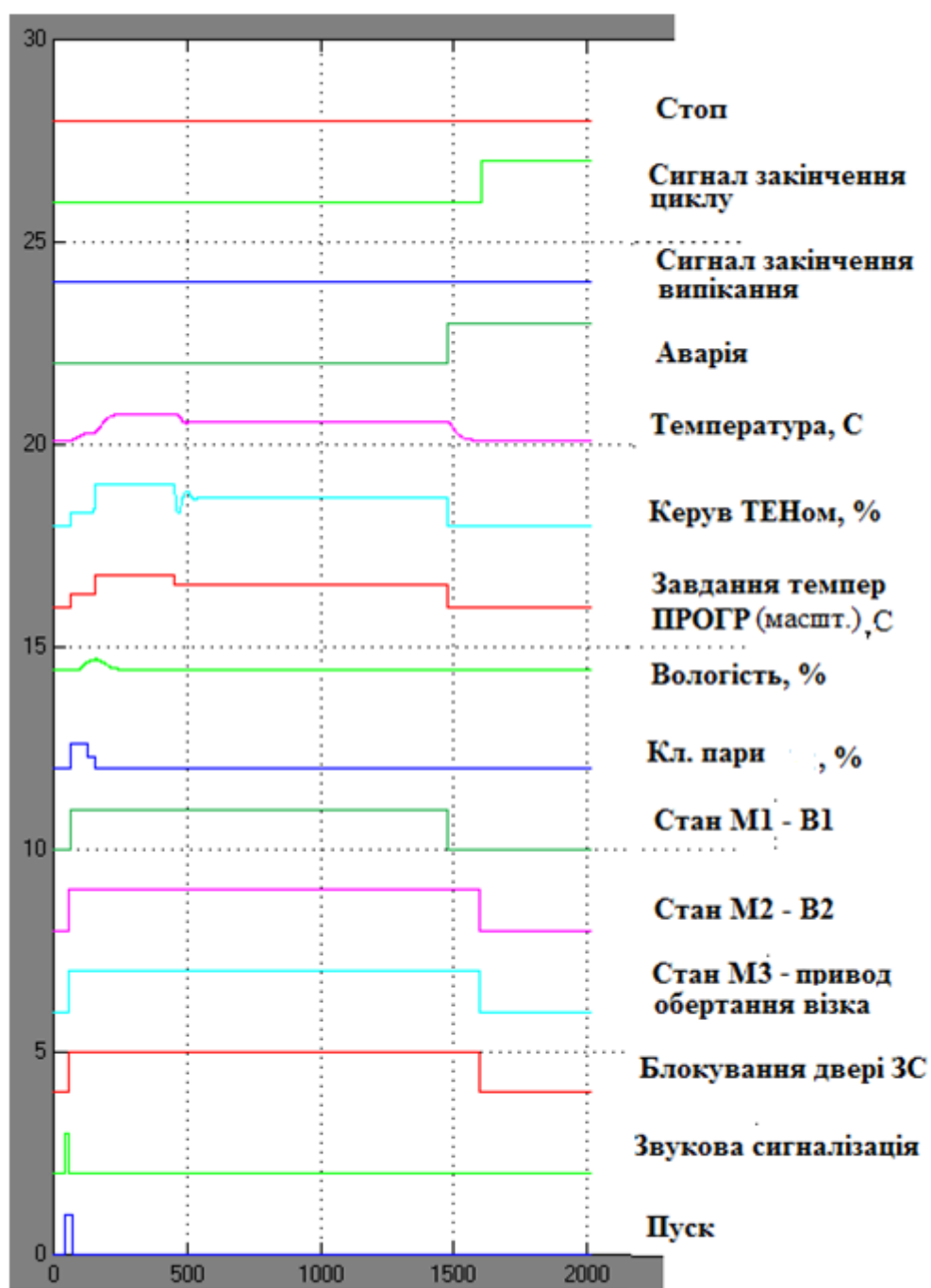


Рис. 5.14 – Діаграма роботи системи керування ротаційною піччю в аварійному режимі

#### 5.4. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.

##### 5.4.1. Розрахунок інвестиційних витрат на модернізацію системи

автоматизації за її обраним варіантом

В даному розділі дипломного проекту буде обґрунтована економічна доцільність впровадження обраного варіанту розробленої системи автоматизації. Для розрахунку економічних показників обраного варіантів модернізованої САК будуть враховані ціни на придбання комплексу технічних засобів, датчику температури, тиску, та кабельної продукції.

Табл. 5.3- Вартість придбання засобів автоматизації

Найменування	Тип, марка	Кількість	Оптова ціна з ПДВ, грн	
			За одиницю	Сума
Датчик температури	TEPA	1	620	620
Датчик вологості	SCORPION	1	1000	1000
Реле твердотільне універсальне (трифазне)	SSR-3DA60A	1	1 402,54	1 402,54
Виконавчий механізм	<a href="#">Belimo</a> <a href="#">AVK24A-3-TPC</a>	1	28 142	28 142
Датчик-реле тиску	РД-5	1	239,20	239,20
Датчик положення індуктивний	LJ12A3-4-Z-BX	1	84,62	84,62
Засувка з електромагнітом	GAMA S285	1	220,50	220,50
Багатофункціональний прилад	БРУ-7	2	2000	4000

Продовження табл. 5.3

Перетворювач інтерфкйсів	PC ADAPTER USB A2 (SM USB to MPI) , USB CABLE 5M INCLUDED MPI KABEL, 0,3M (6GK1571- 0BA00- 0AA0).	1	1790,88	1790,88
Контролер програмований	SIMATICS7- 300, CPU313C-2DP	1	40303	40303
Модуль аналогового вводу	SM 331- 7KF02-0AB0	1	56050,36	56050,36
Модуль аналогового виводу	SM332- 5HB01-0AB0	1	10 239,20	10 239,20
Блок живлення	PS 307	1	4045	4045
Персональний комп'ютер		1	30000	30000
Магнітний пускач	ПМА 3221	3	3399,38	10 198,14
Кнопка	KME 4201	6	55	220
Резистор	C2-23-500	8	1	8
Дзвоник електричний	UWE	1	50	50
Автоматичний вимикач триполюсний	AK-63	1	150	150
Запобіжник із плавкою	ВПТ	1	38	38

вставкою				
Перемикач	ELFIN 22	3	78,72	236,16
Кнопка	ELFIN 22	4	96	384
Реле проміжне	Weidmuller PS 35836971	5	150	750
Світлосигнальна арматура	ELFIN 22	5	24	120
Вимикач автоматичний	BA47-29M	4	49	245
Патрон настінний	косий E27 ФнП-03	1	16,28	16,28

Продовження табл. 5.3

Трансформатор	ТСБЗ-220/36В	1	1400	1400
Розетка	РШ-0-2	2	87	174
Розетка	РШ-0-3	2	200	400
Вимикач	ПВ-1-16	5	2,91	14,55
Блок живлення стабілізов.	«ОВЕН» БП60Б-Д4-24	1	2 815,20	2 815,20
Джерело безперебійного живлення (UPS)	Power Must 800VA	1	6000	6000
Щит	SCHROFF CONSEPTLIN E EMC 600x600x420 мм		31754,65	31754,65
Клемна колодка	conta-conect SRK 2,5/2A	2	45	90
DIN- рейка		3м	90	90
Проф.шина		0,5м	717	717
Короб монтажний		9м	72	72
Провод монтажний	ПВЗ*05	87м	2,62 за 1	227,94
Кабельна контрольний мідний	КВВГнг5x2,5	60м	28,95	1 737
Кабельна контрольний мідний	КВВГ5x1,5	30 м	19,33	579,90
Кабельна	КВВГ4x2,5	30м	22,38	671,4

контрольний мідний				
Кабельна контрольний мідний	КВВГ4х1,5	10 м	16,04	160,40
Дріт з'єднувальний	ПВСн 2*1	72м	4	288
Труба стальна водогазопровідна	МР20х2,5	240м	3	720
Дрот з'єднувальний мідний	ПРТО1*4	40м	6	240
Кабель силовий мідний	ВВГнгд 3х25	22м	36,43	801,46
Дріт з'єднувальний мідний	ПВСн2*1+1*1	5 м	32	160

Продовження табл. 5.3

PC Adapter USB	SIEMENS SIMATIC S7	1	5289	5289
Всього				250 305,38

5.4.2. Розрахунок змін основних показників діяльності підприємства, джерел інвестування й інвестиційної привабливості

В результаті модернізації ротаційої печі брак продукції не повинен перевищувати 2% (Кбр1) (брак продукції до модернізації 4% (Кбр2)) .

Ціна за 1т продукції – 14000 грн(Цод.пр.);

Продуктивність ротаційої печі (П)- 4,32 т/діб;

Час роботи 300 діб в рік (Т);

Продажна вартість САР на базі SIEMENS 250 305,38 грн(Цпрсар).

1) Обсяг виробництва ОВ рік =П\*Т ОВ рік =4,32\*300= 1 296 т/рік;

2) Визначемо кількість браку до і після модернізацій:

Бр1=ОВ\*Кбр1=1 296\*0.04=51,84 т;

Бр2=ОВ\*Кбр2=1 296\*0.02=25,92 т;

3) Визначимо обсяг реалізованої продукції до і після модернізації:

ОР1 = (ОВ-Бр1) \* Цод.пр. =(1 296-51,84)\* 14000=17 418 240грн;

ОР2 = (ОВ-Бр2) \* Цод.пр. =(1 296-25,92)\* 14000=17 781 120грн;

4) Визначимо суму первинних інвестицій:

$$ІС САР = (Цпрсар + Цпрсар * Км + Цпрсар * Нт/100 + Цпрсар * Нтр/100) + (Цпрсар + Цпрсар * Нт/100 + Цпрсар * Нтр/100) * Нзс/100 / = Цпрсар * 1,165, де:$$

Цпрсар - продажна вартість засобів автоматизації;

Км – коефіцієнт відрахувань на монтажні роботи,

Км = 0,1;

Нт – норматив відрахувань на тару та упакування,

Нт = 0,25%; Нтр - норматив відрахувань на транспортні витрати,

Нтр = 5%;

Нзс – норматив відрахувань на заготівельно-складські витрати,

$$H_{zc} = 1,2\%;$$

$$IC = 1,165 * 250\,305,38 = 291\,605,77 \text{ грн.}$$

5) Визначимо заміну амортизаційних відрахувань за рахунок модернізації САР:

$$\Delta A = IC * H_a, \text{ де}$$

$H_a$  - норма річних амортизаційних відрахувань для засобів автоматизації, яка дорівнює 50%;

$$\Delta A = 291\,605,77 * 0,5 = 145\,802,88 \text{ грн.};$$

6) Визначимо річну зміну повної собівартості продукції за рахунок модернізації САР:

$$\Delta C_{п} = \Delta A = 145\,802,88 \text{ грн.};$$

7) Визначимо приріст прибутку підприємства за рахунок впровадження САР:  $\Delta П = П_2 - П_1$ , де  $П_1 = ОР_1 - C_{п1}$ ;

$П_2 = ОР_2 - C_{п2}$ , звідки  $\Delta П = ОР_2 - C_{п2} - ОР_1 + C_{п1} = ОВ * Ц_{од.пр} - Бр_2 * Ц_{од.пр} - C_{п1} - \Delta A - ОВ * Ц_{од.пр} + Бр_1 * Ц_{од.пр} + C_{п1} = (Бр_1 - Бр_2) * Ц_{од.пр} - \Delta A = \Delta Бр * Ц_{од.пр} - \Delta A$

$$\Delta П = (51,84 - 25,92) * 14000 - 145\,802,88 = 217\,077,12 \text{ грн.};$$

8) Визначимо приріст чистого прибутку:

$$\Delta ЧП = (\Delta П - \Delta A) * (1 - Пп), \text{ де}$$

$Пп$  - податок на прибуток, який дорівнює 18%.

$$\Delta ЧП = (217\,077,12 - 145\,802,88) * 0,82 = 71\,274,24 \text{ грн.};$$

9) Визначимо приріст чистого грошового потоку:  $\Delta ЧГП = (\Delta ЧП + \Delta A) = 71\,274,24 + 145\,802,88 = 217\,077,12 \text{ грн.}$

### 5.5. Висновок за розділом.

В результаті виконання 5 розділу кваліфікаційної роботи для даного технологічного агрегату були складені регламенти функціонування та алгоритми пуску-зупинки ротаційної печі в штатному та аварійному режимах, розроблена функціональна логічна схема керування ротаційної піччю, побудована імітаційна модель її реалізація на ЕОМ, за допомогою середовища MATLAB. Можемо зазначити, що алгоритми керування, які були

розроблені, а також характеристики отримані при моделюванні роботи САК достатньо точно співпадають з реальними технологічними процесами випікання хліба в ротаційній печі.

Також було доопрацювання технічної структури АСУТП для реалізації розробок та розробка, налагодження, тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів управління та оцінка економічної ефективності впровадження розробок.

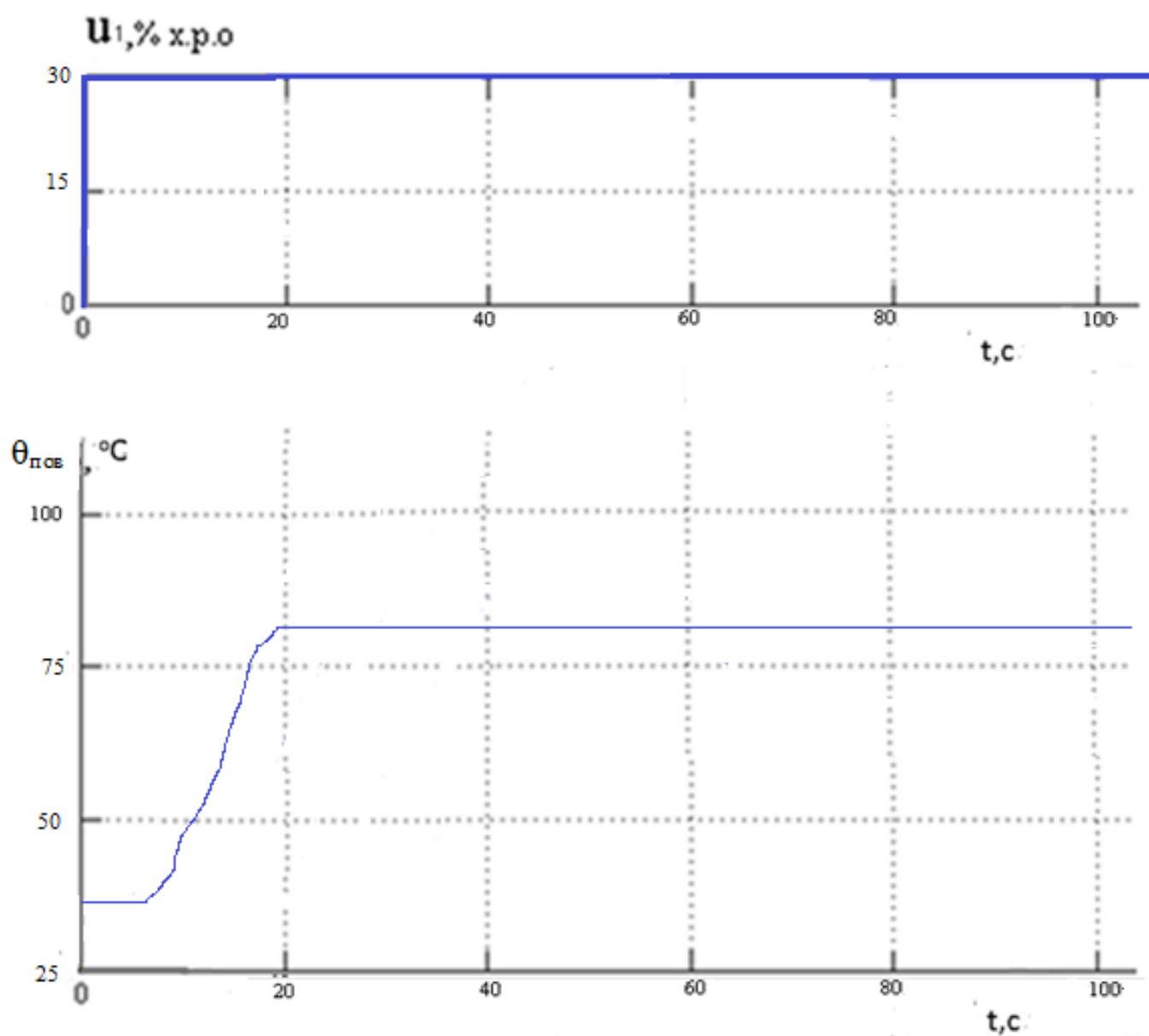
Виходячи з розрахунків, проект модернізації САК є інвестиційно привабливим, адже чистий грошовий потік за період реалізації проекту більше 0 і дорівнює 217 077,12 грн. та термін окупаємості менше нормативного.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

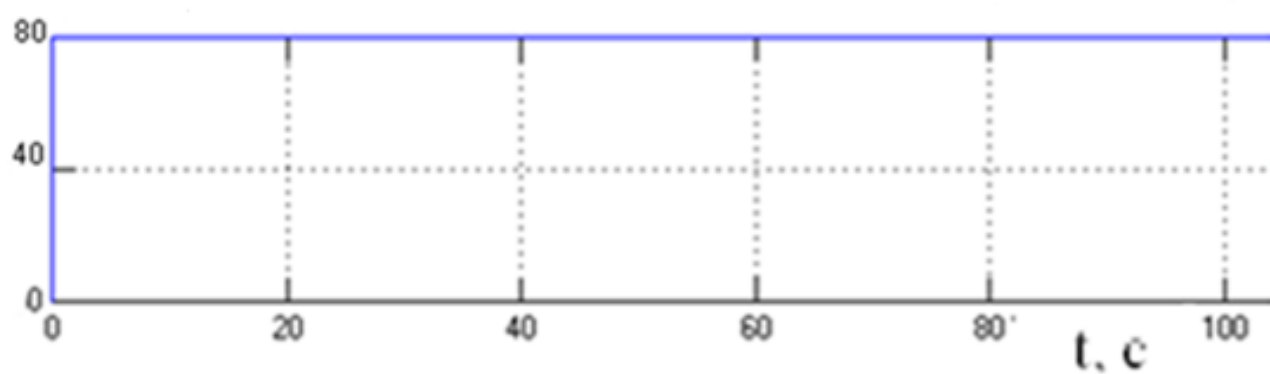
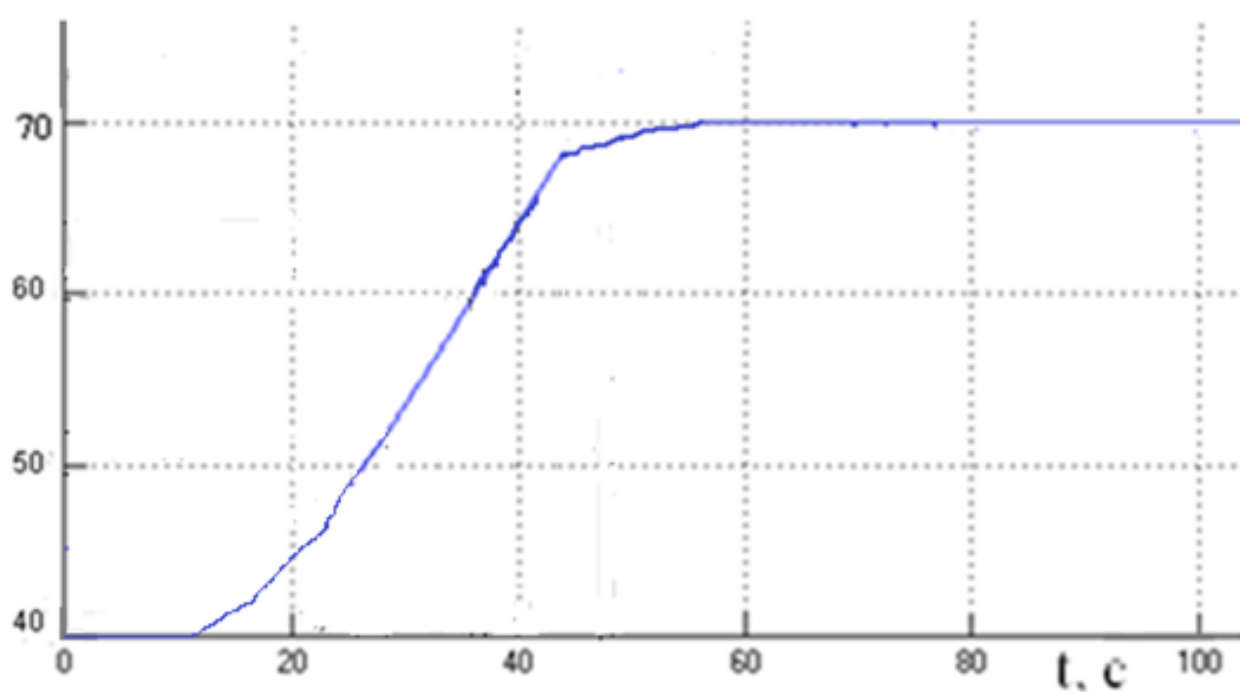
1. Маклюков И.И, Маклюков В.И. Промышленные печи хлебопекарного и кондитерского производства – М.: Легкая и пищевая промышленность , 1983. – 272 с.
2. Сигал М.Н. и др.Поточно-механизированные и автоматизированные линии в хлебопекарной промышленности ,1988.-176с.-Библиогр.
- 3.Хобін В.А. – Конспект лекцій з курсу Ідентифікація та моделювання об'єктів автоматизації– Одеса ОНАХТ 2016. – 96 с.
4. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів напряму підготовки 6.050202 денної та заочної форм навчання. Укл. В.А. Хобін. – Одеса: ОНАХТ, 2020. – Ч. 1. – 110 с.
5. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів напряму підготовки 6.050202 денної та заочної форм навчання. Авт. В.А. Хобін. – Одеса: ОНАХТ, 2020. – Ч. 2. – 76 с.
6. Методические указания к выполнению индивидуальной самостоятельной работы по курсу «Микропроцессорные и программные средства автоматизации» для студентов, профессионального направления 6.050202 дневной и заочной форм обучения / Составители:М.Т.Степанов. – Одесса: ОНАПТ,2013,16 с.
7. Методичні вказівки до виконання індивідуальної самостійної роботи за дисципліною "Проектування систем автоматизації" для студентів напряму підготовки бакалаврів 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»,денної та заочної форм навчання/ Укладач Ю. М. Скаковський. – Одеса: ОНАХТ, 2017. – 74 с.
8. Скаковський Ю.М. Методичні вказівки до виконання індивідуальної самостійної роботи за дисципліною "Автоматизація технологічних процесів та виробництв" для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання/Ю.М. Скаковський - Одеса: ОНАХТ, 2019, -33 с. (електр. версія).

9. Денисенко В.В. Комп'ютерне управління технологічним процесом , експериментом , обладнанням . - М .: Гаряча лінія - Телеком , 2009. - 608 с.
10. SIMATIC HMI . WinCC flexible 2005. Керівництво користувача 6AV6691- 1AB01-0AB0 . Редакція 06. - Siemens AG , 2005. - 394 с .
11. Загальногалузеві керівні методичні матеріали по створенню і застосуванню АСУТП у галузях промисловості (ОРММ-3). – Москва, 1986.
12. ДСТУ Б А.2.4-4-95. ДКУ Мбіа,1997 (ГОСТ 21.101-93, МНТКС). Основні вимоги до робочої документації.
13. ДСТУ Б А.2.4-3-95. ДКУ Мбіа,1997 (ГОСТ 21.408-93, МНТКС). Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів.
14. ДСТУ Б А.2.4-10-95. ДКУ Мбіа,1996 (ГОСТ 21.110-93, МНТКС). Правила виконання специфікацій устаткування, виробів і матеріалів.
15. ДБН А.2.2-3-97. ДКУ Мбіа, 1997. Державні будівельні норми України. Проектування Склад. Порядок розробки, узгодження і твердження проектної документації для будівництва.
16. ДСТУ Б А.2.4-16:2008 Системи проектної документації для будівництва. Автоматизація технологічних процесів. Зображення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах.
17. Трегуб В.Г., Ладанюк А.П., Плужников Л.Я. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации пищевых производств. – М.: Агропомиздат, 1991. –352с.

## ДОДАТОК А

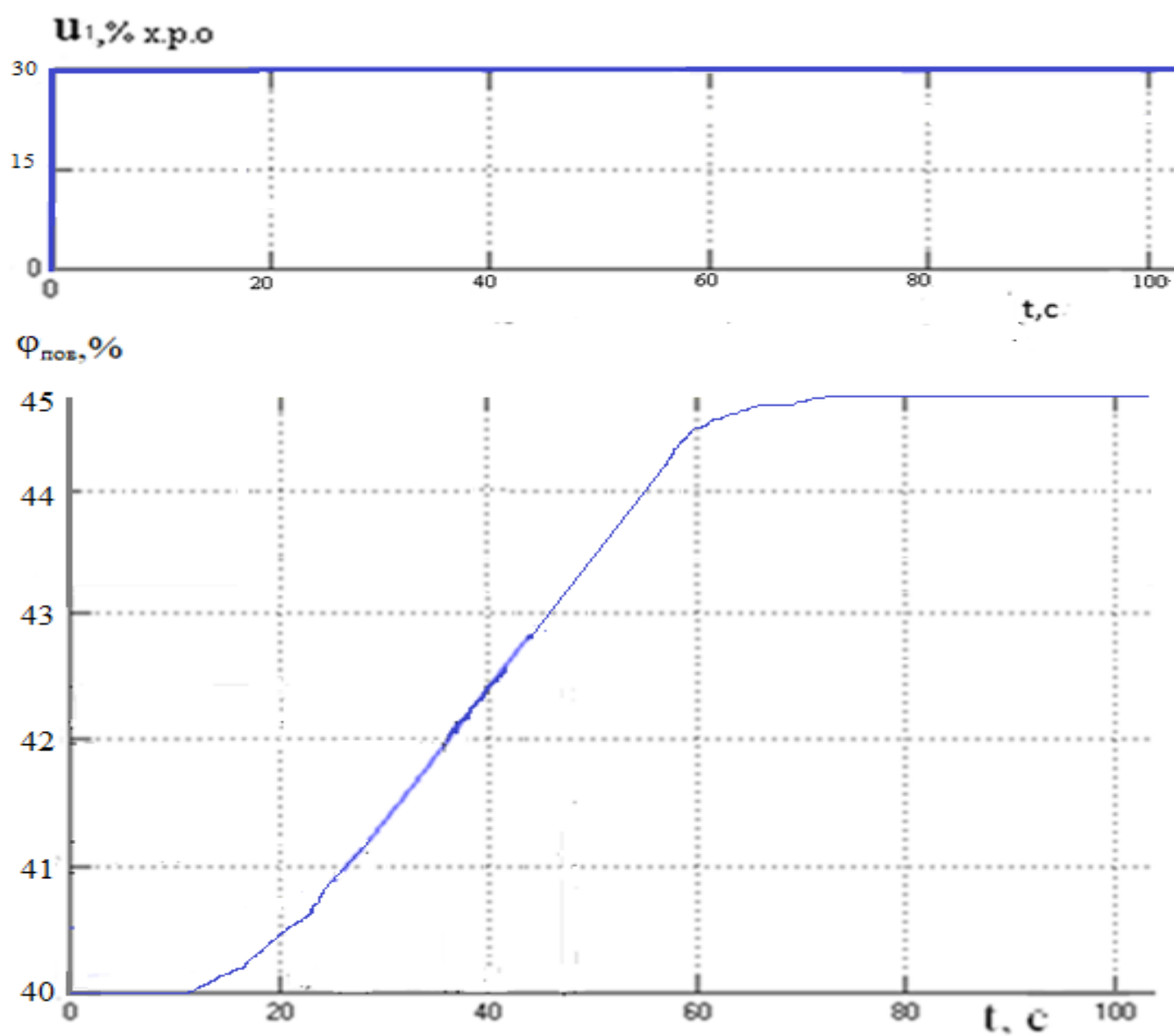
Результати активного експерименту(Канал регулювання  $u_1-\theta_{пов}$ )

## ДОДАТОК Б

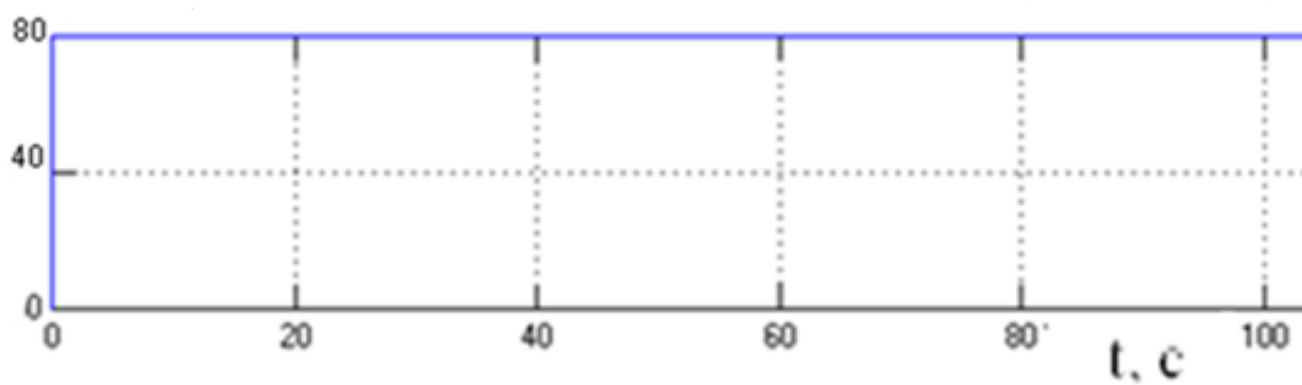
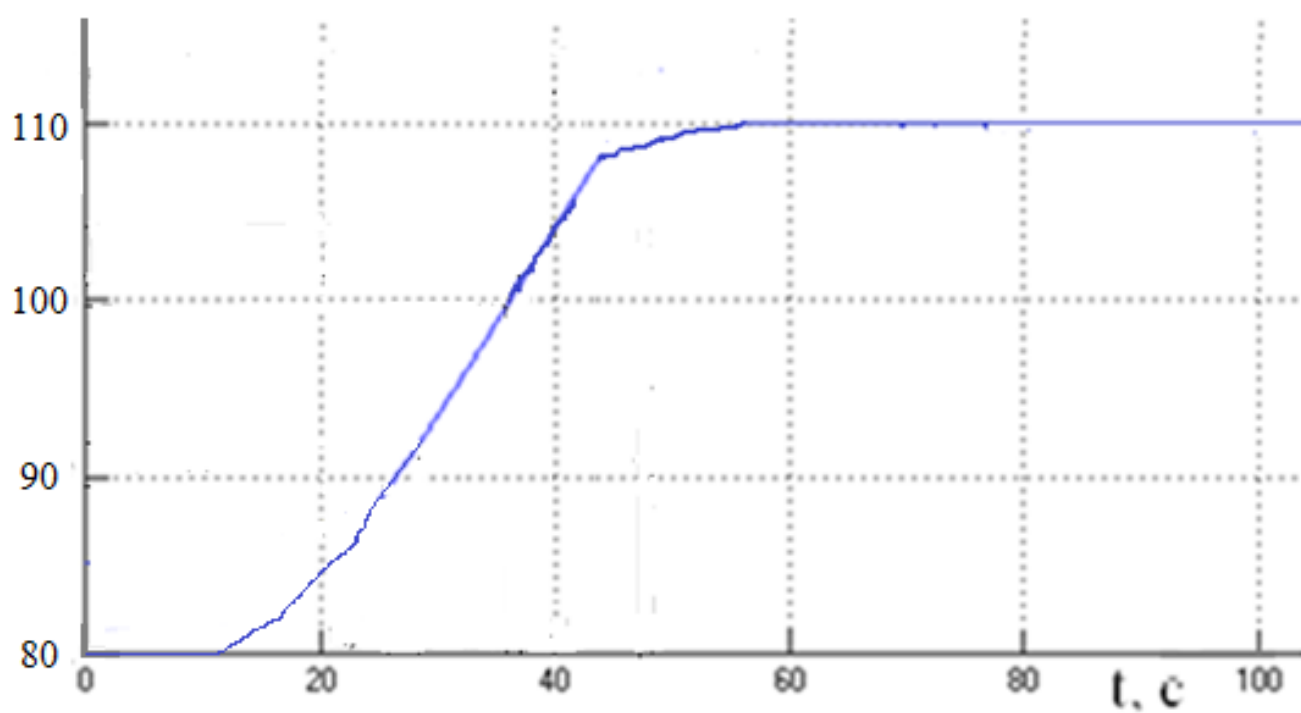
 $u_2, \% \text{ х.р.о.}$  $\varphi_{\text{пов}}, \%$ 

Результати активного експерименту(Канал регулювання  $u_2$ - $\varphi_{\text{пов}}$ )

## ДОДАТОК Г

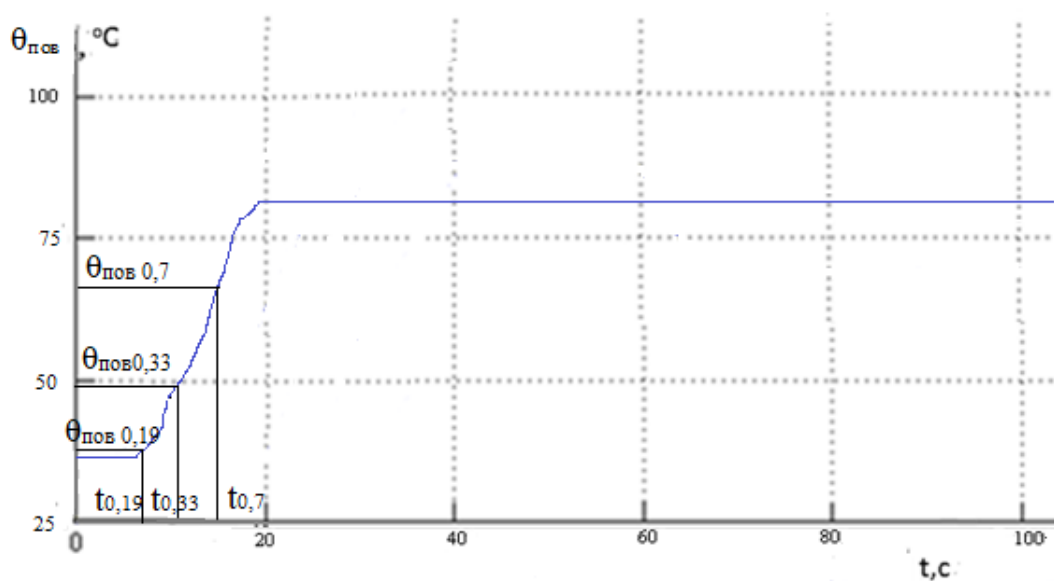
Результати активного експерименту(Канал регулювання  $u_1$ - $\varphi_{\text{пов}}$ )

## ДОДАТОК Д

 $u_2, \% \text{ х.р.о.}$  $\theta_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$ 

Результати активного експерименту(Канал регулювання  $u_2$ - $\theta_{\text{пов}}$ )

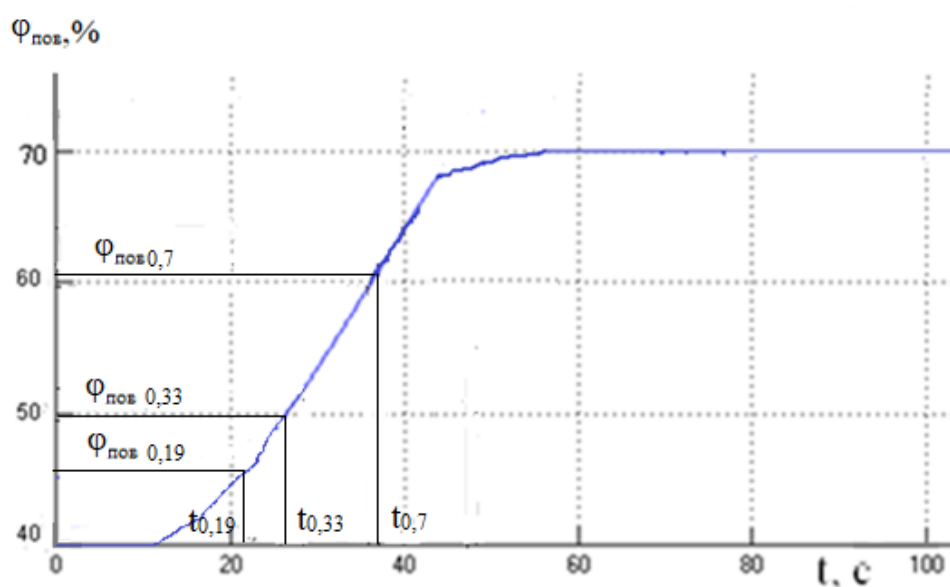
## ДОДАТОК Е



Параметрична ідентифікація моделі ОК по каналу регулювання

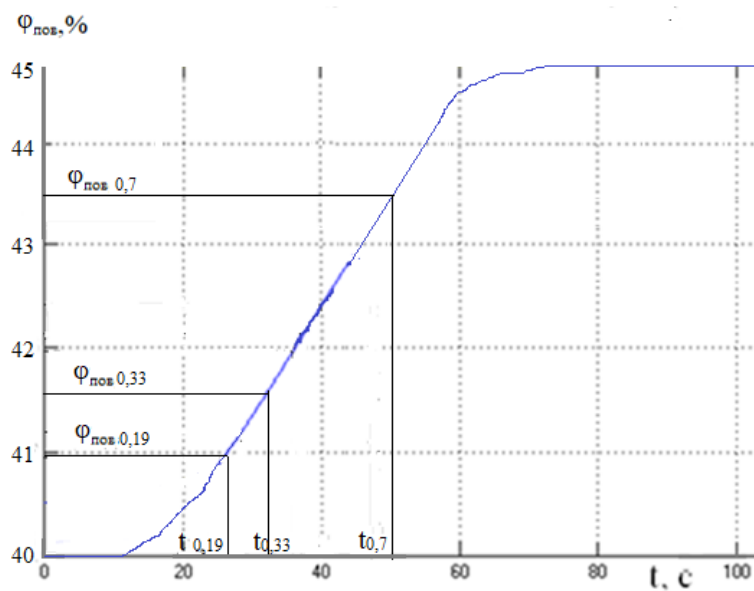
$$u_1 - \theta_{пов}$$

## ДОДАТОК Є

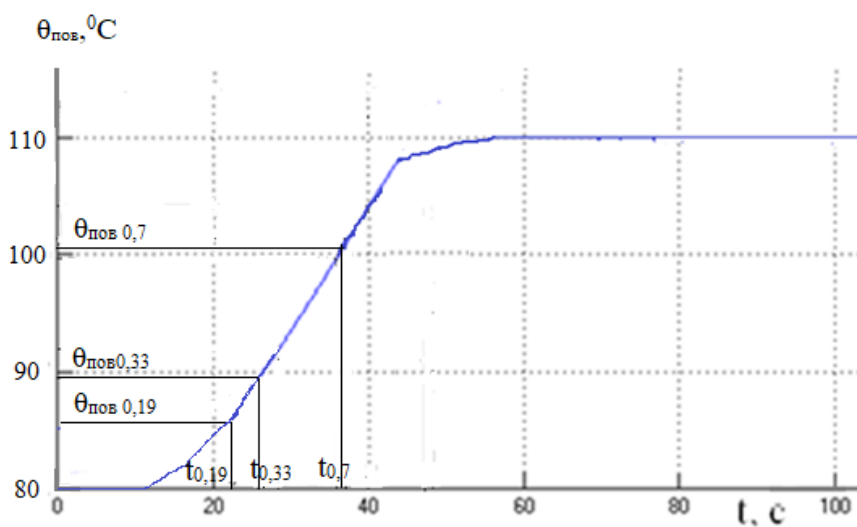


Параметрична ідентифікація моделі ОК по каналу регулювання  $u_2 - \Phi_{пов}$

## ДОДАТОК Ж

Параметрична ідентифікація моделі ОК по каналу регулювання  $u_1$ - $\Phi_{\text{пов}}$ 

## ДОДАТОК З

Параметрична ідентифікація моделі ОК по каналу регулювання  $u_2$ - $\theta_{\text{пов}}$

## ДОДАТОК И



Розрахунки параметрів передаточної функції моделі 1-го порядку ОК:

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7})$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2$$

Розрахунки параметрів передаточної функції моделі 2-го порядку ОК:

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7})$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2$$