

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 деалкоголізацією**

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу

Здобувача (ки) Пашкова С.О.

(прізвище, ініціали)

2 курсу Ам-20 групи

Керівник доцент, Мазур О.В.

(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: _____

(посада, прізвище та ініціали)

(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 20____ р., протокол № ____.

Завідувач(ка) кафедри АТПіРС _____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
(назва кафедри) (підпис)

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет	<u>Автоматизації та робототехніки</u>
Кафедра	<u>Автоматизації технологічних процесів і</u> <u>робототехнічних систем</u>
Ступінь вищої освіти	<u>Магістр</u>
Спеціальність	<u>151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології</u>
Освітньо-наукова програма	<u>Комп'ютерні системи та програмна інженерія в</u> <u>автоматизації</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТПіРС
В.А. Хобін

«22» грудня 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Пашков Сергій Олександрович

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування деалкоголізацією вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу»

Затверджена наказом ОНТУ №877-03 від 29.11.22 р.

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи «11» червня 2024 р.

3. 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.

4. 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 деалкоголізацією вина в потоці, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.

Розділ 2. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП деалкоголізацією вина в потоці.

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.

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.

Керівник Мазур О.В.
Завдання прийняв до виконання Пашков С.О.

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	Здача 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 Пашков С.О. Керівник роботи Мазур О.В.

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 Пашков С.О. _____
ПІБ Підпис

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра на тему “Підвищення ефективності автоматичного керування деалкоголізацією вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу” присвячена підвищенню продуктивності, енергоефективності та економічної доцільності проведення технологічного процесу. В бродильних виробництвах при виготовленні алкогольних напоїв постає проблема нормалізації вмісту алкоголю в готовому продукті. Процес деалкоголізації застосовується для зменшення вмісту алкоголю в одних продуктах та отримання спирту для зміцнення інших. Для підвищення енергоефективності процесу видалення алкоголю та поліпшення якості отриманих продуктів зазвичай використовується вакуумна дистиляція у плівкових випарниках. Використання активної рекуперації за допомогою термоелектричних перетворювачів (ТЕП) є одним з шляхів зниження енергетичних витрат та зменшення рівня теплових «енергетичних відходів» при реалізації таких процесів. Але їх введення збільшує кількість взаємозв'язків в ОК, що безумовно ускладнює керування ТП. Тому розробка ефективних алгоритмів керування таким процесом є актуальною задачею. Досліджено технологічний процес деалкоголізації вина в потоці, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування. Розроблено та реалізовано комплекс аналітичних математичних моделей процесу деалкоголізації вина в потоці як об'єкту керування. Сформульовано задачі керування, вимоги до їх розв'язку і вибір основних принципів побудови автоматичних систем. Проведено синтез і аналіз системи автоматичного регулювання базової структури. За рахунок впровадження міжрегуляторного коригуючого зв'язку удосконалено алгоритм, що реалізує функції регулювання САК ТП деалкоголізації вина в потоці. Також розглянуто варіант алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж. Розроблено САК процесом деалкоголізації вина в потоці, що реалізує функцію максимізації продуктивності та енергоефективності при гарантуванні дотримання обмежень по температурі. Розроблено та налагоджено прикладне програмне забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування (СГК) процесом деалкоголізації вина в потоці, а також людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога. Після оцінки економічної ефективності підтверджено доцільність впровадження розробок. Були проведені усі необхідні порівняння різних регуляторів, зроблено відповідні висновки по кожному із варіантів керування. Весь матеріал викладений в зручному представленні і проілюстрований.

Кількість сторінок: 245, кількість рисунків 124, кількість таблиць 20__.

Ключові слова: система керування, математична модель, перехідний процес, підвищення ефективності, підвищена динамічна точність, система гарантуючого керування, нечітка логіка, нейронний регулятор, термоелектричний перетворювач, деалкоголізація.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	11
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОЇ ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЇ ВИНА В ПОТОЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ, ВИЯВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	16
1.1 Опис технологічного процесу та його особливості.....	16
1.1.1 Складання схеми та опис суті технологічного процесу, реалізованого технологічним агрегатом, як цілеспрямованого перетворення матеріальних і енергетичних потоків.....	16
1.1.2 Формулювання (у загальному виді) умов, при яких можливо й доцільно реалізувати розглянутий технологічний процес.....	18
1.1.3 Параметризація схеми технологічного процесу і загальна характеристика параметрів і їх взаємозалежностей.....	18
1.2 Конкретизація регламентів і умов ведення процесу, його формалізоване представлення.....	21
1.2.1 Виявлення нормативів ведення технологічного процесу і роботи технологічного агрегату.....	21
1.2.2 Аналіз наслідків виходу технологічних і експлуатаційних параметрів за регламентні допуски.....	22
1.2.3 Виявлення параметрів, що характеризують умови ведення технологічного процесу та експлуатації технологічного агрегату.....	23
1.2.4 Формалізація параметризованої схеми технологічного процесу і отримання його параметричної схеми.....	24
1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкта керування.....	25
1.3.1 Конкретизація мети і завдань керування об'єктом, виявлення регульованих координат.....	25
1.3.2 Вибір управляючих дій об'єкту керування.....	26
1.3.3 Виділення та класифікація збурень об'єкта керування.....	27

1.3.4	Складання структурної (координатної) схеми об'єкту регулювання.	27
1.4.	Розробка і реалізація імітаційної моделі процесу деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу	28
1.4.1.	Розробка загальної структури математичної моделі	28
1.4.2	Реалізація імітаційної моделі процесу деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу.....	30
1.5.	Отримання перехідних та квазістатичних характеристик моделей та обґрунтування їх адекватності об'єкту	36
1.5.1.	Отримання квазістатичних характеристик моделей та обґрунтування їх адекватності об'єкту	36
1.5.2	Отримання перехідних характеристик та параметрична ідентифікація моделей першого порядку основних каналів перетворення.....	44
1.6	Висновки з розділом.	52
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП.....		54
2.1	Формулювання задач керування, вимог до їх розв'язку і вибір основних принципів побудови автоматичних систем	54
2.1.1	Формулювання задач керування технологічним агрегатом	54
2.1.1.1	Декомпозиція загальної задачі керування технологічним агрегатом і формулювання окремих задач.	54
2.1.1.2	Обґрунтування необхідності і доцільності автоматизації кожної з окремих завдань управління.....	54
2.1.1.3	Формалізація вимог до гранично-припустимих статичних і динамічних відхилень регульованих змінних від відповідних заданих значень перехідних і динамічно сталих процесів і подання їх у формі регламентних зон регульованих змінних.	55
2.1.1.4	Формалізація інтегральних вимог до перехідних та динамічно сталих процесів регулювання у формі інтегральних критеріїв оптимальності САР.	57
2.1.1.5	Вибір, обґрунтування та подання у вигляді узагальненої структурної схеми принципу побудови системи автоматичного регулювання.....	58

2.2 Розробка на основі обраного загального принципу побудови САР, її базової конкретної структури.....	59
2.2.1 Вибір альтернативних варіантів типових алгоритмів регулювання, запис їх рівнянь і передаточних функцій.	60
2.2.2 Розробка структурної схеми цифрового імітаційного моделювання базової САР.	61
2.2.3 Параметричний синтез САР з ПД алгоритмом регулювання	62
2.2.3.1 Вибір початкових наближень настроювальних параметрів алгоритмів регулювання на основі інженерних методик параметричного (неоптимального) синтезу САР.	62
2.2.3.2 Параметричний оптимальний синтез САР з ПД алгоритмом регулювання для детермінованих (ступінчастих) вхідних діях.	63
2.2.4.1 Перевірка САР з ПД алгоритмом регулювання на грубість в умовах різної концентрації виноматеріалу.	64
2.3 Синтез і аналіз САР підвищеної динамічної точності	66
2.3.1 Аналіз особливостей об'єкта регулювання, що знижують динамічну точність і вибір способів її підвищення за рахунок введення в структуру САР додаткових зв'язків.	66
2.3.2 Розробка на основі вибраних способів підвищення динамічної точності САР її структурної схеми і формулювання (в аналітичній формі) умов, що забезпечують необхідні властивості САР.....	66
2.3.3 Виведення передатної функції коригуючого зв'язку, аналіз його структури з умов фізичної реалізованості, приведення до фізично реалізуємого виду, представлення у формі з'єднання типових динамічних ланок та отримання перехідних характеристик.	68
2.3.4 Спрощення коригуючих зв'язків з урахуванням особливостей їх технічної реалізації і параметричний синтез САР при детермінованих вхідних діях.	70
2.3.4.1 Аналіз складності технічної реалізації коригувальних зв'язків проводиться з урахуванням доцільності такої реалізації та можливостей технічних засобів.....	70

2.3.4.2 Вибір початкових наближень параметрів спрощених коригуючих зв'язків, який здійснюється з умов близькості перехідних характеристик коригуючих зв'язків до і після їх спрощення, де можливо застосувати будь-який метод як оптимізаційного, так і звичайного.....	71
2.3.5 Розробка структурної схеми цифрового імітаційного моделювання і параметричний оптимальний синтез САР підвищеної динамічної точності для детермінованих (ступінчастих) вхідних дій.	72
2.3.6 Перевірка САР ПДТ на грубість в умовах різної концентрації виноматеріалу.	74
2.4 Висновки за розділом.....	77
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	79
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем керування, побудованих на базі апарата нечіткої логіки для розглянутого об'єкта керування.	79
3.2 Реалізація в програмному середовищі Matlab\Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування що характеризується нелінійними статичними характеристиками.	80
3.3 Параметричний синтез САК з традиційним ПД регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.	83
3.4 Розробка моделі САК з нечітким регулятором (нр) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.....	85
3.5 Порівняльний аналіз функціонування САК з традиційним ПД регулятором і з САК з нечітким регулятором.....	99
3.6 Обґрунтування актуальності застосування нейромережових алгоритмів керування.....	100
3.7 Розробка моделі САК з нейрорегулятором.	101
3.8 Параметрична оптимізація САК з нейрорегулятором.....	111
3.9 Дослідження якості регулювання різних САК при умовах наявності збурюючих впливів випадкового характеру.	114

3.10 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.	117
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА САК ПРОЦЕСОМ ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЇ ВИНА В ПОТОЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСУ, ЩО РЕАЛІЗУЄ ФУНКЦІЮ МАКСИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРИ ГАРАНТУВАННІ ДОТРИМАННЯ ОБМЕЖЕНЬ ПО ТЕМПЕРАТУРІ.....	124
4.1. Обґрунтування актуальності додаткової функції гарантування дотримання обмежень температури ДВ на виході випарника САК процесом деалкоголізації вина в потоці для підвищення продуктивності.....	124
4.2. Вибір і опис принципу реалізації функції гарантування дотримання обмежень температури ДВ на виході випарника.....	125
4.3. Розробка структурної схеми САК гарантування дотримання обмежень температури ДВ на виході випарника.....	129
4.4. Розробка схеми імітаційного моделювання САК і плану комп'ютерних експериментів по дослідженню її ефективності, представлення та аналіз результатів моделювання.	131
4.5. Висновки за розділом.....	136
РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	137
5.1 Розробка програмно-технічної структури	137
5.1.1 Технічна структура.....	137
5.1.2 Реалізація ПЛК на базі BeagleBone Black.....	138
Основні характеристики BeagleBone Black:	138
5.2 Розробка та налагодження прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування (СГК) процесом деалкоголізації вина в потоці.....	139
5.2.1 Переслідувані цілі та основні положення.....	139
5.2.2. Реалізація «цифрової» моделі СГК процесом каталітичної очистки інертних газів в середовищі Simulink, з використанням бібліотеки PLCLib пакета	

Simulink PLC Coder.	140
5.2.3. Конвертація моделі цифрового алгоритму системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці в програмний код для середовища програмування ПЛК – CodeSys V3.5, за допомогою пакета Simulink PLC Coder.	144
5.3. Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога.....	149
5.3.1 Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці.....	150
5.3.2 Розробка програмного забезпечення людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога	152
5.3.3 Тестування розробленого програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога.	154
5.4. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.	158
Зміст і методика оцінки інноваційного потенціалу підприємства.....	161
5.5 Висновки за розділом.....	166
ВИСНОВОК.....	168
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	174
ДОДАТОК А1	177
ДОДАТОК А2	187
ДОДАТОК А3	200
ДОДАТОК Б.....	211
ДОДАТОК В	219
ДОДАТОК Г1	230
ДОДАТОК Г2	231
ДОДАТОК Г1	239
ДОДАТОК Г2	242

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТП – технологічний процес;

ПП – перехідний процес;

ПХ – перехідна характеристика;

АК – алгоритм керування;

ОК – об'єкт керування;

ОР – об'єкт регулювання;

САР – система автоматичного регулювання;

САК – система автоматичного керування;

ПДТ – підвищена динамічна точність;

СГК – система гарантуючого керування;

НМ – нечіткі множини;

НР – нейронний регулятор;

ТЕП – термоелектричний перетворювач;

ДВ – деалкоголізований виноматеріал.

ВСТУП

В сучасному світі для існування та успішного розвитку, підприємство повинно отримувати достатньо високий і стабільний прибуток. Зрозуміло, що основний прибуток підприємство отримує від реалізації продуктів його виробництва. Для отримання максимального прибутку, продукція, що виробляється підприємством, має бути конкурентоспроможною, в умовах жорстокої економічної боротьби на ринку. Основним методом підвищення конкурентоспроможності продукції є зниження її собівартості при збереженні якості продукції. Одною з основних складових собівартості продукції при переробці харчової сировини є високі енергетичні витрати. Тому впровадження технологічних процесів з глибокою рекуперацією енергетичних потоків за рахунок використання термоелектричних теплових насосів є дуже актуальною задачею. В умовах використання термоелектричних теплових насосів можна домогтися підвищення якості продукції ще за рахунок покращення керування технологічними процесами.

Виноградарство, зокрема виноробство, в Україні має багатовікову історію. Сприятливі ґрунтово-кліматичні умови, відмінні сорти винограду, знання та багаторічний досвід надавали українському вину унікальні смакові та якісні показники. З давніх-давен люди застосовували вино для зміцнення сил і здоров'я, з його допомогою тримали організм в тонусі.

Виноробна промисловість України сьогодні представлена підприємствами первинної та вторинної обробки.

Крім смакових, кольорових та інших властивостей сорти вина відрізняються вмістом спирту. Так у готовому сучасному сухому вині за рахунок підвищення цукровості внаслідок глобального потепління останніми десятиріччями вміст спирту досягає 14%об., при найбільш затребуваному на ринку вині з вмістом спирту 11,5...12%об.. У зв'язку з цим у галузі гостро стоїть питання зменшення вмісту алкоголю в готовій продукції. Також останнім часом підвищується попит на цілком безалкогольне вино.

Процес деалкоголізації здійснюється за допомогою різних методів, таких

як дистиляція, зворотний осмос або вакуумна деалкоголізація. Останній метод дозволяє як найглибше видалити алкоголь з сировини та при цьому як найкраще зберегти смак і аромат вина.

Відділення алкоголю з виноматеріалу вимагає нагрівання продукту до температури кипіння спирту та догрів для випаровування спирту, але чим вищою є температура нагріву вина, тим більше псуються смакові якості продукту та руйнуються більшість корисних речовин, що знаходяться у складі червоного сухого вина. Тому для зменшення температури кипіння процес проводять при низькому тиску, цей процес ще називають вакуумною деалкоголізацією. При зниженні тиску до 90 мбар температура кипіння спирту складає 27°C. Ця температура кипіння називається «точкою азеотропа», нижче якої з вина не випаровується вода, але випаровуються тільки спирти та ефіри. При зниженні тиску змінюється азеотропний склад для цієї температури, більш леткий компонент убуває з рідкої фази. Нижче за певний тиск азеотропна точка може зникати, наприклад, при 92 мбар етанол кипить при 28 ° C без утворення азеотропу з водою. Тому при випарюванні алкоголю в такому режимі найменше деградують смакові та корисні властивості вина.

При таких технологічних режимах вакуумної деалкоголізації необхідно досягти компромісу між температурою нагрівання, температурою конденсації та розрідженням. Вони і складають основу технологічного регламенту процесу деалкоголізації. Розроблений технологічний регламент служить основою: а) розробки деалкоголізатора в якому буде реалізовано технологічний процес; б) розробки системи автоматичного керування технологічним процесом при його реалізації у виробничих умовах. При проектуванні системи керування деалкоголізатором забезпечується можливість виконання регламенту при зміні умов ведення процесу у всіх можливих діапазонах змін збурюючі факторів. На основі технологічного регламенту обираються, перш за все, регульовані змінні, обґрунтовуються їх задані значення і припустимі відхилення. Безпосередньо у процесі керування мінімізується відхилення регульованих змінних відносно їх заданих значень.

В якості підігрівника та охолоджувача застосуємо термоелектричні теплові насоси. Для оснащення теплообмінника якісною системою автоматичного регулювання температури випаровування, температури конденсації та розрідження слід побудувати математичну модель даного технологічного процесу. Нині під час аналізу та синтезу складних систем, широке розповсюдження отримав аналітичний метод, який базується на відображенні в моделі фізичної сутності процесів. Основою аналітичних методів є фізичні та хімічні закони і, насамперед, закони збереження (кількості речовини, енергії, імпульсу, маси ...). Ці моделі містять у собі всі параметри, що відображають конструкцію технологічного агрегату, який моделюють, та фізико-хімічні процеси, що протікають у ньому. Саме такий підхід був застосований при розробці математичних моделей процесу деалкоголізації вина в потоці як об'єкту керування. Було отримано комплекс математичних моделей процесу деалкоголізації вина в потоці, що включає математичні моделі термоелектричного перетворювача, випарника, моделі теплопередачі через плоску стінку, паропроводу, конденсатора, вакуумної системи, вентилятора, отримані моделі було відтворено у середовищі імітаційного моделювання.

Актуальність. В бродильних виробництвах при виготовленні алкогольних напоїв постає проблема нормалізації вмісту алкоголю в готовому продукті. Процес деалкоголізації застосовується для зменшення вмісту алкоголю в одних продуктах та отримання спирту для зміцнення інших. Для підвищення енергоефективності процесу видалення алкоголю та поліпшення якості отриманих продуктів зазвичай використовується вакуумна дистиляція у плівкових випарниках. Використання термоелектричних перетворювачів (ТЕП) є одним з шляхів зниження енергетичних витрат та зменшення рівня теплових «енергетичних відходів» при реалізації таких процесів. ТЕП підігрівають виноматеріал і випаровують спирти та охолоджують і конденсують пари спирту. Але їх введення збільшує кількість взаємозв'язків в ОК, що безумовно ускладнює керування ТП. Тому розробка ефективних алгоритмів керування таким процесом є актуальною задачею.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка САК процесом деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу.

Матеріали і методи дослідження. Основним методом проведеного дослідження є метод системного аналізу. Ідентифікація моделей об'єкта виконувалась за інженерною методикою ідентифікації моделей об'єктів керування. При синтезі системи автоматичного керування використані методики параметричного синтезу систем керування та оптимального параметричного синтезу. Основним експериментальним методом обрано метод імітаційного моделювання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОЇ ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЇ ВИНА В ПОТОЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ, ВИЯВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Опис технологічного процесу та його особливості

1.1.1 Складання схеми та опис суті технологічного процесу, реалізованого технологічним агрегатом, як цілеспрямованого перетворення матеріальних і енергетичних потоків.

Суть технологічного процесу – це цілеспрямоване перетворення матеріальних і енергетичних потоків у спеціальному технологічному устаткуванні (ТУ) (машинах, апаратах, агрегатах). Суть технологічного процесу вакуумної деалкоголізації вина виділення спиртів з вина при температурі менше 27°C. Технологічний процес реалізується за допомогою використання термоелектричних теплових насосів. Технологічна схема процесу наведена на рис. 1.1.

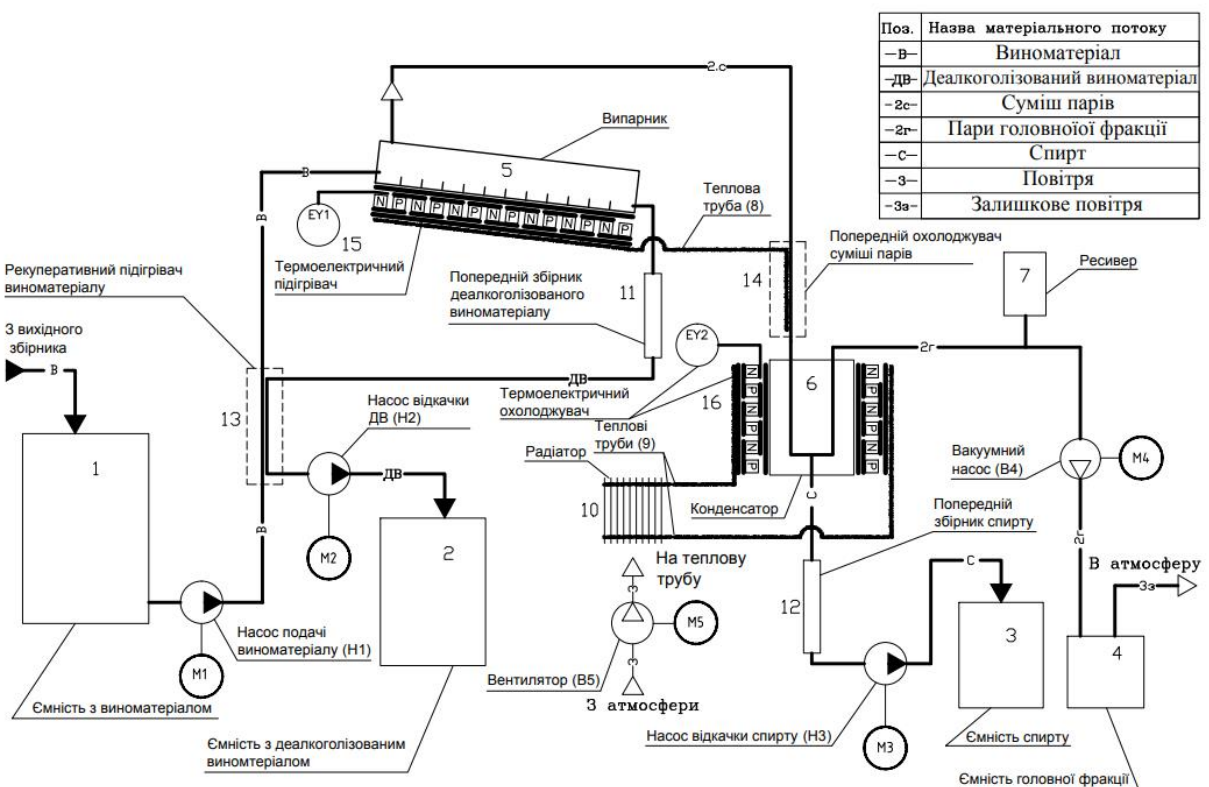


Рисунок 1.1 – Технологічна схема процесу деалкоголізації вина в потоці

На рисунку:

- 1 – Ємність з виноматеріалом;
- 2 – Ємність з деалкоголізованим виноматеріалом;
- 3 – Ємність спирту;
- 4 – Ємність головної фракції;
- 5 – Випарник;
- 6 – Конденсатор;
- 7 – Ресивер;
- 8 – Теплові труби між термоелектричним підігрівачем та попереднім охолоджувачем суміші парів;
- 9 – Теплові труби між термоелектричним охолоджувачем та радіатором;
- 10 – Радіатор;
- 11 – Попередній збірник деалкоголізованого виноматеріалу;
- 12 – Попередній збірник спирту;
- 13 – Рекуперативний підігрівач виноматеріалу;
- 14 – Попередній охолоджувач суміші парів;
- 15 – ТЕП випарника;
- 16 – ТЕП конденсатора.

З вакуумної системи що складається з випарника, конденсатора, ресивера, попереднього збірника деалкоголізованого виноматеріалу, попереднього збірника спирту, рекуперативного підігрівача виноматеріалу, попереднього охолоджувача суміші парів та трубопроводів між ними вакуумним насосом Н4 викачується повітря до тиску 68мБар. З приймальної ємності 1, що знаходиться під атмосферним тиском, насосом Н1 через рекуперативний підігрівач 13 виноматеріал подається у випарник 5. В ньому тепловий потік від «гарячої сторони» термоелектричного перетворювача 15 нагріває вино до температури 28оС та випаровує спирти. Деалкоголізований виноматеріал надходить у попередній збірник ДВ 11 звідки відкачується насосом Н2 через рекуперативний підігрівач 13 в ємність 2 з атмосферним тиском. Суміш парів з випарника 5 під дією перепаду тиску в паропроводі через попередній

охолоджувач 14 надходять у конденсатор. В конденсаторі тепловий потік від «холодної сторони» термоелектричного перетворювача 16 охолоджує та конденсує пари та переохолоджує конденсат до температури + 19°C. Спиртовий конденсат збирається у збірнику 12 звідки насосом Н3 відкачується у ємність 3 з атмосферним тиском. Пари головної фракції відкачуються вакуумним насосом Н4 в ємність 4, де під дією атмосферного тиску конденсуються. Залишкове повітря видаляється в атмосферу.

Тепловий потік з "гарячої сторони" термоелектричного перетворювача 16 відводиться за допомогою теплових труб 9 до радіатора 10 що охолоджується вентилятором В5.

1.1.2 Формулювання (у загальному виді) умов, при яких можливо й доцільно реалізувати розглянутий технологічний процес.

Мета ведення процесу деалкоголізації вина – отримання готового продукту із заданими показниками якості. При промисловому виробництві досягнення мети може бути виправдано тільки тоді, коли технологічний процес має сенс реалізувати, коли виконується цілий ряд вимог до технологічного процесу.

Технологічний процес деалкоголізації вина доцільно реалізовувати, якщо:

- є достатній запас виноматеріалу на 8 годин роботи, тобто, якщо буде запас виноматеріалу не менш чим 160л;
- повинна бути електроенергія в колах живлення насосів із середньостатистичними параметрами мережі;
- слід мати місце для відвантаження готового продукту.

1.1.3 Параметризація схеми технологічного процесу і загальна характеристика параметрів і їх взаємозалежностей.

Технологічний процес деалкоголізації вина є тепловим процесом, пов'язаним з передачею тепла від гарячої сторони термоелектрично підігрівача шляхом теплопередачі через стінки теплообмінника до виноматеріалу. Важливою умовою нормального функціонування технологічного процесу є

заповнення теплообмінника продуктом. Проведемо параметризацію технологічної схеми. Результати параметризації наведені на рис. 1.2.

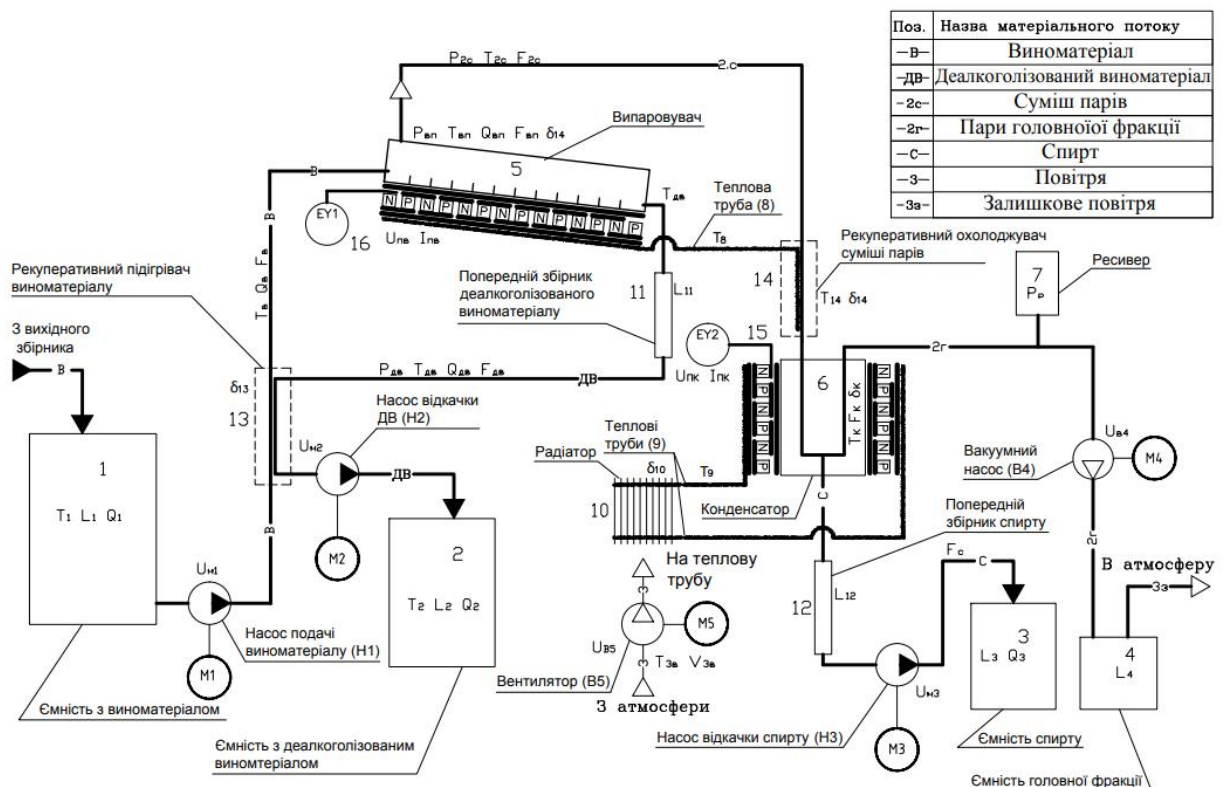


Рисунок 1.2 – Параметризована технологічна схема процесу деалкоголізації вина в потоці

Позначення на параметризованій технологічній схемі:

T_1 – температура у ємності з виноматеріалом, $^{\circ}\text{C}$

L_1 – рівень у ємності з виноматеріалом, м

Q_1 – концентрація спирту у ємності з виноматеріалом, %

T_2 – температура у ємності з деалкоголізованим виноматеріалом, $^{\circ}\text{C}$

L_2 – рівень у ємності з деалкоголізованим виноматеріалом, м

Q_2 – концентрація спирту у ємності з деалкоголізованим виноматеріалом,

%

L_3 – рівень у ємності спирту, м

Q_3 – концентрація спирту у ємності спирту, %

L_4 – рівень у ємності головної фракції, м

T_B – температура виноматеріалу після рекуперативного підігрівача виноматеріалу, $^{\circ}\text{C}$

F_v – витрата виноматеріалу, кг/с
 Q_v – концентрація спирту в виноматеріалі після рекуперативного підігрівача виноматеріалу, %
 T_{dv} – температура деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника, °С
 P_{dv} – тиск деалкоголізованого виноматеріалу, мБар
 F_{dv} – витрата деалкоголізованого виноматеріалу, кг/с
 Q_{dv} – концентрація спирту у деалкоголізованого виноматеріалі, %
 T_{vp} – температура у випарнику, °С
 P_{vp} – тиск у випарнику, мБар
 P_v – тиск на виході з випарника, мбар
 F_{vp} – витрата у випарнику, кг/с
 Q_{vp} – концентрація спирту у випарнику, %
 T_{2c} – температура суміші парів, °С
 P_{2c} – тиск суміші парів, мБар
 F_{2c} – витрата суміші парів, кг/с
 T_k – температура в конденсаторі, °С
 F_k – витрата (конденсація) спирту в конденсаторі, кг/с
 F_c – витрата спирту після насоса відкачки спирту, кг/с
 P_p – тиск у ресивері, мБар
 T_8 – температура теплових трубок 8, °С
 T_9 – температура теплових трубок 9, °С
 T_{3v} – температура навколишнього середовища, °С
 V_{3v} – об'єм прокачуємого повітря повітряним вентилятором, м³
 δ_{13} – конструктивні особливості рекуперативного підігрівача виноматеріалу
 T_{14} – температура в рекуперативному охолоджувачі суміші парів, °С
 δ_{14} – конструктивні особливості рекуперативного охолоджувача суміші парів
 L_{11} – рівень в попередньому збірнику виноматеріалу, м

L_{12} – рівень в попередньому збірнику спирту, м

$\delta_{вп}$ – конструктивні особливості випарника

$\delta_{к}$ – конструктивні особливості конденсатора

δ_{10} – конструктивні особливості радіатора

$u_{н1}$ – робота насоса подачі виноматеріалу Н1

$u_{н2}$ – робота насоса відкачки ДВ Н2

$u_{н3}$ – робота насоса відкачки спирту Н3

$u_{н4}$ – робота вакуумного насосу Н4

$u_{в5}$ – робота повітряного вентилятора В5

$U_{пв}$ – напруга живлення ТЕП випарника, В

$I_{пв}$ – струм живлення ТЕП випарника, А

$U_{пк}$ – напруга живлення ТЕП конденсатора, В

$I_{пк}$ – струм живлення ТЕП конденсатора, А

1.2 Конкретизація регламентів і умов ведення процесу, його формалізоване представлення

1.2.1 Виявлення нормативів ведення технологічного процесу і роботи технологічного агрегату.

Основу нормативів складають три основних регламенти.

Технологічний регламент – визначає умови, при яких у результаті технологічного процесу буде отримано продукт із заданими властивостями. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від номіналу технологічних параметрів. Для технологічного процесу деалкоголізації вина таким параметрами є тиск на виході з випарника $P_{в}$, температура ДВ на виході з випарника $T_{дв}$, температура в конденсаторі $T_{к}$, тиск у ресивері $P_{р}$.

Експлуатаційний регламент – визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного обладнання. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення експлуатаційних параметрів технологічного обладнання. Для технологічного процесу деалкоголізації вина таким параметрами є рівень в попередньому збірнику ДВ L_{11} , рівень в попередньому

збірнику спирту L_{12} .

Техніко-економічний і екологічний регламент визначає умови ефективності ведення процесу і його екологічності. Він являє собою набір номінальних та гранично-припустимих значень техніко-економічних і екологічних параметрів. До цієї групи параметрів можна віднести параметри ДВ в ємності ДВ T_2 L_2 Q_2 , параметри спирту в ємності спирту L_3 Q_3 , рівень в ємності головної фракції L_4 , параметри виноматеріалу після рекуперативного підігрівача виноматеріалу F_v Q_v , параметри ДВ $P_{дв}$ $F_{дв}$ $Q_{дв}$, параметри у випаровувачі $P_{вп}$ $F_{вп}$ $Q_{вп}$, параметри суміші парів T_{2c} P_{2c} F_{2c} , витрата парів в конденсаторі F_k , витрата спирту після насосу відкачки спирту F_c , температура теплових трубок 8 T_8 , температура теплових трубок 9 T_9 , T_{14} температура в рекуперативному охолоджувачі суміші парів.

1.2.2 Аналіз наслідків виходу технологічних і експлуатаційних параметрів за регламентні допуски.

Відхилення параметрів технологічного процесу від регламентних значень, що викликані зміною параметрів, характеризують умови ведення процесу навіть при досить ефективному керуванні процесом, можуть перевищувати встановлені допуски.

Відхилення тиску на виході з випарника нижче гранично припустимих значень знижує продуктивність процесу та може призвести до випаровування води з виноматеріалу, а перевищення тиску верхнього гранично припустимого значення може призвести до неповної dealкоголізації вина. В обох випадках порушення регламенту веде до погіршення якості готового продукту і навіть до збільшення виходу браку.

Відхилення температури ДВ на виході з випарника нижче гранично припустимих значень може призвести до неповної dealкоголізації продукту, а перевищення температури верхнього гранично припустимого значення може призвести до випаровування води з продукту. В обох випадках порушення регламенту веде до погіршення якості готового продукту і навіть до збільшення

виходу браку.

Відхилення температури в конденсаторі нижче гранично припустимих значень може призвести до конденсації парів головної фракції продукту, а перевищення температури верхнього гранично припустимого значення може призвести до недоконденсації спирту та підвищення тиску в ресивері.

Відхилення тиску в ресивері від регламентних допусків у меншу сторону може привести до недодеалкоголізації продукту та недоконденсації спирту. Перевищення тиском гранично припустимого значення приведе до конденсації парів головної фракції продукту.

Допуски на відхилення поточних (режимних) значень регламентованих параметрів від номінальних прийнято розділяти і задавати у вигляді допусків на тривалі та короточасні відхилення. Аналіз нормативів ведення технологічного процесу та експлуатації обладнання оформимо у вигляді таблиці регламентів 1.1.

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення параметру або ф-ція зміни номінального значення	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі ($t \rightarrow \infty$)	Короточасні ($0 < t \ll \infty$)	
				величина	величина	час, сек
1	2	3	4	5	6	7
Тиск на виході з випарника	Pв	мбар	90	±1	±3	60
Температура ДВ на виході з випарника	Tдв	0C	28	±0.5	±1	60
Температура в конденсаторі	Tк	0C	19	±0.5	±1	60
Тиск у ресивері	Pр	мбар	80	±2	±5	60

1.2.3 Виявлення параметрів, що характеризують умови ведення технологічного процесу та експлуатації технологічного агрегату.

Поточні значення нормативних параметрів завжди відрізняються від

номінальних (і можуть виходити за межі допусків) внаслідок зміни умов, у яких ведеться процес. Ці умови також характеризуються певними параметрами ы можуть бути (для зручності) згруповані за деякими ознаками.

Сировинні параметри характеризують властивості продукту, що йде на переробку. До цієї групи параметрів віднесемо виноматеріалу (T_1, L_1, Q_1, F_B).

Енергетичні параметри характеризують енергію, що підводить до технологічного встаткування ззовні й витрачається на зміну властивостей продуктів. До цієї групи параметрів віднесемо напругу та струм живлення елементів Пельте ($U_{ПВ}, I_{ПВ}, U_{ПК}, I_{ПК}$), температуру повітря в атмосфері $T_{ЗВ}$, об'єм прокачуємого повітря повітряним вентилятором $V_{ЗВ}$.

Механічні (або інші специфічні) параметри технологічного обладнання характеризують стан її робочих органів. До цієї групи параметрів віднесемо зміну ступеня пригару та накипу ($\delta_{13}, \delta_{14}, \delta_{ВП}, \delta_R, \delta_{10}$), а також роботу приводів насосів та вентилятора ($u_{Н1}, u_{Н2}, u_{Н3}, u_{Н4}, u_{В5}$).

1.2.4 Формалізація параметризованої схеми технологічного процесу і отримання його параметричної схеми.

Параметризована схема ТП має змістовний характер. Формалізація опису взаємозв'язків між параметрами ТП досягається за рахунок переходу до формалізованої параметричної схеми ТП. При цьому ті параметри, які відображають мету функціонування об'єкту моделювання та додаткових вимог до нього, тобто регламентовані параметри будуть вихідними, а параметри, що відображають умови функціонування об'єкту - вхідними.

Зв'язок між вхідними і вихідними параметрами – причинно-наслідковий. У рамках даної схеми ці зв'язки задаються тільки на якісному рівні, згодом деякими зв'язками можна буде знехтувати, деякі представити опосередковано.

Параметрична схема процесу деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насоса наведена на рис. 1.3.

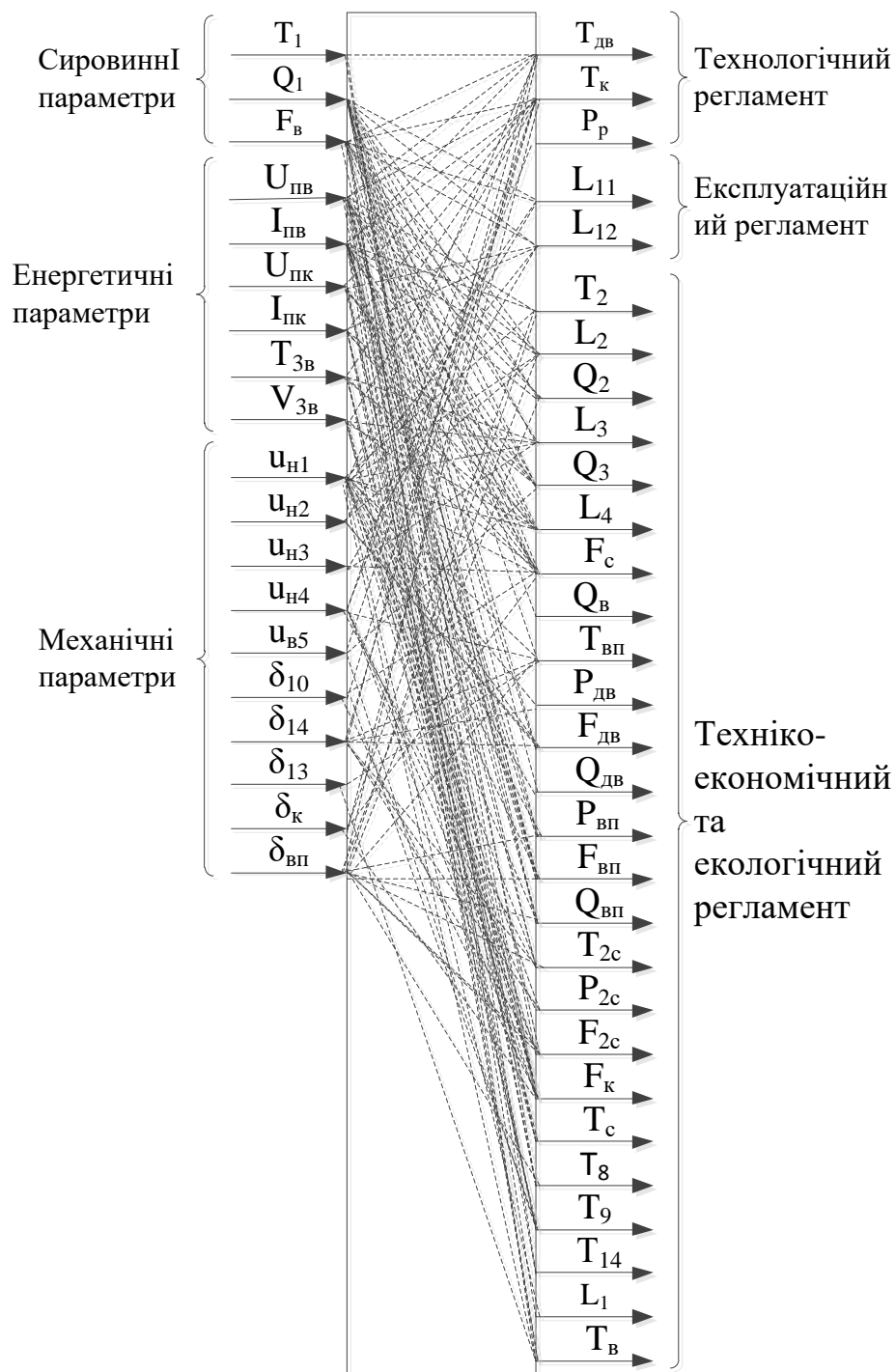


Рисунок 1.3 – Параметрична схема процесу деалкоголізації вина

1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкта керування

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 деалкоголізації вина в якості регульованих координати доцільно обрати тиск на виході з випарника P_v , температуру ДВ на виході з випарника $T_{дв}$, температуру в конденсаторі T_k , тиск у ресивері P_p .

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 деалкоголізації вина до керуючих дій доцільно віднести витрату виноматеріалу (F_v), струм живлення ТЕП випарника ($I_{пв}$), струм живлення ТЕП конденсатора ($I_{пк}$), роботу вакуумного насосу Н4 ($u_{н4}$).

1.3.3 Виділення та класифікація збурень об'єкта керування.

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

Для процесу деалкоголізації вина всі входні дії, крім керуючих, віднесемо до неконтрольованих збурень.

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 деалкоголізації вина наведена на рис. 1.4.

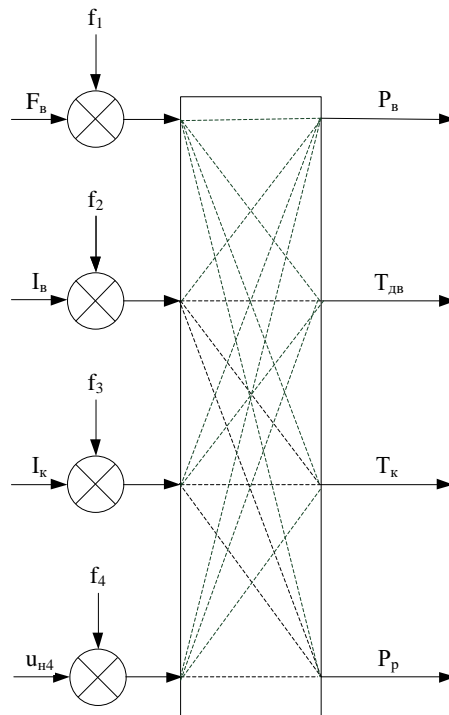


Рисунок 1.4 – Структурна схема процесу деалкоголізації вина в потоці як ОК

На рисунку:

F_в – витрата виноматеріалу;

P_B - тиск в кінці випарника;
 P_B^{3D} – задане значення тиску на виході випарника;
 ΔP_B – помилка регулювання тиску на виході випарника;
 f_1 – вектор неконтрольованих збурень;
 I_B – струм живлення ТЕП випарника;
 $T_{ДВ}$ – температура ДВ;
 $T_{ДВ}^{3D}$ – задане значення температури ДВ;
 $\Delta T_{ДВ}$ – помилка регулювання температури ДВ;
 f_2 – вектор неконтрольованих збурень;
 I_K – струм живлення ТЕП конденсатора;
 T_K – температура в конденсаторі;
 T_K^{3D} – задане значення температури в конденсаторі;
 ΔT_K – помилка регулювання температури в конденсаторі;
 f_3 – вектор неконтрольованих збурень;
 ω_{H4} – частота обертання вакуумного насоса;
 P_p – тиск у ресивері;
 P_p^{3D} – задане значення тиску у ресивері;
 ΔP_p – помилка регулювання тиску у ресивері;
 f_4 – вектор неконтрольованих збурень;

1.4. Розробка і реалізація імітаційної моделі процесу деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу

1.4.1. Розробка загальної структури математичної моделі

Розробка ефективних САК не можлива без наявності імітаційної математичної моделі процесу як об'єкту керування (ОК). Провівши аналіз технологічного процесу та обладнання в якому він проходить, виділено три основні складові математичної моделі, а саме: модель випарника, модель конденсатора та модель відкачки газів з апарату. В свою чергу для коректного опису процесів що протікають під час роботи агрегату кожену модель можна розділити на менші моделі: тепломасообмінних процесів у випарнику,

тепломасообмінних процесів у конденсаторі, ТЕП випарника/конденсатора теплопередачі через плоску стінку, паропроводу, радіатора з вентилятором. Відповідно до вище зазначеного складено структурну схему математичної моделі процесу деалкоголізації вина в потоці як ОК, що зображена на рисунку 1.5.

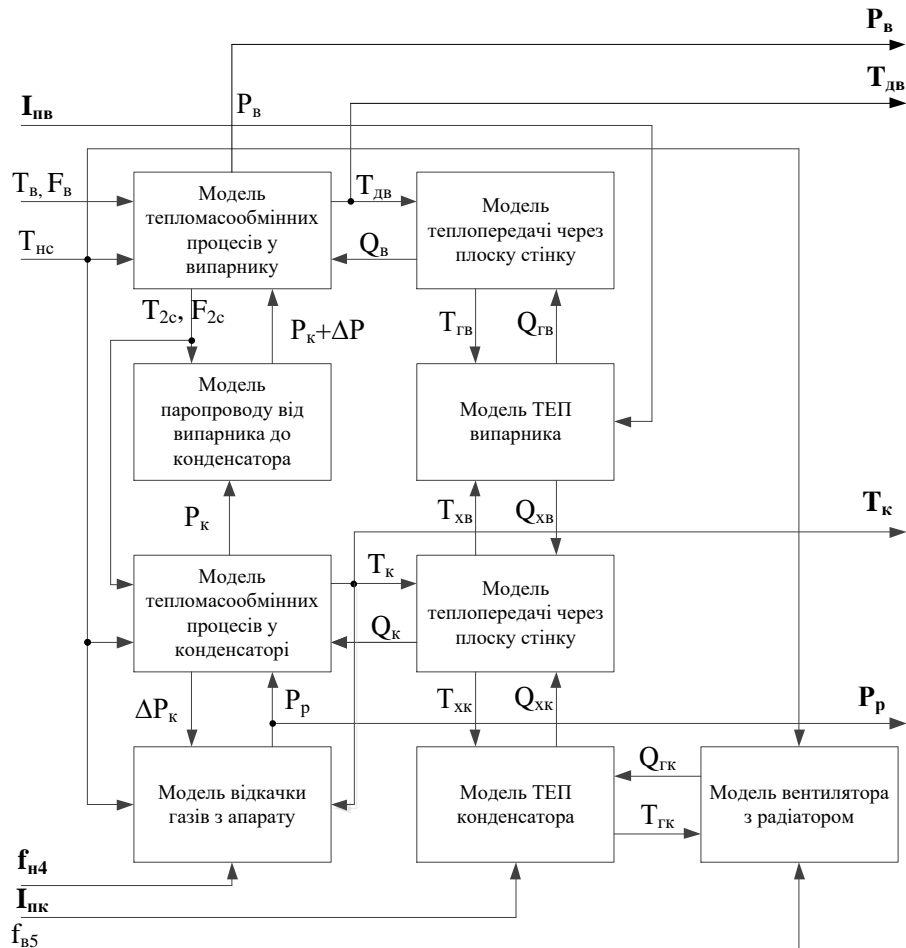


Рисунок 1.5 – Структурна схема математичної моделі процесу

На рисунку:

ΔP – різниця тиску між випарником та конденсатором;

$F_{в}$ – витрата виноматеріалу після рекуперативного підігрівача виноматеріалу;

$T_{в}$ – температура виноматеріалу після рекуперативного підігрівача виноматеріалу;

$T_{дв}$ – температура ДВ на виході з випарника;

$P_{в}$ – тиск на виході з випарника;

T_{2c} – температура суміші парів;
 F_{2c} – витрата суміші парів;
 P_p - тиск у ресивері;
 P_k - тиск у конденсаторі;
 T_k – температура в конденсаторі;
 $I_{пв}$ – струм живлення ТЕП випарника;
 $I_{пк}$ – струм живлення ТЕП конденсатора;
 $T_{нс}$ – температура навколишнього середовища;
 $T_{гв}$ – температура гарячої сторони ТЕП випарника;
 $Q_{гв}$ – тепловий потік від гарячої сторони ТЕП випарника;
 $T_{хв}$ – температура холодної сторони ТЕП випарника;
 $Q_{хв}$ – тепловий потік від холодної сторони ТЕП випарника;
 $T_{гк}$ – температура гарячої сторони ТЕП конденсатора;
 $Q_{гк}$ – тепловий потік від гарячої сторони ТЕП конденсатора;
 $T_{хк}$ – температура холодної сторони ТЕП конденсатора;
 $Q_{хк}$ – тепловий потік від холодної сторони ТЕП конденсатора;
 Q_v – тепловий потік до випарника;
 Q_k – тепловий потік до конденсатора;
 f – частота обертання насоса;
 $f_{в5}$ – частота обертання вентилятора.

1.4.2 Реалізація імітаційної моделі процесу деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу

В ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра на тему «Автоматизація керування деалкоголізацією вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу» розроблено математичну аналітичну модель на основі залежностей теплового та тепломасообмінного балансів. Отримана математична модель реалізована в середовищі Matlab Simulink (рис. 1.6- 1.16).

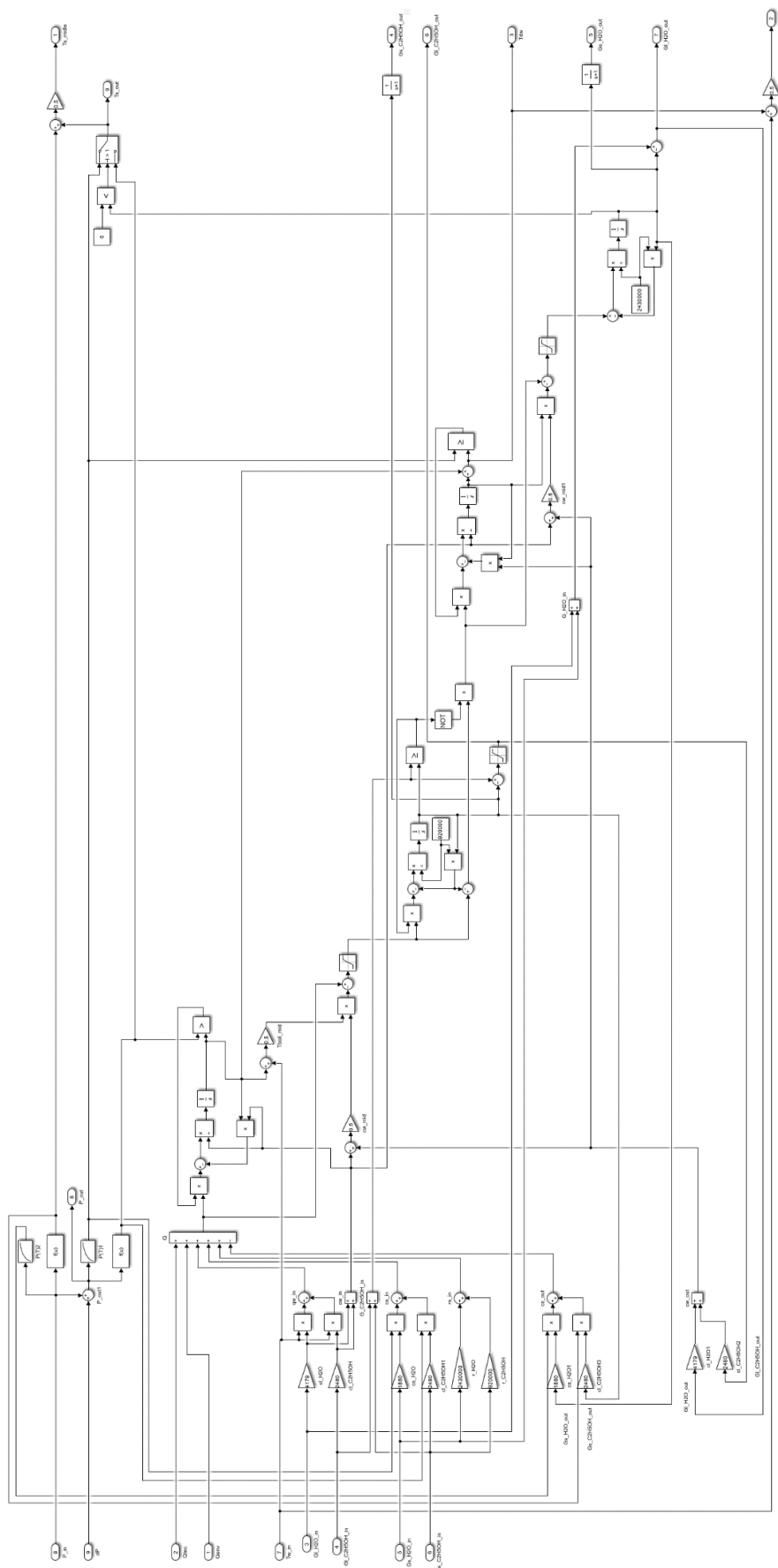


Рисунок 1.6 – Реалізація імітаційної моделі тепломасообмінних процесів у випарнику в середовищі Matlab Simulink

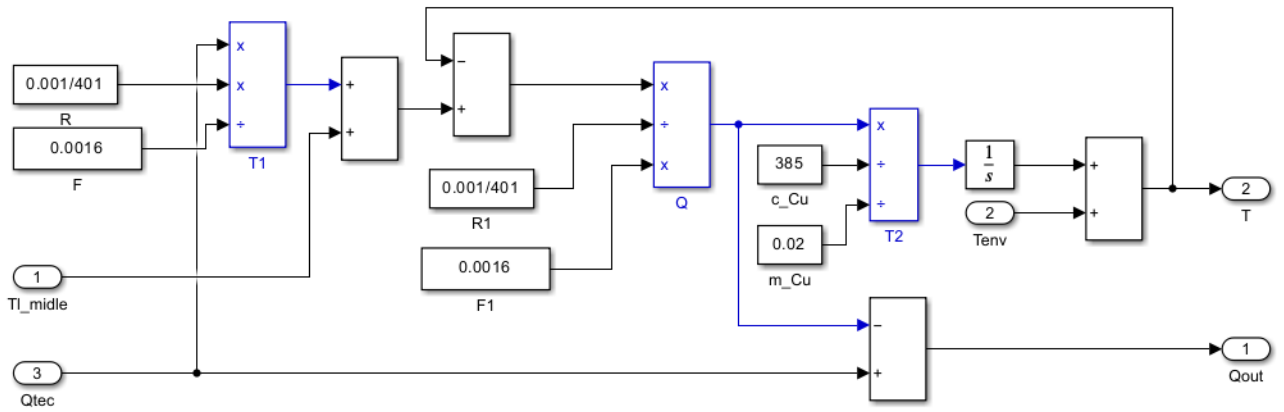


Рисунок 1.7 – Реалізація імітаційної моделі теплопередачі через плоску стінку в середовищі Matlab Simulink

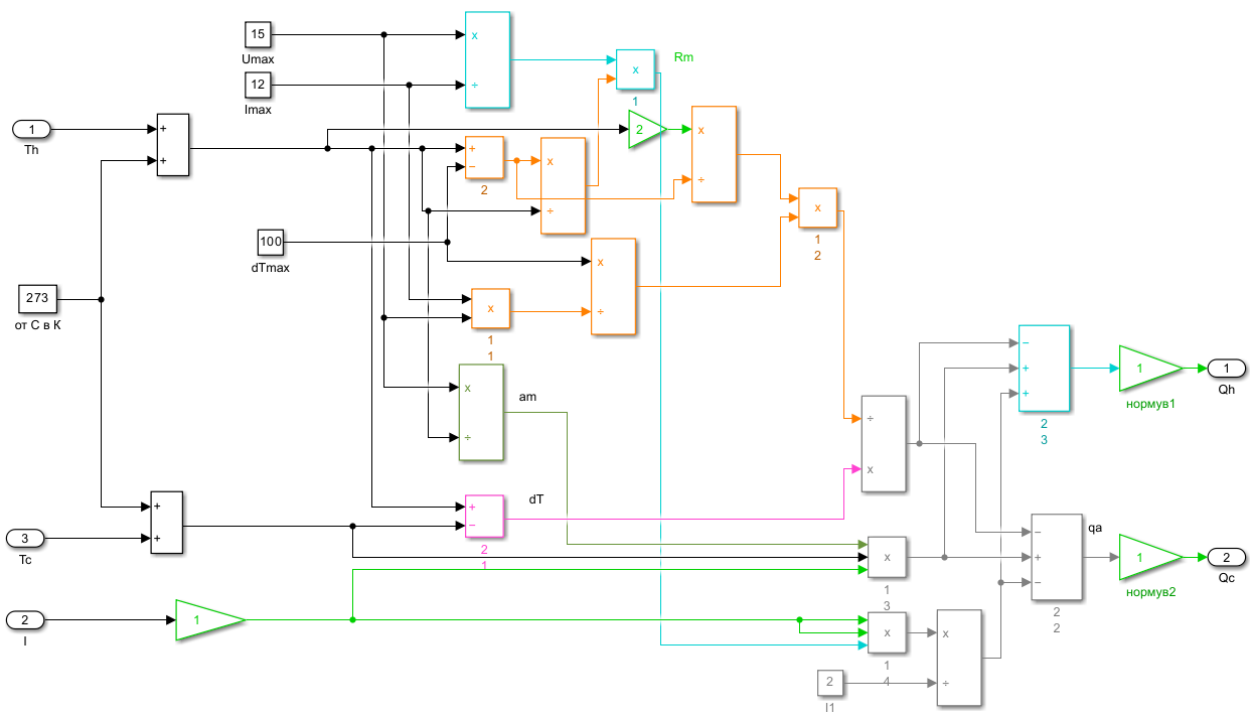


Рисунок 1.8 – Реалізація імітаційної моделі термоелектричного перетворювача в середовищі Matlab Simulink

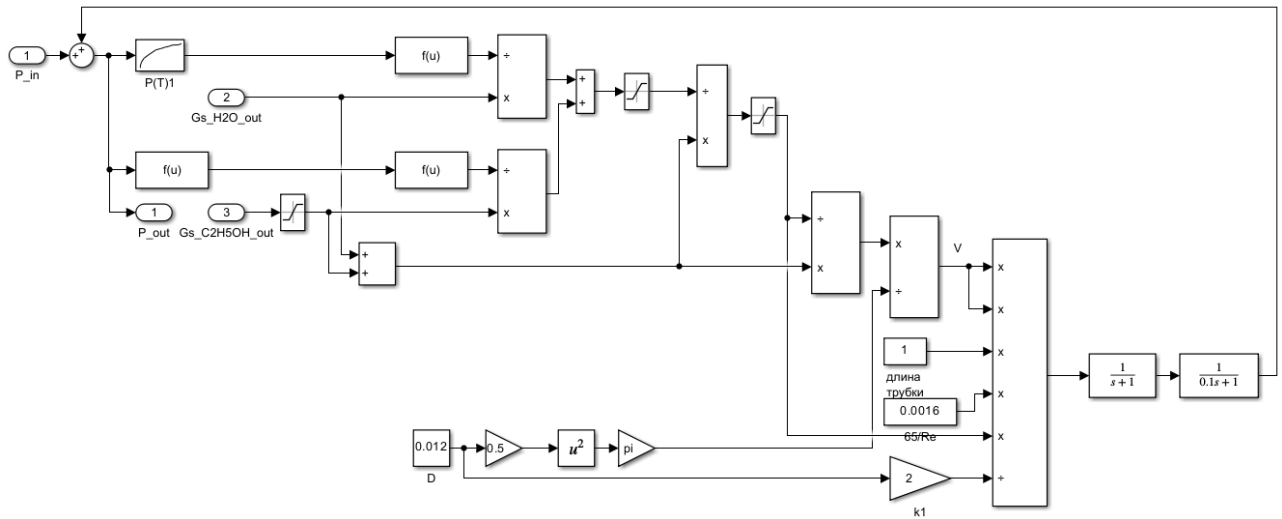


Рисунок 1.9 – Реалізація імітаційної моделі паропроводу від випарника до конденсатора в середовищі Matlab Simulink

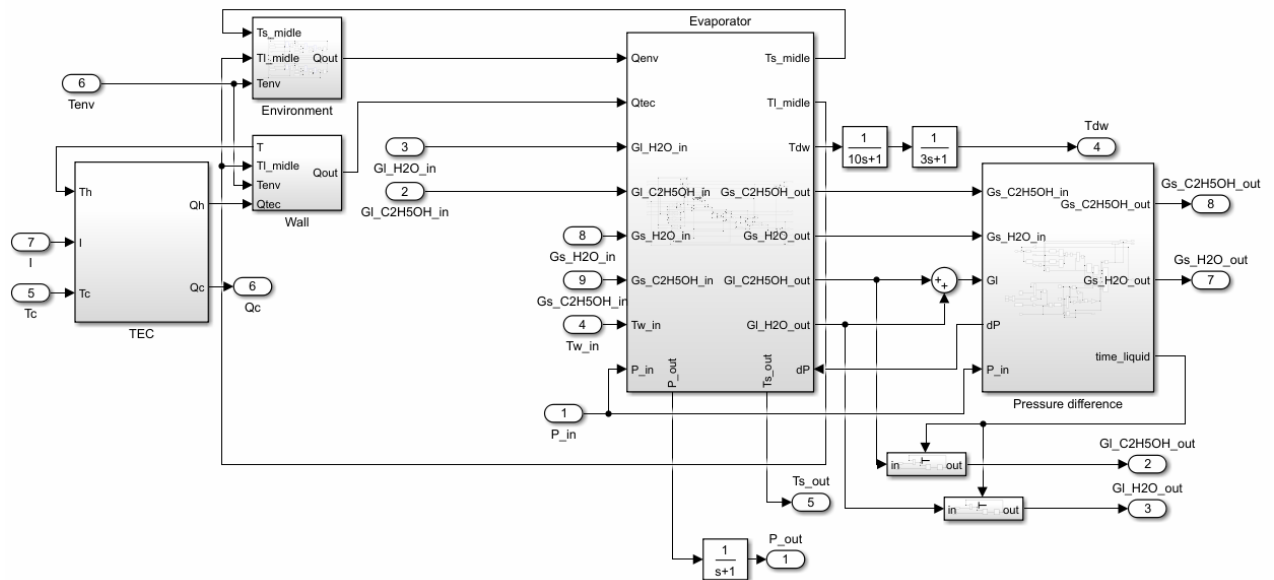


Рисунок 1.10 – Реалізація імітаційної моделі комірки випарника в середовищі Matlab Simulink

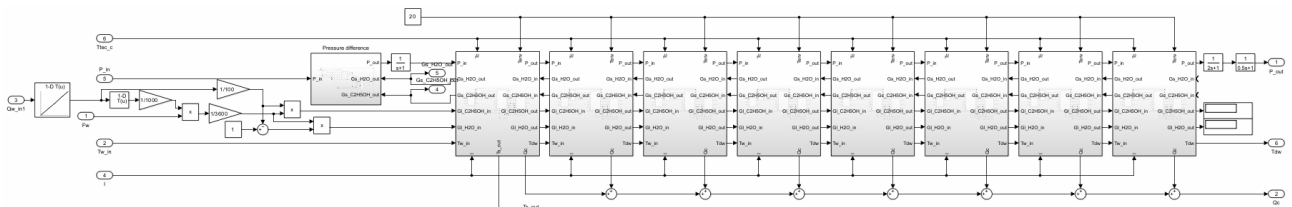


Рисунок 1.11 – Реалізація імітаційної моделі випарника в середовищі Matlab Simulink

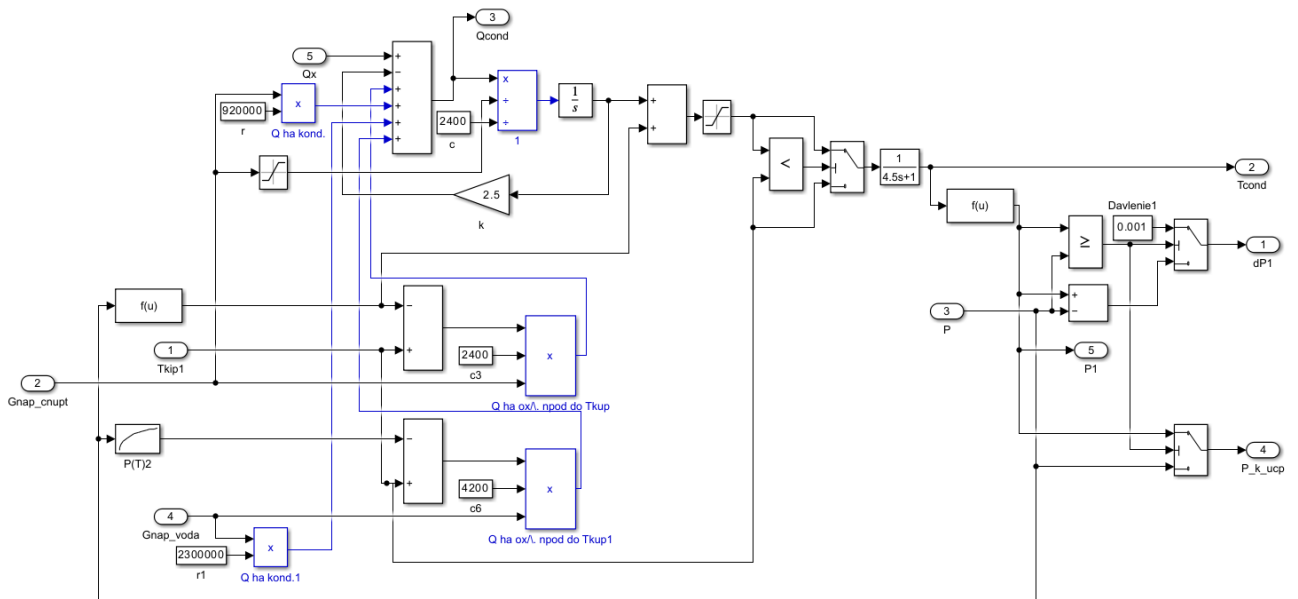


Рисунок 1.12 – Реалізація імітаційної моделі тепломасообмінних процесів у конденсаторі в середовищі Matlab Simulink

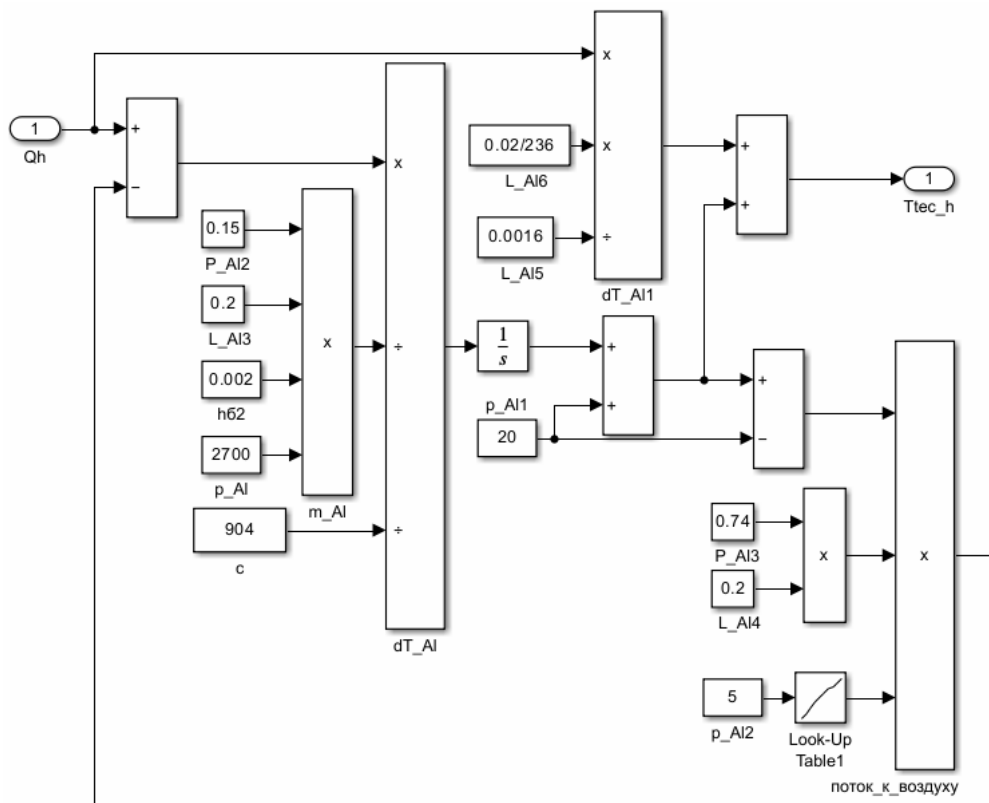


Рисунок 1.13 – Реалізація імітаційної моделі вентилятора з радіатором в середовищі Matlab Simulink

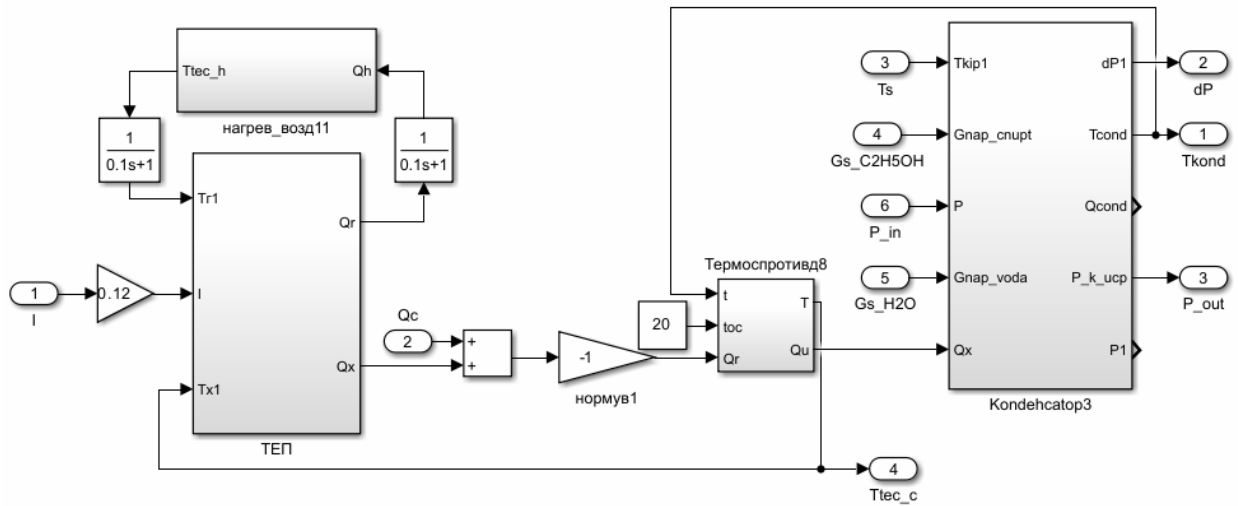


Рисунок 1.14 – Реалізація імітаційної моделі конденсатора в середовищі Matlab Simulink

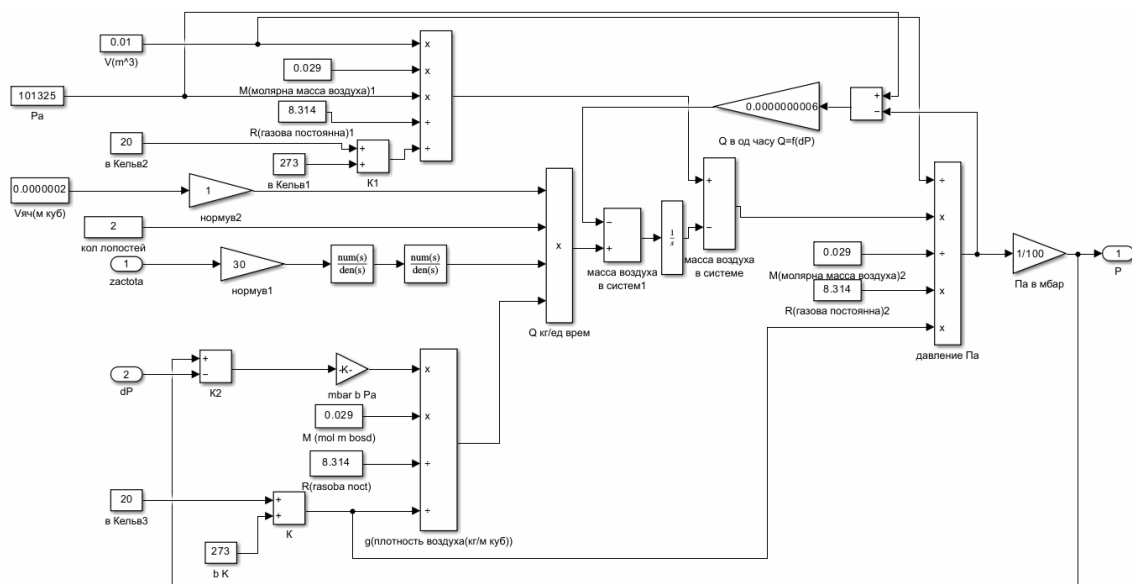


Рисунок 1.15 – Реалізація імітаційної моделі відкачки газів з апарату в середовищі Matlab Simulink

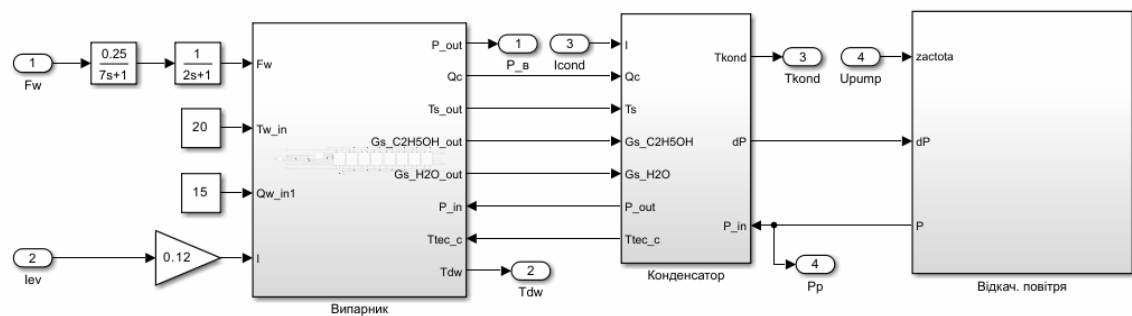


Рисунок 1.16 – Реалізація імітаційної моделі випарника в середовищі Matlab Simulink

1.5. Отримання перехідних та квазістатичних характеристик моделей та обґрунтування їх адекватності об'єкту

1.5.1. Отримання квазістатичних характеристик моделей та обґрунтування їх адекватності об'єкту

Експериментальне отримання статичних режимів будь-якого ОК класичними методами припускає допустиму кількість рівнів змінних для таких режимів, перехід між якими здійснюється в динамічних режимах. Це призводить до втрати інформації між вибраними рівнями для вакуумного випарника та конденсатора, робота яких включає фазові переходи речовини та газу, дискретизація статичних характеристик може не дозволити виявити точки змінних принципово важливих режимів. Крім того, організація класичного експерименту для отримання статичних характеристик достатньо важка, потребує значних затрат часу на перехідні процеси і підтвердження початку нового статичного процесу. Враховуючи викладене, для вивчення статичних властивостей моделі вакуумного випарника та конденсатора, були організовані експерименти, які можна розглядати як отримання квазістатичних характеристик. Їх суть складається в почерговій зміні з постійною, заранне вибраною, швидкістю значення витрати виноматеріалу від до 10 до 25 л/год, струмів живлення ТЕП випарника та конденсатора від 1,2 до 12А, та частоти обертання вакуумного насосу від 0-50Гц і реєстрації при цьому зміни температур та тисків в контрольних точках об'єкту (P_v – тиск на виході з випарника, $T_{дв}$ - температура ДВ на виході з випарника, T_k - температура в конденсаторі, P_p - розрідження в ресивері).

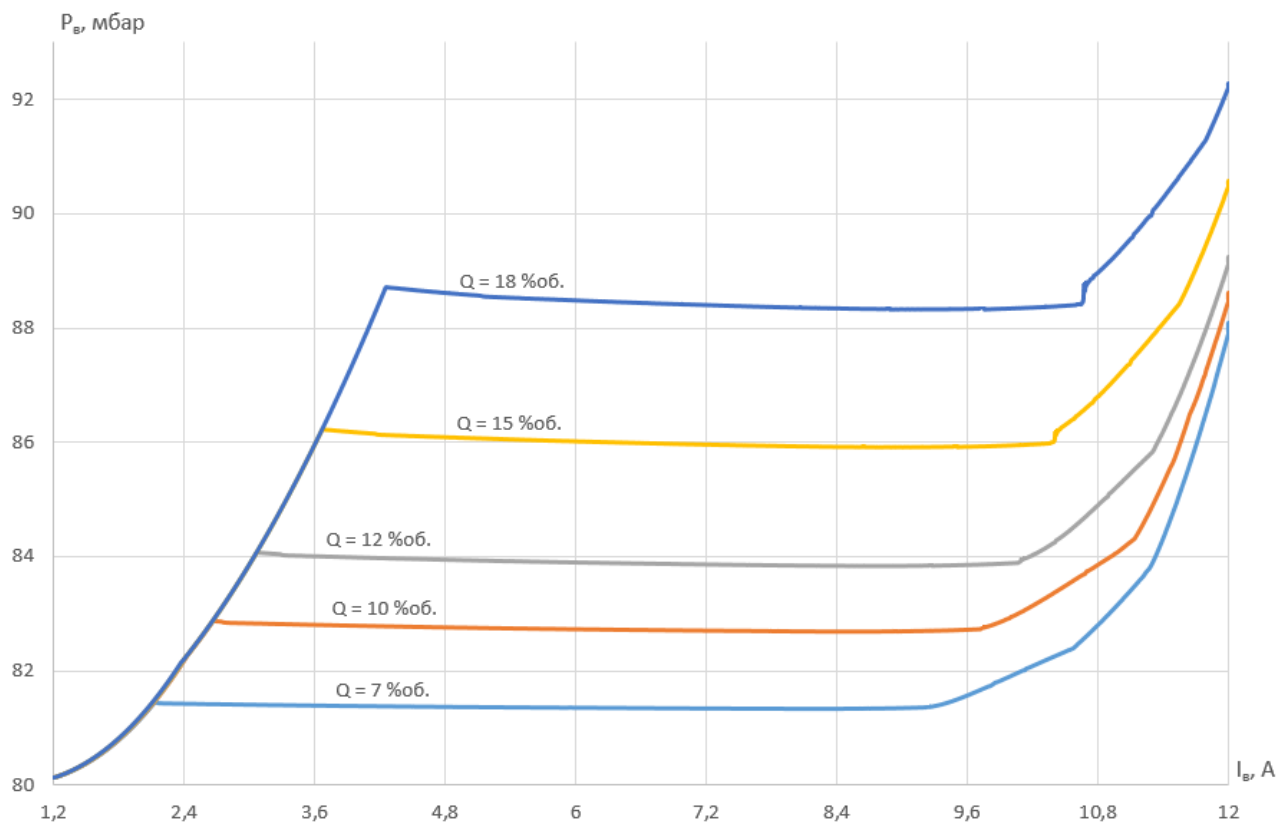


Рисунок 1.17 - Квазістатичні залежності тиску на виході з випарника від струму живлення ТЕП при різних концентраціях виноматеріалу

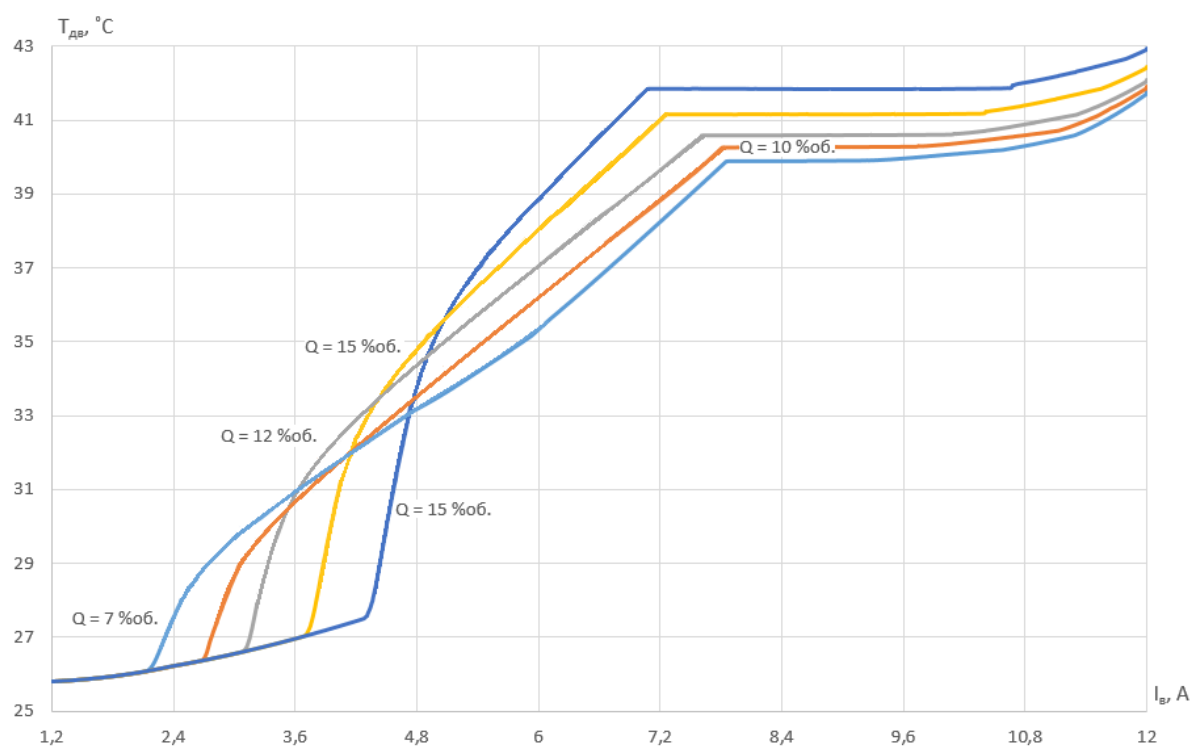


Рисунок 1.18 - Квазістатичні залежності температури деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника від струму живлення ТЕП при різних концентраціях виноматеріалу

З квазістатичних залежностей, представлених на рисунках 1.17, 1.18, видно, що при струмі живлення ТЕП випарника 2,2 – 4,3А кипіння спирту відбувається по всій довжині випарника. Це супроводжується суттєвим збільшенням тиску та не значним ростом температури вихідного виноматеріалу. При подальшому збільшенні струму живлення до 7 -7,9А на останніх комірках відбувається перегрів ДВ та, відповідно, стрімкий ріст температури ДВ. Це призводить до скорочення зони кипіння спирту, через що незначно зменшується тиск в кінці випарника. Зі збільшенням струму живлення до 9,6 -10,6А на додаток до кипіння спирту починає кипіти вода, але зона кипіння води не доходить до першої комірки з якої, через нероздільне кипіння водно-спиртової суміші, виходять тільки пари спирту, тому різке підвищення тиску, а відповідно і температури, не фіксується. При подальшому збільшенні струму живлення зона кипіння води розповсюджується і на першу комірку, через що кількість та склад парів у паропроводі між конденсатором та випарником змінюється, що супроводжується стрімким збільшенням тиску та температури.

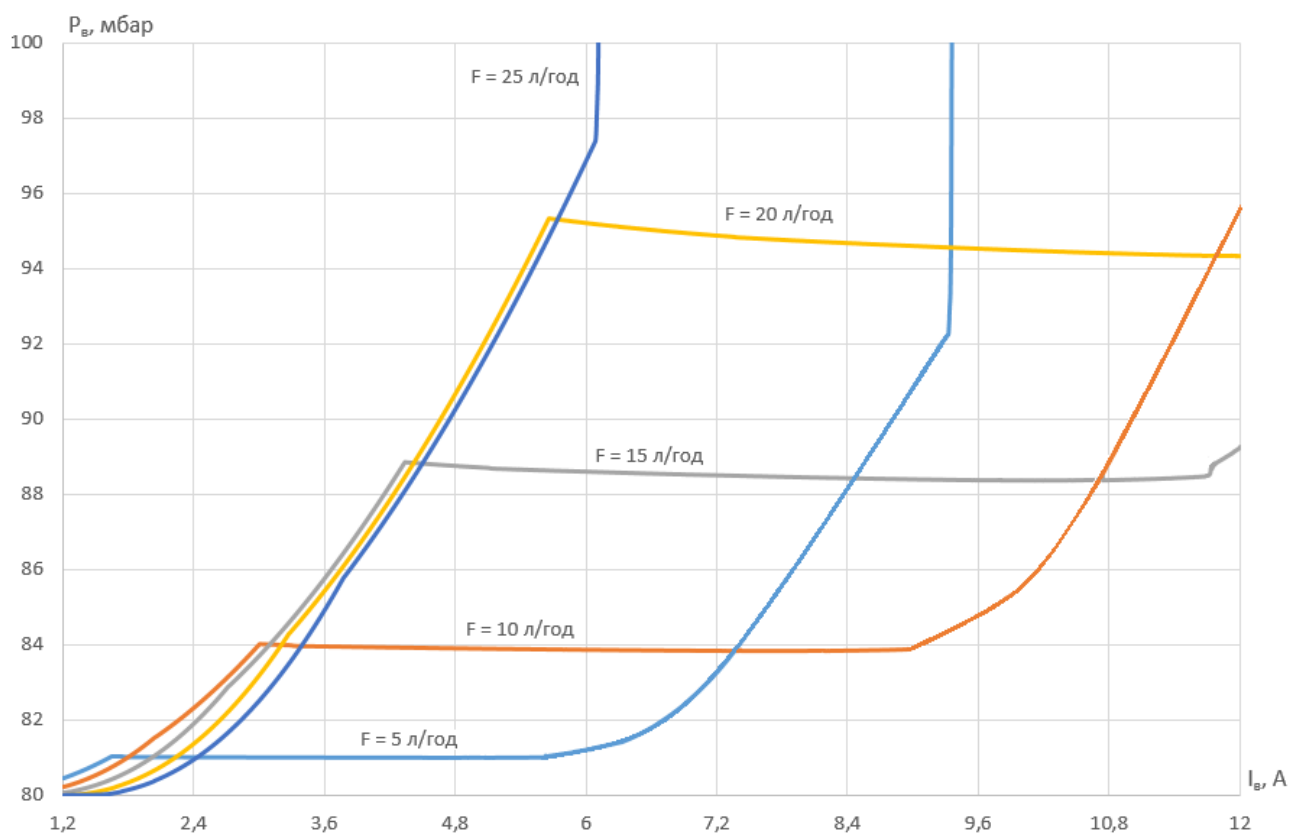


Рисунок 1.19 - Квазістатичні залежності тиску на виході з випарника від струму живлення ТЕП при різних витратах виноматеріалу

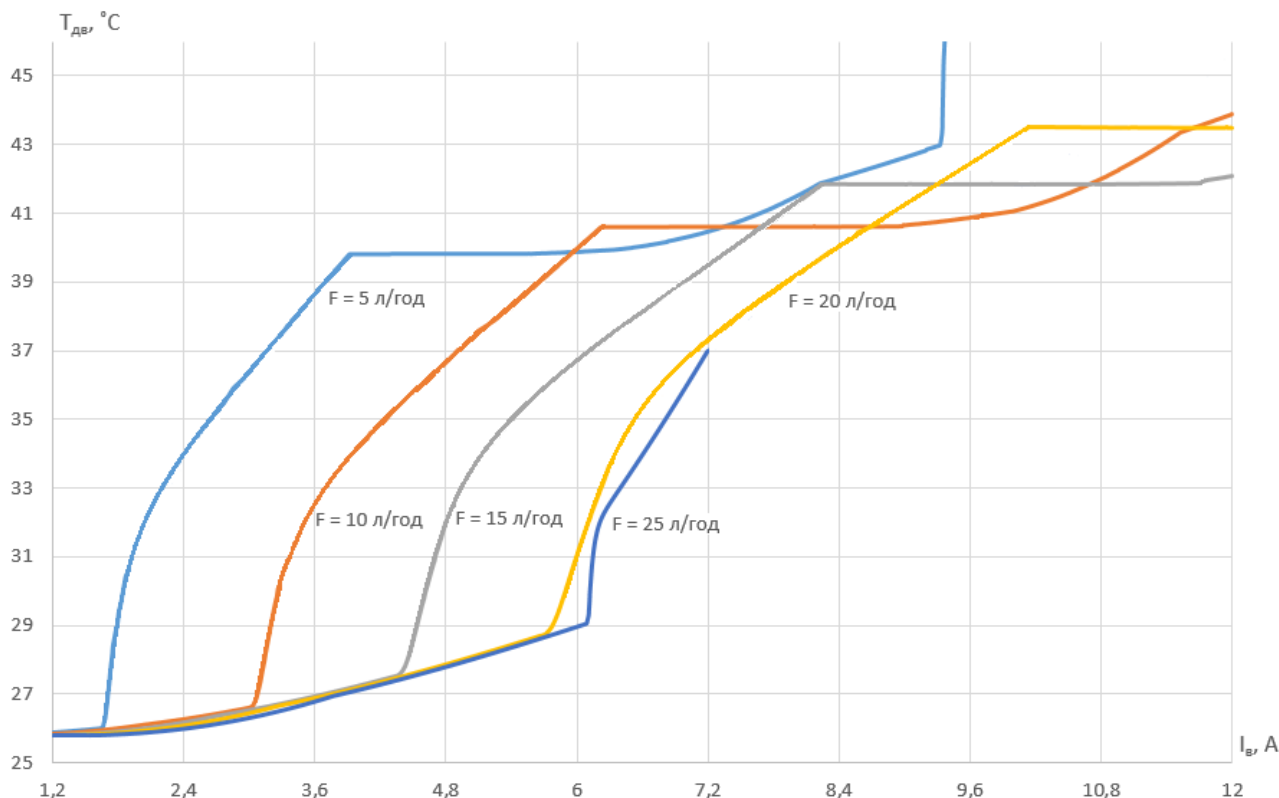


Рисунок 1.20 - Квазістатичні залежності температури деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника від струму живлення ТЕП при різних витратах виноматеріалу

На квазістатичних залежностях, представлених на рисунках 1.19, 1.20, видно, що при витратах виноматеріалу 5, 10, 15 л/годину відбуваються ті самі процеси що і на рисунках 1.17, 1.18. За різних витрат відрізняється тільки струм живлення ТЕП, при яких відбуваються «переломи». Але слід додати що при витратах 5 л/годину і струму 9,3 А або при витратах від 17 л/годину та струму від 5,7 А кількість парів занадто велика і потужності ТЕП конденсатора не вистачає для його випаровування через що більш стрімко підвищується тиск, а відповідно до нього і температура.

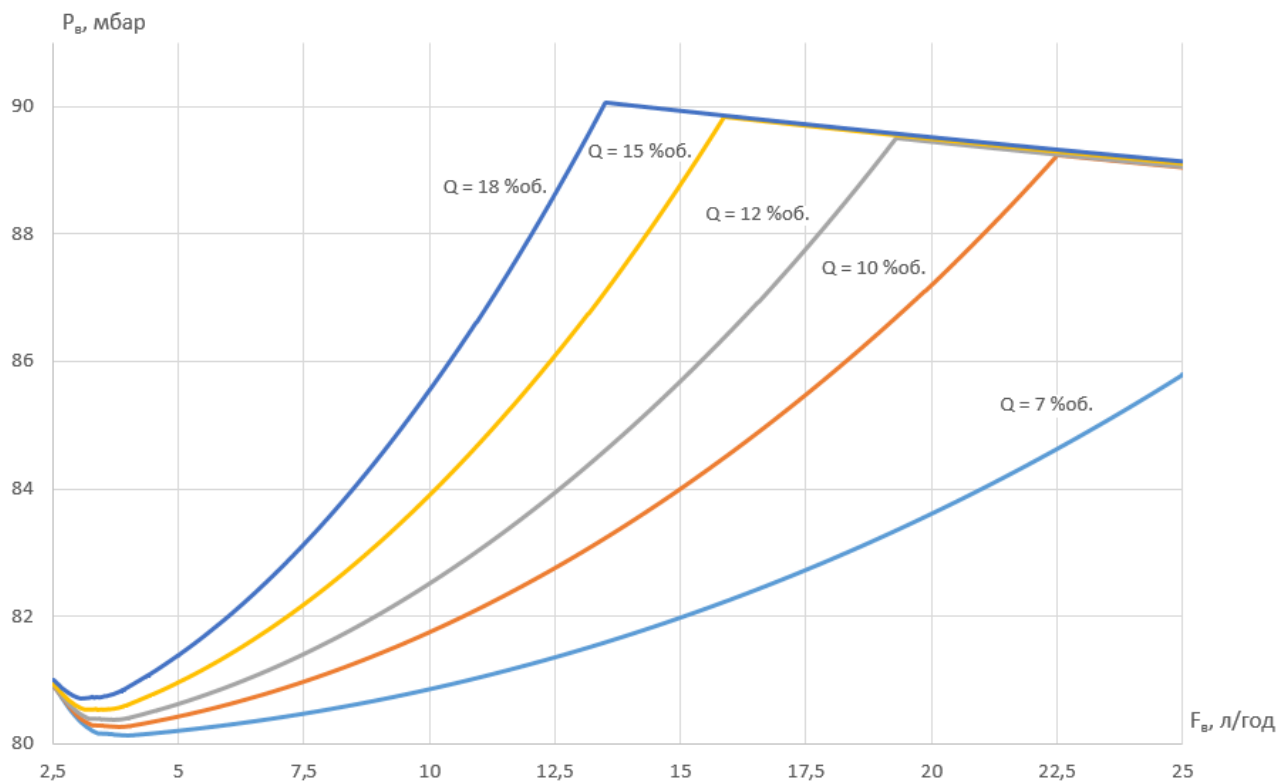


Рисунок 1.21 - Квазістатичні залежності тиску на виході з випарника від витрати виноматеріалу при різних концентраціях виноматеріалу

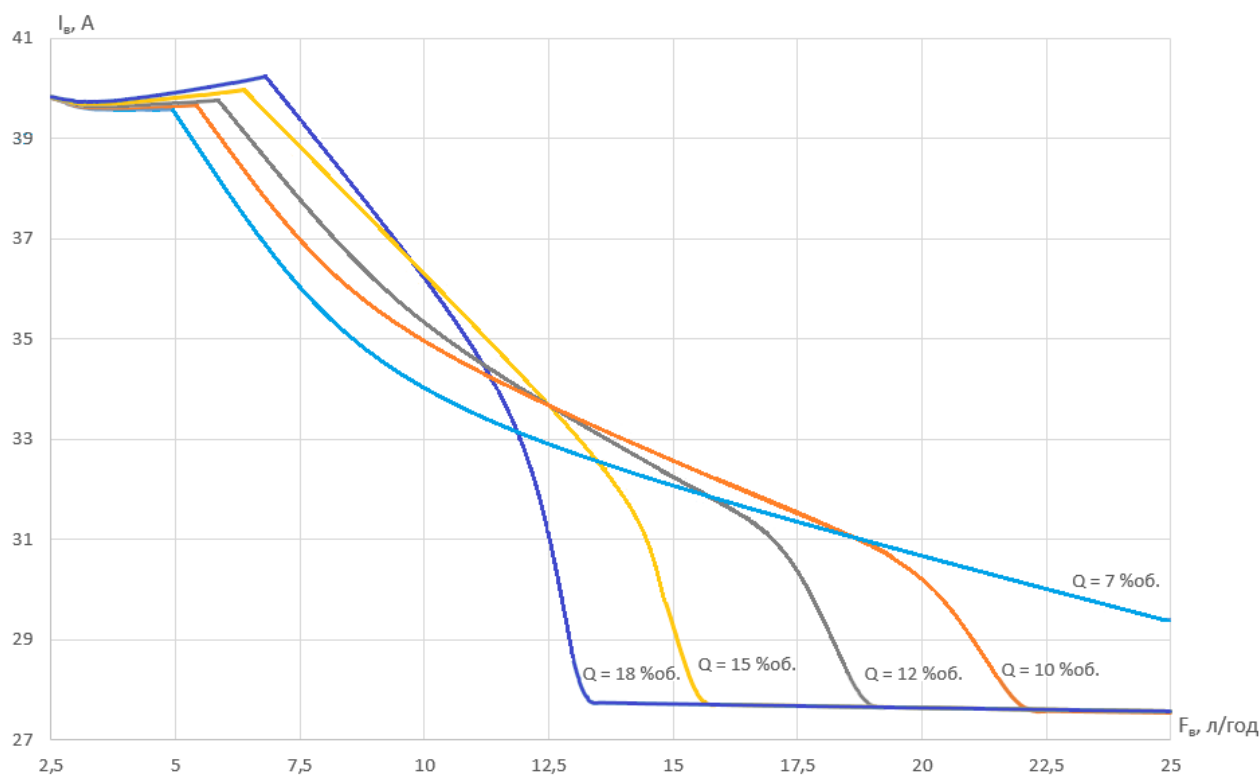


Рисунок 1.22 - Квазістатичні залежності температури деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника від витрати виноматеріалу при різних концентраціях виноматеріалу

На квазістатичних залежностях, представлених на рисунках 1.21, 1.22, видно, що при витратах виноматеріалу 5 – 7 л/годину та струму живлення ТЕП 4,56 А у випарнику, окрім алкоголю, випаровується вода, про що свідчить температура ДВ близько 40°C. Але через незначну витрату виноматеріалу тиск підвищується несуттєво. При подальшому збільшенні витрати вода перестає кипіти та відбувається поступове зменшення температури та збільшення тиску до моменту, при якому теплового потоку від ТЕП не вистачає для повного википання спирту з вина. В цей момент тиск максимально збільшується, а подальше збільшення витрати виноматеріалу призводить до більших теплових втрат. Внаслідок цього кількість парів (відповідно і тиск) зменшується, а температура стабілізується на рівні температури кипіння спирту, що залежить від тиску. Слід зазначити що при меншій концентрації алкоголю у вині менше витрачається енергії на фазовий перехід спирту, тому температура ДВ зменшується повільніше.

Загалом характер цих залежностей свідчить про те, що температура ДВ визначається, здебільшого, тиском на виході з випарника. Тиск в свою чергу залежить від розрідження в конденсаторі та перепаду тиску по довжині випарника та в паропроводі, що з'єднує випарник з конденсатором. Цей перепад тиску залежить від його гідравлічного опору та витрати пару. Витрата пари, відповідно, залежить від потужності нагріву, витрати виноматеріалу та концентрації спирту у ньому. Розрідження в конденсаторі залежить від тиску в ресивері та потужності охолодження ТЕП. При більшій концентрації спирту у виноматеріалі при випаровуванні всього спирту тиск в кінці випарника вищий, що підвищує температури кипіння алкоголю та води. При більшій концентрації спирту кількість залишкової води менше, що зумовлює швидший перегрів деалкоголізованого виноматеріалу. Через занадто велику кількість парів потужності ТЕП конденсатора не вистачає для повної їх конденсації через що підвищується тиск в конденсаторі.

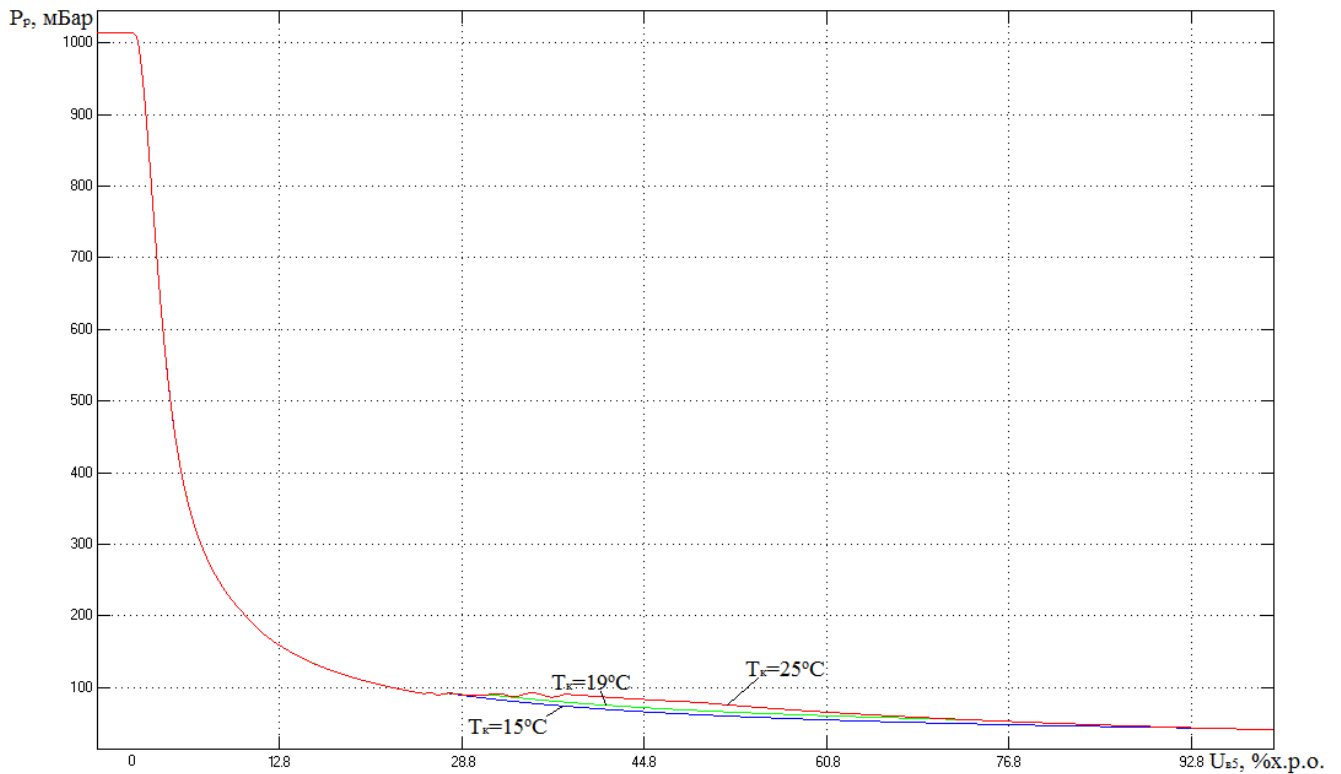


Рис. 1.23 – Квазістатичні залежності тиску в ресивері від частоти обертання вакуумного насосу при різних температурах в конденсаторі

На рисунку 1.23 представлені квазістатичні залежності тиску в ресивері від частоти обертання вакуумного насосу при різних температурах в конденсаторі. Таку статичну характеристику можна пояснити тим, що при малих розрідженнях проникання (підсос) повітря малий, та система виде себе як астатична, але при збільшенні розрідження підсос збільшується та система стає статичною, тобто витрати проникнутого повітря в апарат лінійно залежить від різниці тисків(атмосферного та розрідженням в апараті). Це пояснює зменшення коефіцієнта передачі насоса.

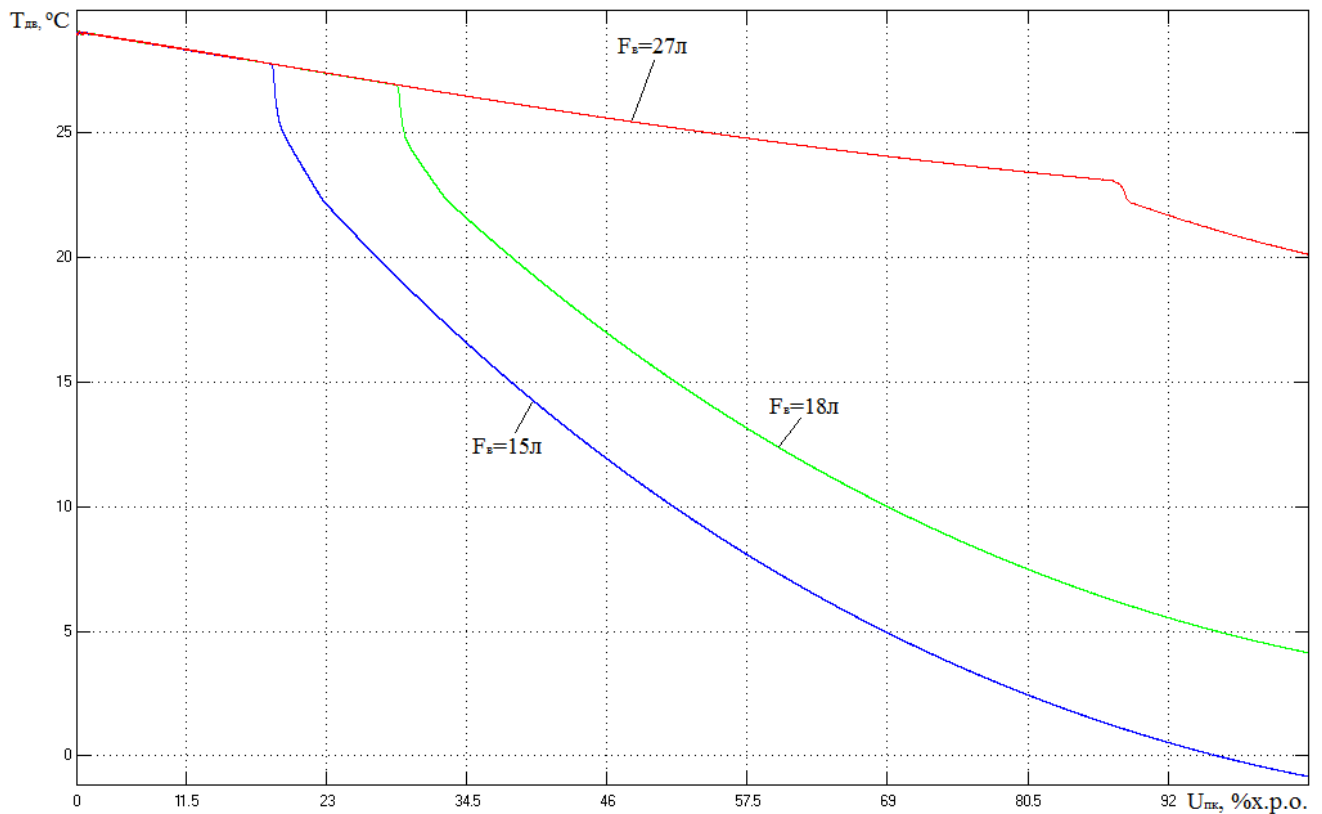


Рис. 1.24 – Квазістатичні залежності температури в конденсаторі від струму живлення ТЕП конденсатора при різній витраті виноматеріалу

На рисунку 1.24 представлені квазістатичні залежності температури в конденсаторі від струму живлення ТЕП конденсатора при різних витратах виноматеріалу. Характер цих залежностей свідчить про те, що температура в конденсаторі визначається здебільшого кількістю парів, яка в свою чергу залежить від витрати виноматеріалу. Також зменшення температури викликає зменшення енергетичної ефективності термоелектричного охолоджувача.

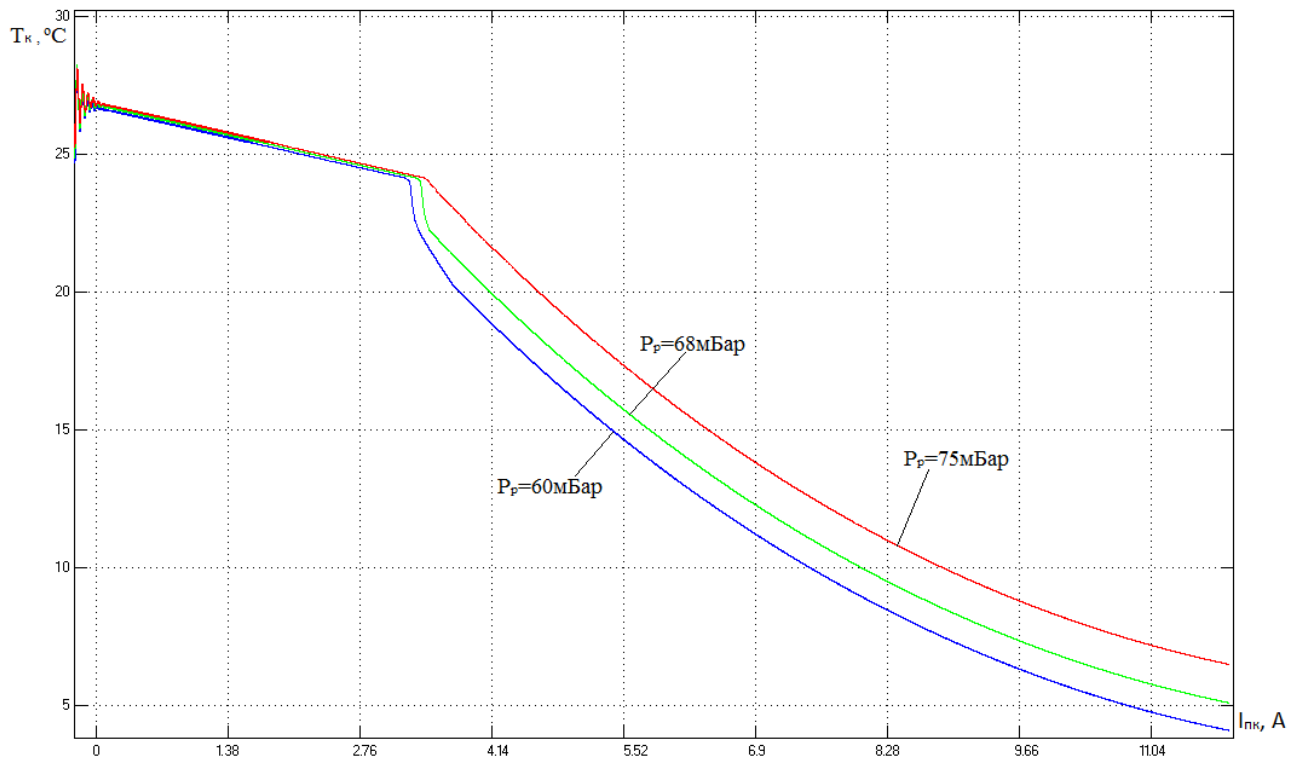


Рис. 1.25 – Квазістатичні залежності температури в конденсаторі від струму живлення ТЕП конденсатора при різному тиску в ресивері

На рисунку 1.25 представлені квазістатичні залежності температури в конденсаторі від струму живлення ТЕП конденсатора при різних тисках у ресивері. Характер цих залежностей свідчить про те, що температура в конденсаторі визначається температурою конденсації парів, яка в свою чергу залежить від тиску в ресивері. Також зменшення температури викликає зменшення енергетичної ефективності ТЕП.

1.5.2 Отримання перехідних характеристик та параметрична ідентифікація моделей першого порядку основних каналів перетворення.

Проведення параметричної ідентифікації моделей першого порядку за каналом $I_B - T_{дв}$.

Для параметричної ідентифікації моделей ОК зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК (K_0), сталу часу (T_0) і час запізнення (τ_0).

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta T_{\text{дв}}}{\Delta I_{\text{е}}} = \frac{30,7 - 27,9}{39 - 37} = 1,4 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{ x.p.o.}$$

Для ідентифікації сталої часу та часу запізнення для моделі 1-го порядку доцільно використовувати методики «двох загальних точок».

Для моделі 1-го порядку

$$T_{\text{дв } 1,0} = 30,7 - 27,9 = 2,8^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{дв } 0,33} = 0,33 \cdot 2,8 + 27,9 = 28,8^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{дв } 0,7} = 0,7 \cdot 2,8 + 27,9 = 29,9^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.26), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

$$t_{0,33} = 12,8\text{с};$$

$$t_{0,7} = 20,1\text{с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 9,2\text{с}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = 9\text{с}$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_0(p) = \frac{1,4 \cdot e^{-9,2p}}{9p + 1}$$

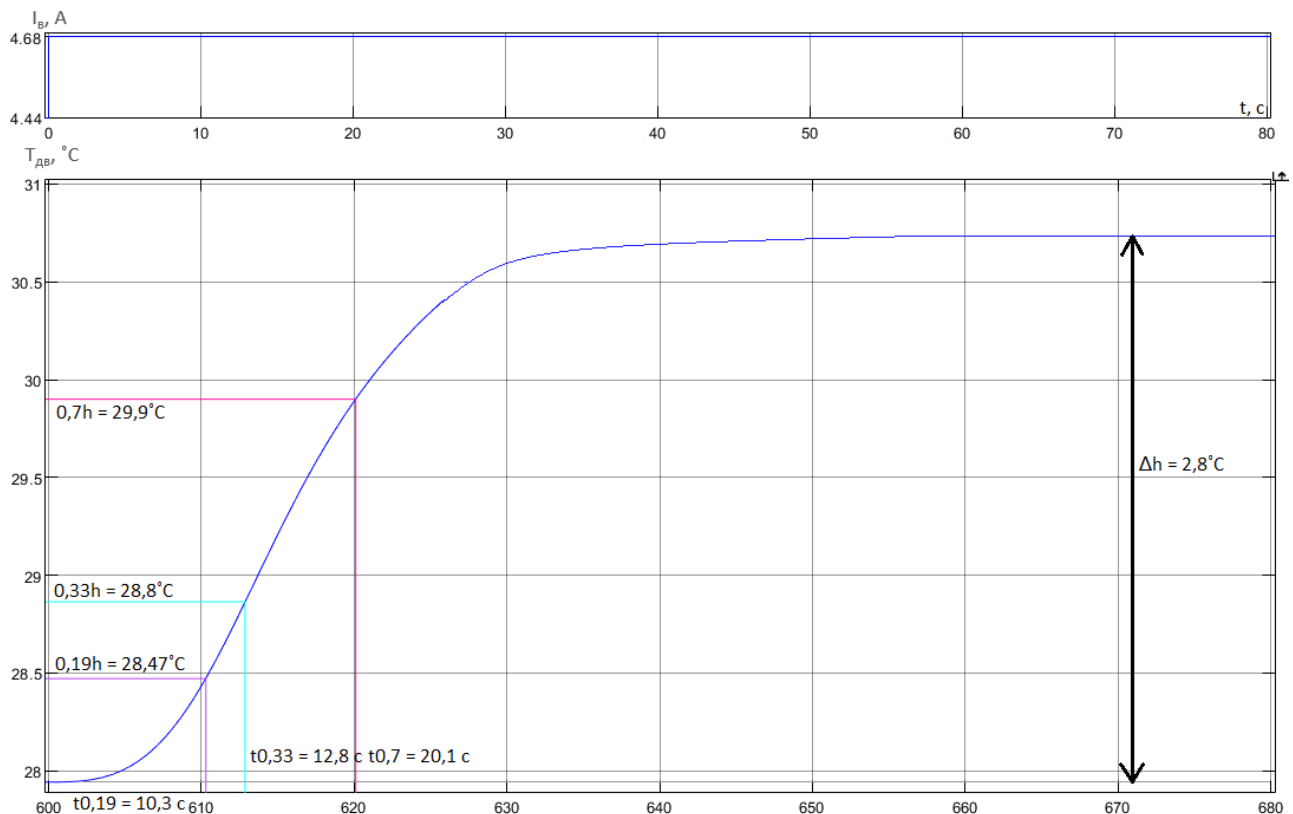


Рисунок 1.26 - Перехідна характеристика каналу $I_B - T_{ДВ}$ та проведення параметричної ідентифікації її моделі першого порядку

Проведення параметричної ідентифікації моделей першого порядку за каналом $F_B - P_B$.

Для параметричної ідентифікації моделей ОК зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК (K_0), сталу часу (T_0) і час запізнення (τ_0).

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta P_B}{\Delta F_6} = \frac{88,8 - 87,7}{60 - 57} = 0,28 \text{ мбар} / \% \text{ х.р.о.}$$

Для ідентифікації сталої часу та часу запізнення для моделі 1-го порядку доцільно використовувати методики «двох загальних точок».

Для моделі 1-го порядку

$$P_{6,1,0} = 88,8 - 87,7 = 0,28 \text{ мбар};$$

$$P_{6,0,33} = 0,33 \cdot 0,28 + 87,7 = 88,05 \text{ мбар};$$

$$P_{6,0,7} = 0,7 \cdot 0,28 + 87,7 = 88,5 \text{ мбар};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.27), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

$$t_{0,33} = 37,5\text{c};$$

$$t_{0,7} = 44,4\text{c}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 34\text{c}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = 8,6\text{c}$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_0(p) = \frac{0,28 \cdot e^{-34p}}{8,6p + 1}$$

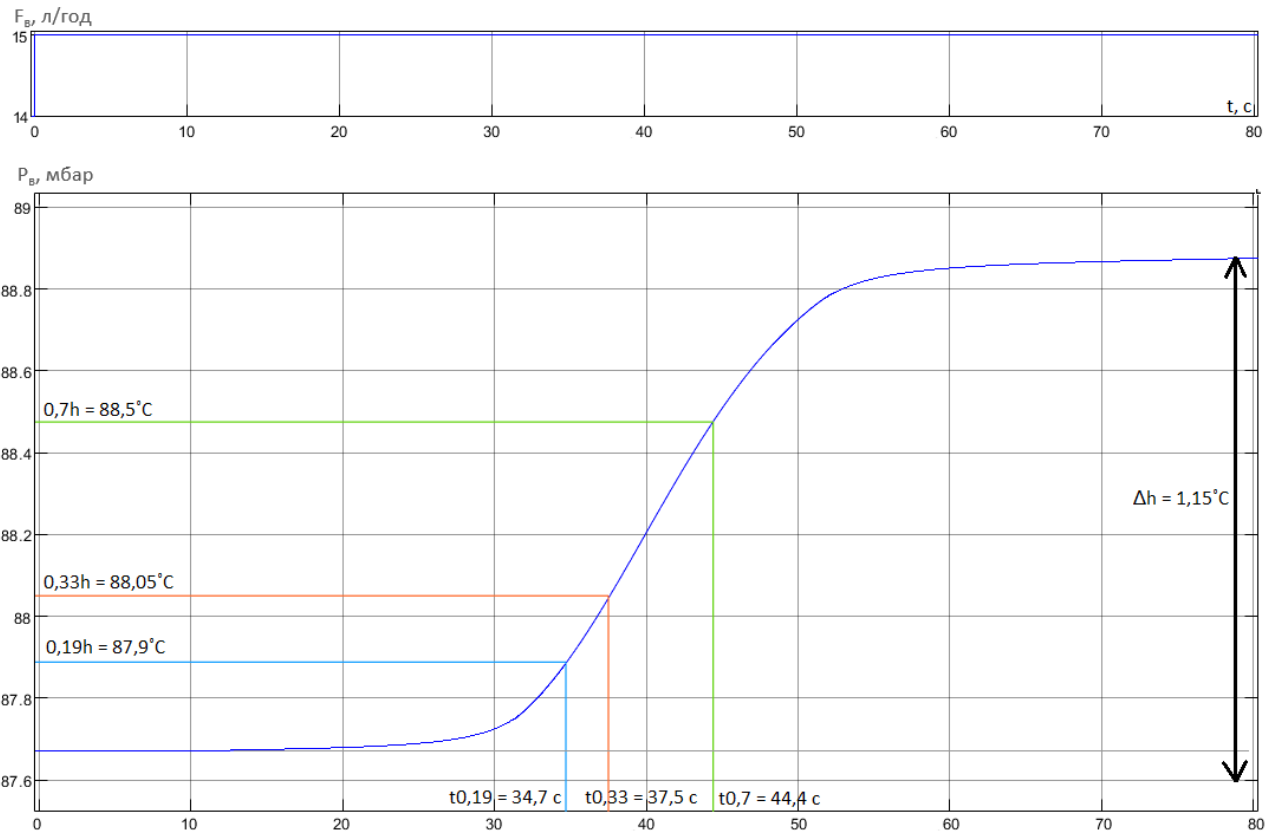


Рисунок 1.27 - Перехідна характеристика каналу $F_B - P_B$ та проведення параметричної ідентифікації її моделі першого порядку

Проведення параметричної ідентифікації моделей першого порядку за каналом $F_B - T_{дв}$.

Для параметричної ідентифікації моделей ОК зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК (K_0), сталу часу (T_0) і

час запізнення (τ_0).

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta T_{\text{дв}}}{\Delta F_e} = \frac{27,9 - 31}{60 - 56} = -0,8 \text{ } ^\circ\text{C} / \%x.p.o.$$

Для ідентифікації сталої часу та часу запізнення для моделі 1-го порядку доцільно використовувати методики «двох загальних точок».

Для моделі 1-го порядку

$$T_{\text{дв } 1,0} = 27,9 - 31 = -3,1^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{дв } 0,33} = 0,33 \cdot (-3,1) + 31 = 30^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{дв } 0,7} = 0,7 \cdot (-3,1) + 31 = 28,8^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.28), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

$$t_{0,33} = 20,9\text{с};$$

$$t_{0,7} = 29,3\text{с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 16,7\text{с}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = 10,5\text{с}$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_0(p) = \frac{-0,8 \cdot e^{-16,7p}}{10,5p + 1}$$

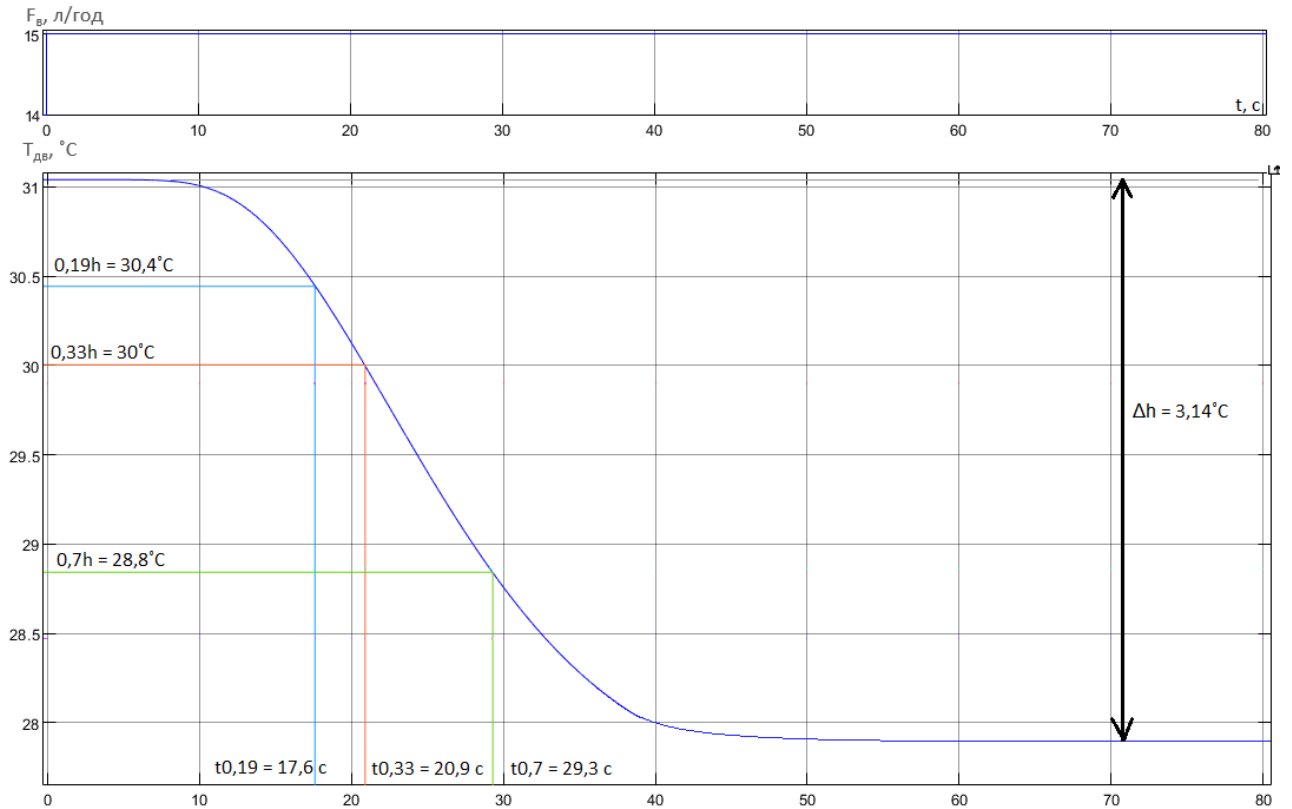


Рисунок 1.28 - Перехідна характеристика каналу $F_B - T_{дв}$ та проведення параметричної ідентифікації її моделі першого порядку

Проведення параметричної ідентифікації моделей першого порядку за каналом $I_{ПК} - T_K$.

Для параметричної ідентифікації моделей ОК зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК (K_0), сталу часу (T_0) і час запізнення (τ_0).

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta T_K}{\Delta u} = \frac{19,9 - 17,9}{35 - 40} = -0,4 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{ x.p.o.}$$

Для ідентифікації сталої часу та часу запізнення як для моделі 1-го порядку, так і для моделі 2-го порядків доцільно використовувати методики «двох загальних точок».

Для моделі 1-го порядку

$$\square T_{K 1,0} = 19,9 - 17,9 = 2^\circ\text{C};$$

$$T_{K 0,33} = 19,9 - 0,33 \cdot 2 = 19,2^\circ\text{C};$$

$$T_{K 0,7} = 19,9 - 0,7 \cdot 2 = 18,47^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.29), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

$$t_{0,33} = 37,6c;$$

$$t_{0,7} = 107,8c.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 37,6 - 107,8) = 2,5c$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (107,8 - 2,5) / 1,2 = 87,8c$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_0(p) = \frac{-0,4 \cdot e^{-2,5p}}{87,8p + 1}$$

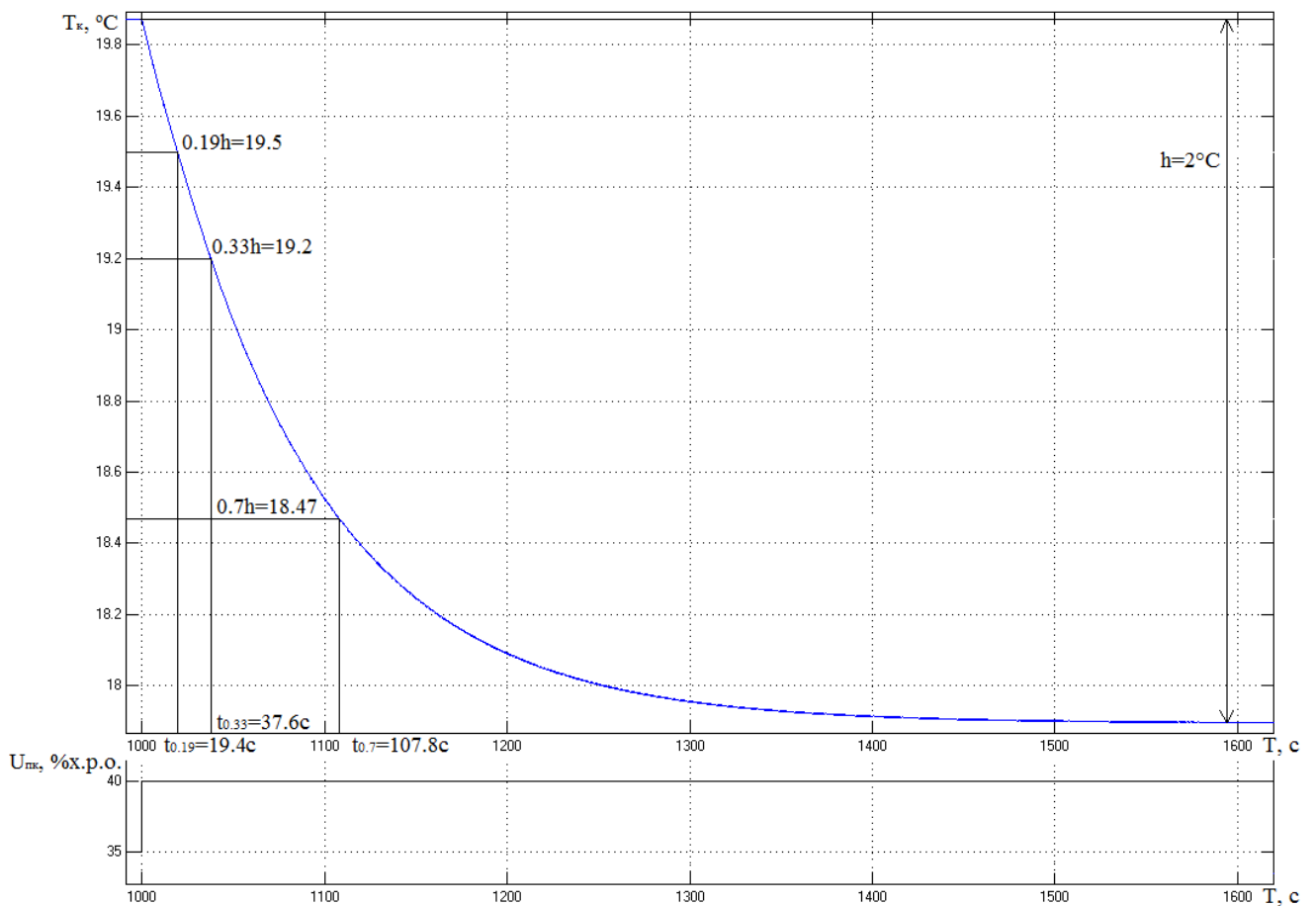


Рисунок 1.29 – Параметрична ідентифікація моделі ОК $I_{пк} - T_k$

Проведення параметричної ідентифікації моделей першого та другого порядків за каналом $u_{н4} - P_p$.

Для параметричної ідентифікації моделей ОК зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК (K_0), сталу часу (T_0) і

час запізнення (τ_0).

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta P_p}{\Delta u} = \frac{67,4 - 76,8}{50 - 40} = -0,94 \text{ мБар} / \text{‰х.р.о.}$$

Для ідентифікації сталої часу та часу запізнення як для моделі 1-го порядку, так і для моделі 2-го порядків доцільно використовувати методики «двох загальних точок».

Для моделі 1-го порядку

$$\square P_{p1,0} = 76,8 - 67,4 = 9,4 \text{ мБар};$$

$$P_{p0,33} = 0,33 \cdot 9,4 + 67,4 = 70,5 \text{ мБар};$$

$$P_{p0,7} = 0,7 \cdot 9,4 + 67,4 = 73,9 \text{ мБар};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.30), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

$$t_{0,33} = 9,7 \text{ с};$$

$$t_{0,7} = 19,7 \text{ с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 9,7 - 19,7) = 4,7 \text{ с}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (19,7 - 4,7) / 1,2 = 12,5 \text{ с}$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_0(p) = \frac{-0,94 \cdot e^{-4,7p}}{12,5p + 1}$$

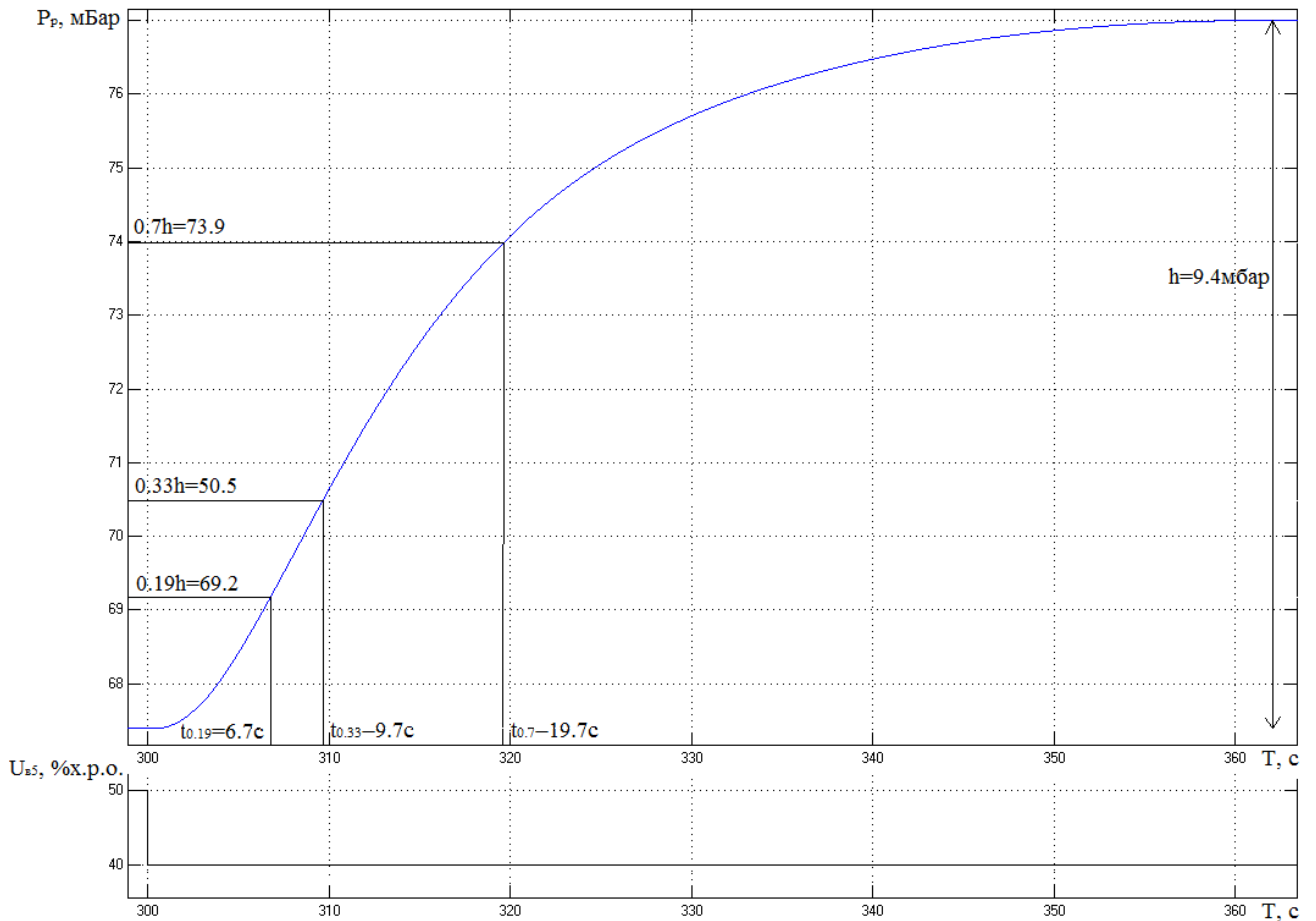


Рисунок 1.30 – Параметрична ідентифікація моделі ОК $u_{н4} - P_p$

1.6 Висновки з розділом.

В розділі було розглянуто суть технологічного процесу деалкоголізації вина в потоці, його схема та конструкцію агрегату, що реалізує даний процес. Визначено регламенти ведення ТП та виділено регульовані координати, в якості яких доцільно обрати температури ДВ на виході випарника $T_{дв}$ і в конденсаторі T_k , тиск на виході випарника P_v та тиск у ресивері P_p . Необхідною умовою вирішення задач керування є наявність керуючих дій, що повинні бути вхідними змінними (координатами) ОК і їх кількість повинна бути рівною кількості регульованих змінних. Для процесу деалкоголізації вина в потоці до керуючих дій доцільно віднести струми живлення ТЕП випарника $I_{пв}$ і конденсатора $I_{пк}$, витрата виноматеріалу F_v та частото обертання вакуумного насосу $u_{н4}$. Всі інші вхідні дії, окрім керуючих, класифікуємо як некеровані збурення.

У ході виконання розділу була розроблена структурна схема процесу

деалкоголізації вина в потоці та структурна схема його математичної моделі. Також в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink була відтворена математична модель об'єкту керування. В результаті моделювання математичної моделі ОК були отримані його динамічні та квазістатичні характеристики, а також доведена адекватність аналітичної математичної моделі процесу деалкоголізації вина в потоці як ОК. За всіма каналами ОК має статичні властивості, параметрична ідентифікація моделей каналів керування проводилася за методикою двох спільних точок першого порядку.

РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП

2.1 Формулювання задач керування, вимог до їх розв'язку і вибір основних принципів побудови автоматичних систем

2.1.1 Формулювання задач керування технологічним агрегатом

2.1.1.1 Декомпозиція загальної задачі керування технологічним агрегатом і формулювання окремих задач.

Загальною метою керування є керування матеріальними та енергетичними потоками для отримання властивостей продукту необхідного виду і якості.

Із загальної мети керування можна виділити окремі задачі:

- підтримання вихідних змінних об'єкту керування (P_v , $T_{дв}$, T_k , P_p) на їх заданому значенні ($P_v^{зд}$, $T_{дв}^{зд}$, $T_k^{зд}$, $P_p^{зд}$) - задача регулювання.

- пристосування в процесі роботи об'єкту управління до його змінних властивостей - задача адаптації;

- забезпечення ефективних режимів роботи об'єкту керування - задача оптимізації;

- забезпечити ввімкнення і вимкнення при пусках, зупинках, аварійних ситуаціях - задача логічного керування.

2.1.1.2 Обґрунтування необхідності і доцільності автоматизації кожної з окремих завдань управління.

Необхідно і доцільно автоматизувати кожне із завдань керування.

Для завдання регулювання автоматизація необхідна для автоматичного регулювання заданої змінної в околиці бажаного значення із заданою точністю без фізичної участі людини. Для якісної і економічно доцільною реалізації технологічного процесу деалкоголізації вина в потоці необхідно регулювати тиск в кінці випарника P_v , температуру деалкоголізованого виноматеріалу $T_{дв}$, температуру в конденсаторі T_k , тиск у ресивері P_p .

Для завдання адаптації необхідна автоматизація пристосування в процесі роботи об'єкта управління до його змінних властивостей, заданим. Розглянутий технологічний процес є об'єктом неперервної дії. Властивості продукту істотно впливають на динамічні властивості об'єкта. Але ці властивості в процесі роботи установки на тривалому інтервалі часу змінюються мало. Цю задачу можна вирішити, змінюючи (коригуючи) настройки регуляторів в процесі роботи установки.

Для задачі оптимізації слід автоматизувати пошук оптимального протікання процесу, мінімізувати витрати енергії, брак готової продукції, збільшити продуктивність обладнання. Для процесу деалкоголізації вина в потоці цю задачу можна вирішити, підвищивши вимоги до розв'язання задачі регулювання. Головним джерелом підвищення економічної ефективності цього процесу є зниження витрат електроенергії на реалізацію технологічного процесу.

Процес деалкоголізації вина в потоці є об'єктом неперервної дії. Для нього є характерним тривалий робочий режим, на який об'єкт виводять в дистанційному режимі. Режими пуску і зупинки є неекономічними режимами роботи установки. Підвищення економічної ефективності роботи цього процесу в режимах пуску і зупинки можна досягти, автоматизувавши ці завдання. Тому для даного технологічного процесу актуальна автоматизація задачі логічного керування.

2.1.1.3 Формалізація вимог до гранично-припустимих статичних і динамічних відхилень регульованих змінних від відповідних заданих значень перехідних і динамічно сталих процесів і подання їх у формі регламентних зон регульованих змінних.

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів (див. табл. 1.1) тиск в кінці випарника P_v має підтримуватися на рівні 90 мбар з точністю $\pm 0,5$ мбар. За цим параметром припустимі короточасні відхилення до ± 3 мбар протягом часу не більше 60 секунд. Регламентна зона за цим параметром наведена на рис. 2.1. Температура ДВ $T_{дв}$ має підтримуватися на рівні 29°C з

точністю $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. За цим параметром припустимі короткочасні відхилення до $\pm 1^{\circ}\text{C}$ протягом часу не більше 60 секунд. Регламентна зона за цим параметром наведена на рис. 2.2. Температура в конденсаторі $T_{\text{к}}$ має підтримуватися на рівні 19°C з точністю $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. За цим параметром припустимі короткочасні відхилення до $\pm 1^{\circ}\text{C}$ протягом часу не більше 60 секунд. Регламентна зона за цим параметром наведена на рис. 2.3. Тиск у ресивері $P_{\text{р}}$ має підтримуватися на рівні 80 мбар з точністю ± 5 мбар. За цим параметром припустимі короткочасні відхилення до ± 2 мбар протягом часу не більше 60 секунд. Регламентна зона за цим параметром наведена на рис. 2.4.

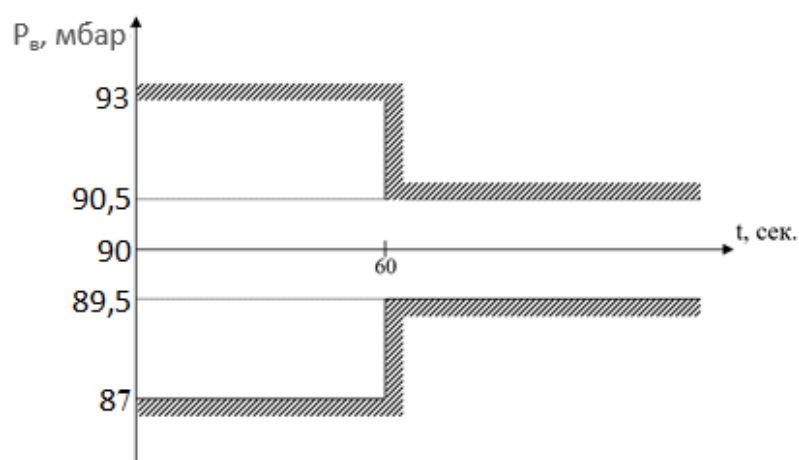


Рисунок 2.1 – Регламентна зона для тиску в кінці випарника $P_{\text{в}}$

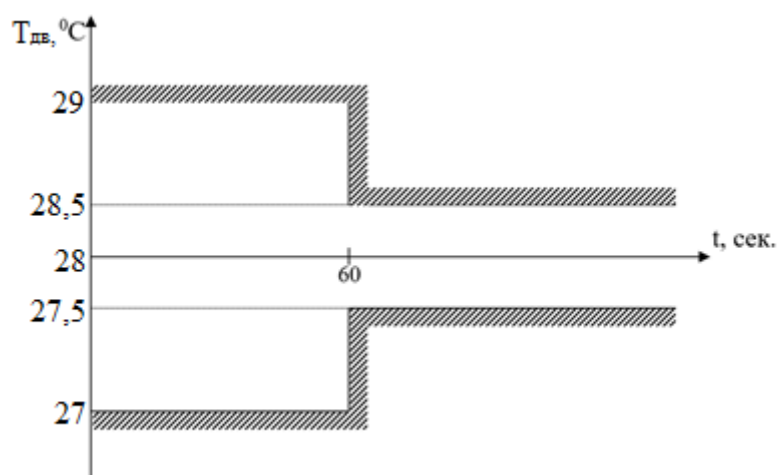


Рисунок 2.2 – Регламентна зона для температури ДВ $T_{\text{дв}}$

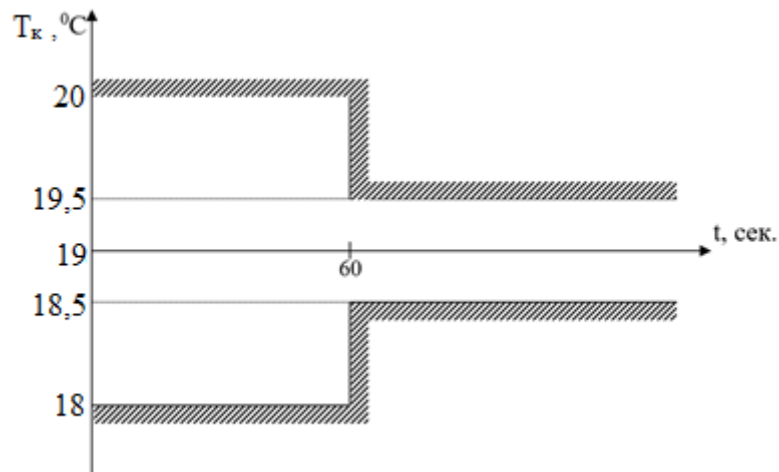


Рисунок 2.3 – Регламентна зона для температури в конденсаторі T_k

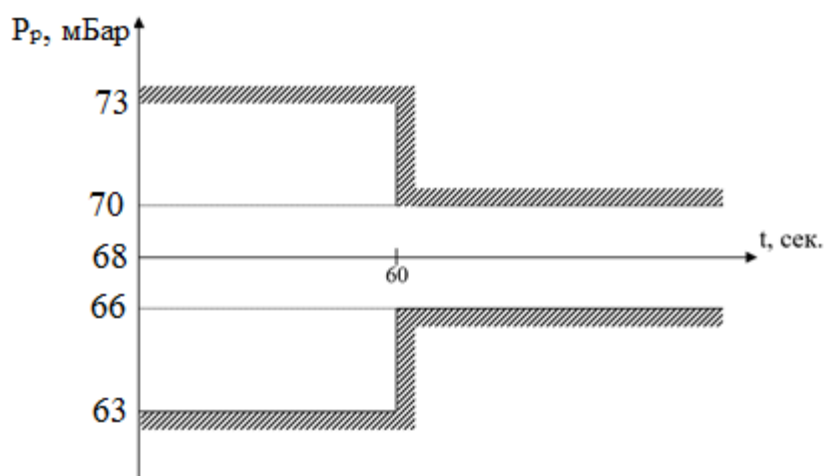


Рисунок 2.4 – Регламентна зона для тиску у ресивері P_p

2.1.1.4 Формалізація інтегральних вимог до перехідних та динамічно сталих процесів регулювання у формі інтегральних критеріїв оптимальності САР.

Як видно з регламентів на САР для процесу деалкоголізації вина особливо жорсткі вимоги пред'являються до тривалих відхилень, так як саме недотримання цих регламентів може призвести до браку готової продукції і суттєвих економічних збитків. При цьому малі відхилення регламентуються дуже жорстко. Тому в якості інтегрального критерію застосуємо саме інтегральний квадратичний критерій, що сильно штрафує незначні відхилення і мало штрафує короточасні відхилення. Тому ефективність роботи САР і підвищення її динамічної точності доцільно вести за такими критерієм:

$$J_2 = \int_0^{t_M} [\Delta P_B(t)] \cdot dt$$

$$J_2 = \int_0^{t_M} [\Delta T_{ДВ}(t)] \cdot dt$$

$$J_2 = \int_0^{t_M} [\Delta T_K(t)] \cdot dt$$

$$J_2 = \int_0^{t_M} [\Delta P_P(t)] \cdot dt$$

де t_M – час моделювання;

$\Delta P_B(t)$ – відхилення тиску в кінці випарника від заданого значення

$\Delta T_{ДВ}(t)$ – відхилення температури ДВ від заданого значення;

$\Delta T_K(t)$ – відхилення температури в конденсаторі від заданого значення;

$\Delta P_P(t)$ – відхилення тиску в ресивері від заданого значення.

2.1.1.5 Вибір, обґрунтування та подання у вигляді узагальненої структурної схеми принципу побудови системи автоматичного регулювання.

Оснoву керування становить інформація про мету керування або про бажаний стан ОУ \bar{y}^* , про поточний стан ОУ \bar{y} та про збуреннях \bar{f} . Залежно від обсягу використовуваної керуючим пристроєм (КП) інформації про ОУ виділяють чотири принципи побудови САР: принцип розімкнутого твердого (програмного) керування; принцип розімкнутого керування по збурюванню; принцип замкнутого керування по стані ОУ або керування зі зворотним зв'язком; комбінований принцип керування.

Для системи керування процесу деалкоголізації вина доступною, крім інформації про бажаний стан ОК ($P_B^{зд}, T_{ДВ}^{зд}, T_K^{зд}, P_P^{зд}$), є інформація про поточний стан ОК ($P_B, T_{ДВ}, T_K, P_P$). Такий обсяг інформації для формування керуючого впливу ($F_B, I_{ПВ}, I_{ПК}, u_{H4}$) достатній для реалізації замкнутого принципу керування. Тому саме цей принцип і буде покладено в основу розроблюваної САР базової структури.

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

Координатна схема деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу наведена на рис. 1.4. Відповідно до неї та до структурної схеми, що відповідає замкненому принципу керування, структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 2.5.

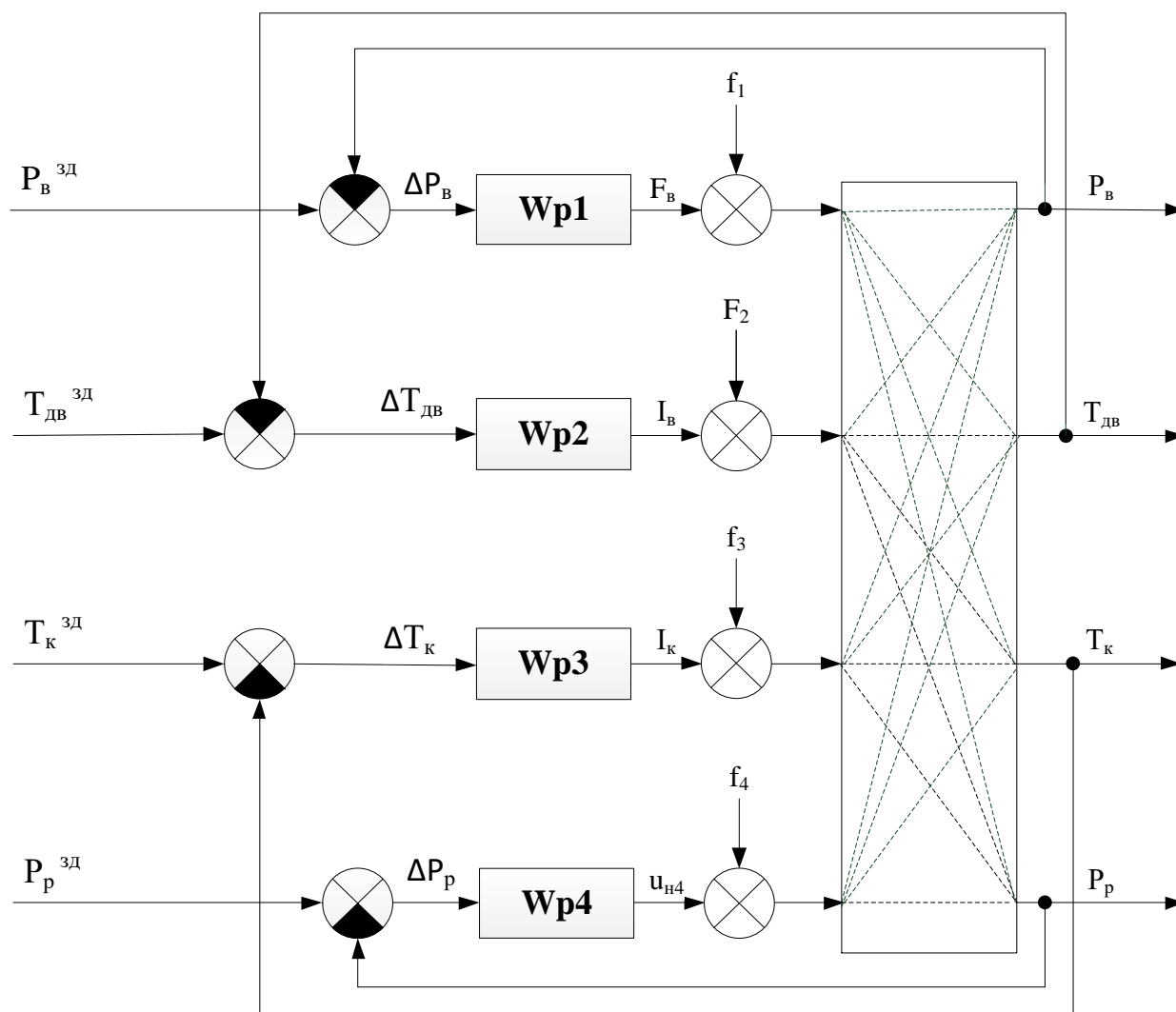


Рисунок 2.5 – Структурна схема системи керування, що відповідає замкненому принципу керування

На рисунку:

F_B – витрата виноматеріалу;

P_B - тиск на виході випарника;

$P_B^{зд}$ – задане значення тиску на виході випарника;

ΔP_v – помилка регулювання тиску на виході випарника;
 f_1 – вектор неконтрольованих збурень;
 $W_{P1}(p)$ – передаточна функція регулятора тиску на виході випарника;
 I_v – струм живлення ТЕП випарника;
 T_{dv} – температура ДВ на виході випарника;
 $T_{dv}^{3Д}$ – задане значення температури ДВ на виході випарника;
 ΔT_{dv} – помилка регулювання температури ДВ на виході випарника;
 f_2 – вектор неконтрольованих збурень;
 $W_{P2}(p)$ – передаточна функція регулятора температури ДВ на виході випарника;
 I_k – струм живлення ТЕП конденсатора;
 T_k – температура в конденсаторі;
 $T_k^{3Д}$ – задане значення температури в конденсаторі;
 ΔT_k – помилка регулювання температури в конденсаторі;
 f_3 – вектор неконтрольованих збурень;
 $W_{P3}(p)$ – передаточна функція регулятора температури в конденсаторі;
 $\omega_{н4}$ – частота обертання вакуумного насоса;
 P_p – тиск у ресивері;
 $P_p^{3Д}$ – задане значення тиску у ресивері;
 ΔP_p – помилка регулювання тиску у ресивері;
 f_4 – вектор неконтрольованих збурень;
 $W_{P4}(p)$ – передаточна функція регулятора тиску у ресивері.

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

Процес деалкоголізації вина за всіма каналами має статичні властивості, тому в якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обираємо пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) алгоритм регулювання.

Рівняння руху ПІД-регулятора

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

Передаточна функція ПІД-регулятора

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

2.2.2 Розробка структурної схеми цифрового імітаційного моделювання базової САР.

Структурна схема моделювання САР базової структури з ПІД-регуляторами наведена на рис. 2.6.

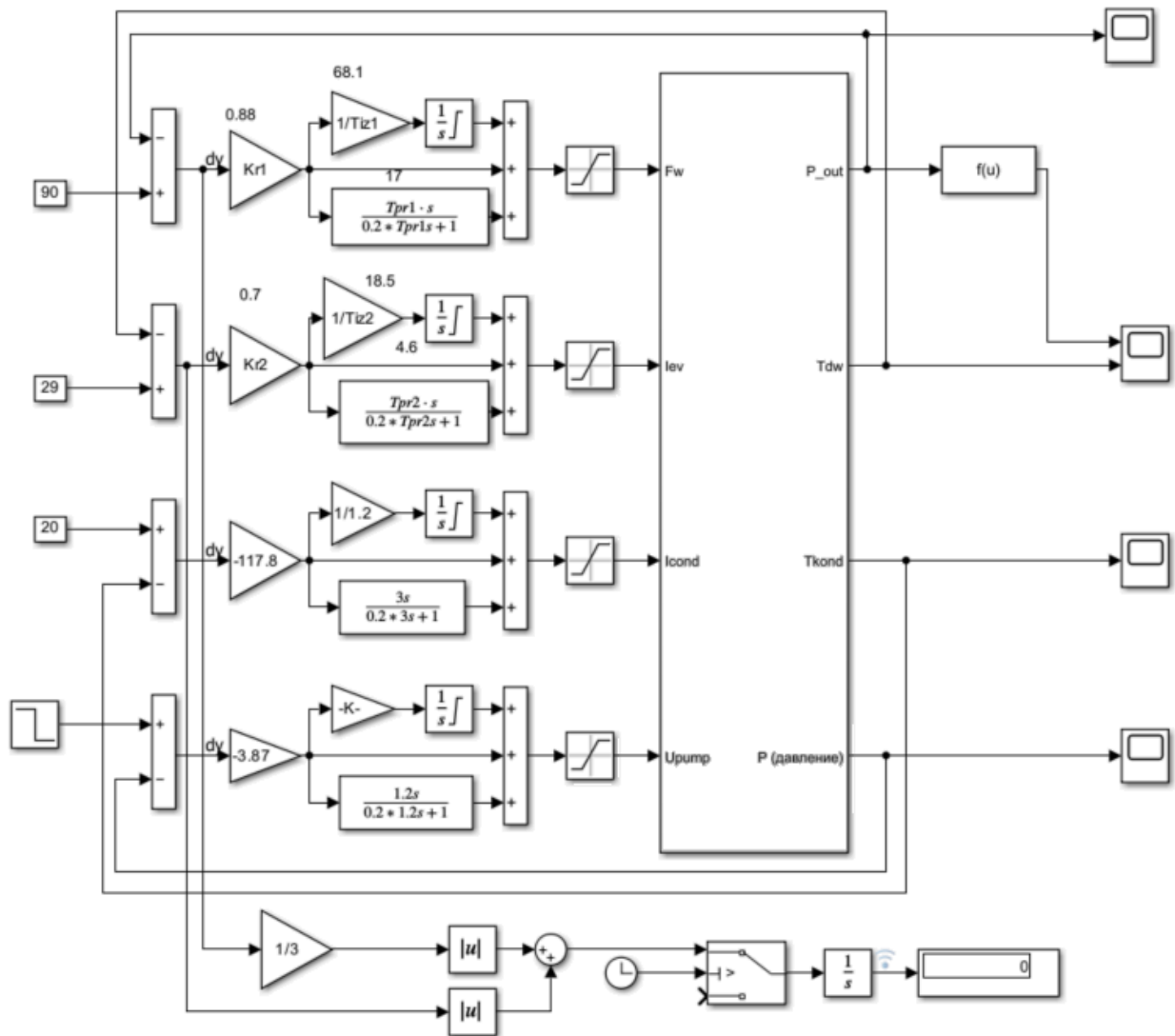


Рисунок 2.6 - Структурна схема моделювання САР базової структури з ПІД-регуляторами

2.2.3 Параметричний синтез САР з ПД алгоритмом регулювання

2.2.3.1 Вибір початкових наближень настроювальних параметрів алгоритмів регулювання на основі інженерних методик параметричного (неоптимального) синтезу САР.

В ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра на тему «Автоматизація керування деалкоголізацією вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу» проведений параметричний синтез САР температури в конденсаторі та тиску в ресивері. Оптимальні параметри налаштування ПД-регулятора температури в конденсаторі:

$$K_p = -64,3$$

$$T_{i3} = 5,2c$$

$$T_{np} = 3c$$

Оптимальні параметри налаштування ПД-регулятора тиску в ресивері:

$$K_p = -3,9$$

$$T_{i3} = 15,1c$$

$$T_{np} = 1,2c$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК за каналом « $F_B - P_B$ »:

$$W_0(p) = \frac{0,28 \cdot e^{-34p}}{8,6p + 1}$$

Розрахунок параметрів ПД- регулятора:

$$K_p = \frac{1 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{1 \cdot 8,6}{0,28 \cdot 34} = 0,88 \frac{\% x.p.o.}{^\circ C}$$

$$T_{i3} = 2 \cdot \tau_o = 2 \cdot 34 = 68,1c$$

$$T_{np} = 0,5 \cdot \tau_o = 17c$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК за каналом « $I_B - T_{дв}$ »:

$$W_0(p) = \frac{1,4 \cdot e^{-9,2p}}{9p + 1}$$

Розрахунок параметрів ПД- регулятора:

$$K_p = \frac{1 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{1 \cdot 9}{1,4 \cdot 9,2} = 0,7 \frac{\%x.p.o.}{^\circ C}$$

$$T_{IЗ} = 2 \cdot \tau_o = 2 \cdot 9,2 = 8,4c$$

$$T_{IП} = 0,5 \cdot \tau_o = 4,6c$$

2.2.3.2 Параметричний оптимальний синтез САР з ПІД алгоритмом регулювання для детермінованих (ступінчастих) вхідних діях.

Оптимізацію параметрів налаштування ПІД-регуляторів тиску та температури ДВ на виході випарника проведено в умовах ступінчатої зміни завдання тиску в ресивері з 80 мбар до 75 мбар. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регуляторів наведені на рисунках 2.7 та 2.8.

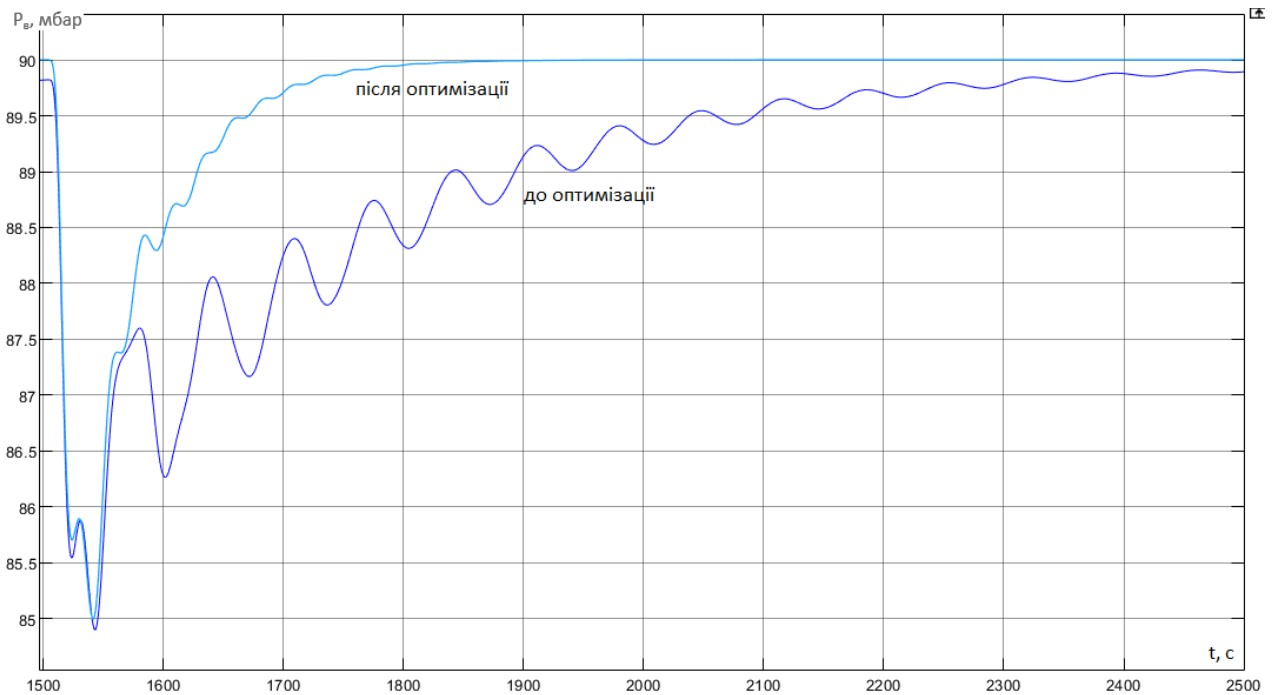


Рисунок 2.7 – Перехідний процес базової САР тиску на виході випарника до та після оптимізації

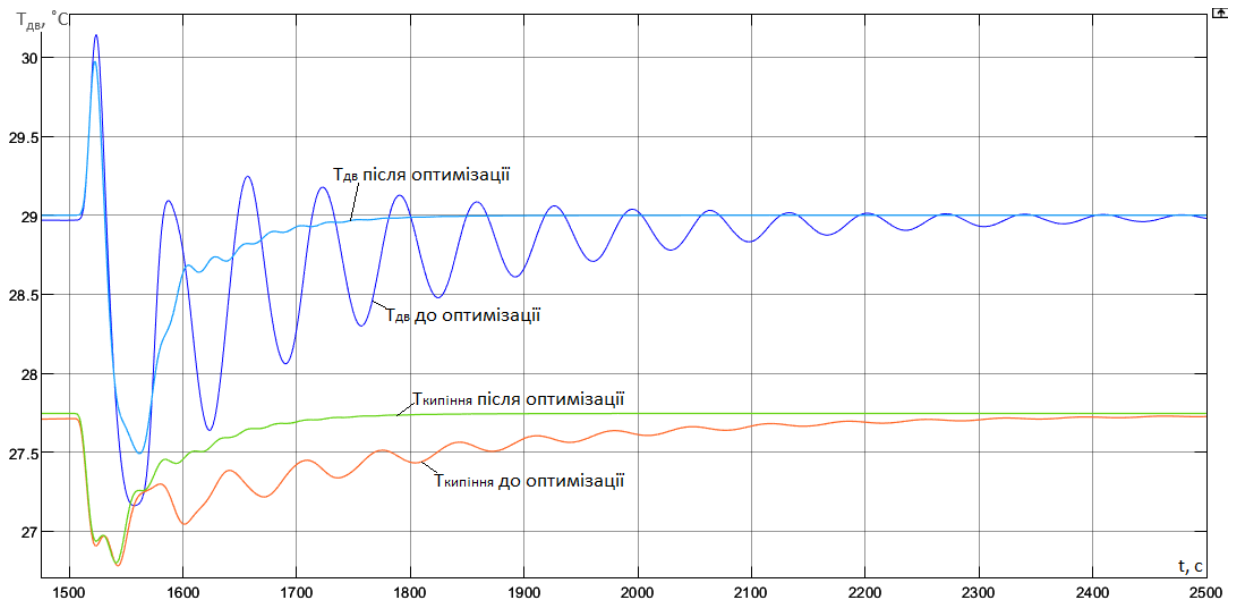


Рисунок 2.8 – Перехідний процес базової САР температури ДВ на виході випарника до та після оптимізації

Таблиця 2.1 – Результати оптимізації САР базової структури

Контур ОК	Назва змінної	Початкове наближення	Оптимальне значення	Значення критерію оптимальності		Прямі показники якості			
				до оптимізації	після оптимізації	Δy^{\max}		$t_{\text{рег}}$	
						до оптимізації	після оптимізації	до оптимізації	після оптимізації
«F _в – P _в »	K _p	0,88	0,625	1085,1	356,5	5,1	5	392,6	128,1
	T _{із}	68,1	16,3						
	T _{пр}	17	6,9						
«I _в – T _{дв} »	K _p	0,7	1,31	236,6	106,4	1,8	1,5	328,5	95,3
	T _{із}	8,4	15,9						
	T _{пр}	4,6	8,6						
«I _к – T _к »	K _p	-87,8	-64,3	183,8	18,6	0,3	0,4	8,5	8,5
	T _{із}	5	5,2						
	T _{пр}	2,5	3						
«u _{н4} – P _p »	K _p	-2,8	-3,9	86,57	66,45	0,9	1,1	8,2	,2
	T _{із}	9,4	15,1						
	T _{пр}	4,7	1,2						

2.2.4.1 Перевірка САР з ПІД алгоритмом регулювання на grubість в умовах різної концентрації виноматеріалу.

Перевірка САР базової структури тиску та температури ДВ на виході випарника проведено в умовах різної концентрації виноматеріалу. Результати перевірки наведені на рисунках 2.9 та 2.10.

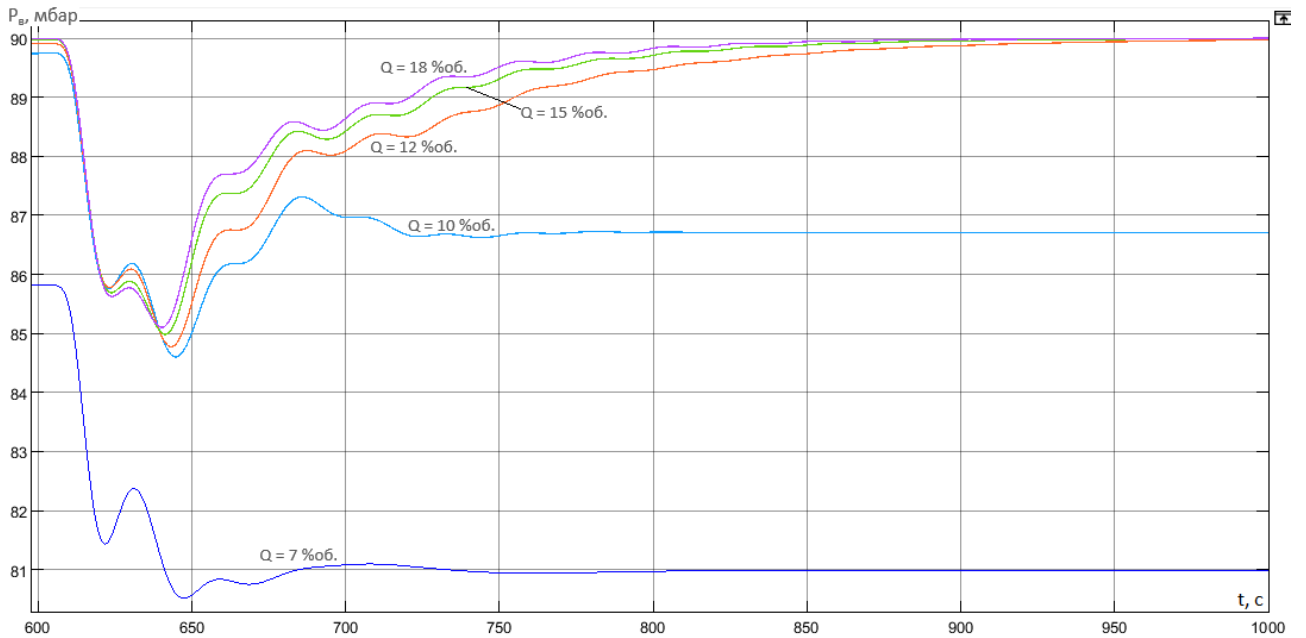


Рисунок 2.9 - Перехідний процес САР тиску на виході з випарника при різних концентраціях виноматеріалу

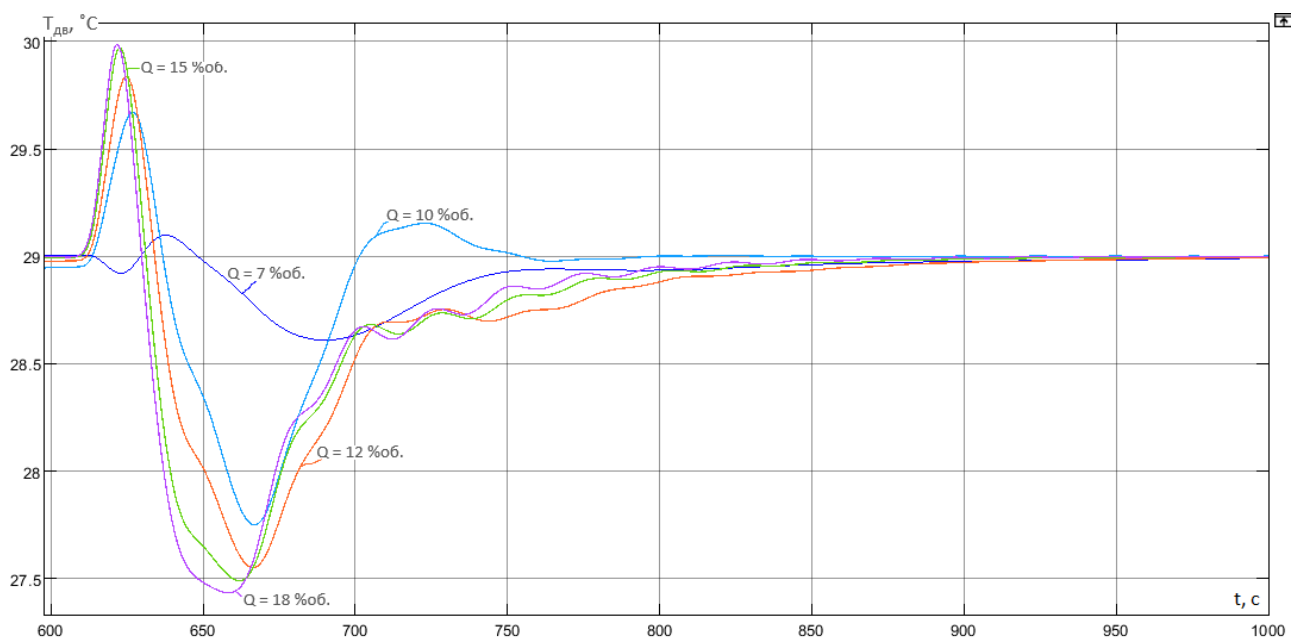


Рисунок 2.10 - Перехідний процес САР температури ДВ при різних концентраціях виноматеріалу

Таблиця 2.2 – Значення критерію оптимальності САР при різних концентраціях виноматеріалу

Значення критерію оптимальності при				
Q = 7% об.	Q = 10% об.	Q = 12% об.	Q = 15% об.	Q = 17% об.
1209	499,1	254	225,2	211

З результатів видно що САР стійка так як графіки сходяться. Але при концентраціях спирту у виноматеріалі менше 10 % об. кількості пари не достатньо для досягнення заданого значення тиску на виході з випарника.

2.3 Синтез і аналіз САР підвищеної динамічної точності

2.3.1 Аналіз особливостей об'єкта регулювання, що знижують динамічну точність і вибір способів її підвищення за рахунок введення в структуру САР додаткових зв'язків.

Причиною недостатньої точності САР можуть бути зовнішні умови: дія інтенсивних контрольованих і неконтрольованих збурень, інтенсивне зміна завдання САР, а також внутрішні особливості ОК і САР (значне співвідношення t_0 / T_0 , взаємний вплив каналів в багатовимірної САР).

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є дія перехресного зв'язку витрати виноматеріалу на температуру ДВ на виході випарника. Основним шляхом підвищення динамічної точності в даному випадку є побудова автономної САР.

2.3.2 Розробка на основі вибраних 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 інваріантності Петрова, сутність якого у введенні додаткових каналів впливу через коригувальний зв'язок. Відповідно до принципу інваріантності Петрова структурна схема автономної САР матиме вигляд, наведений на рис. 2.11.

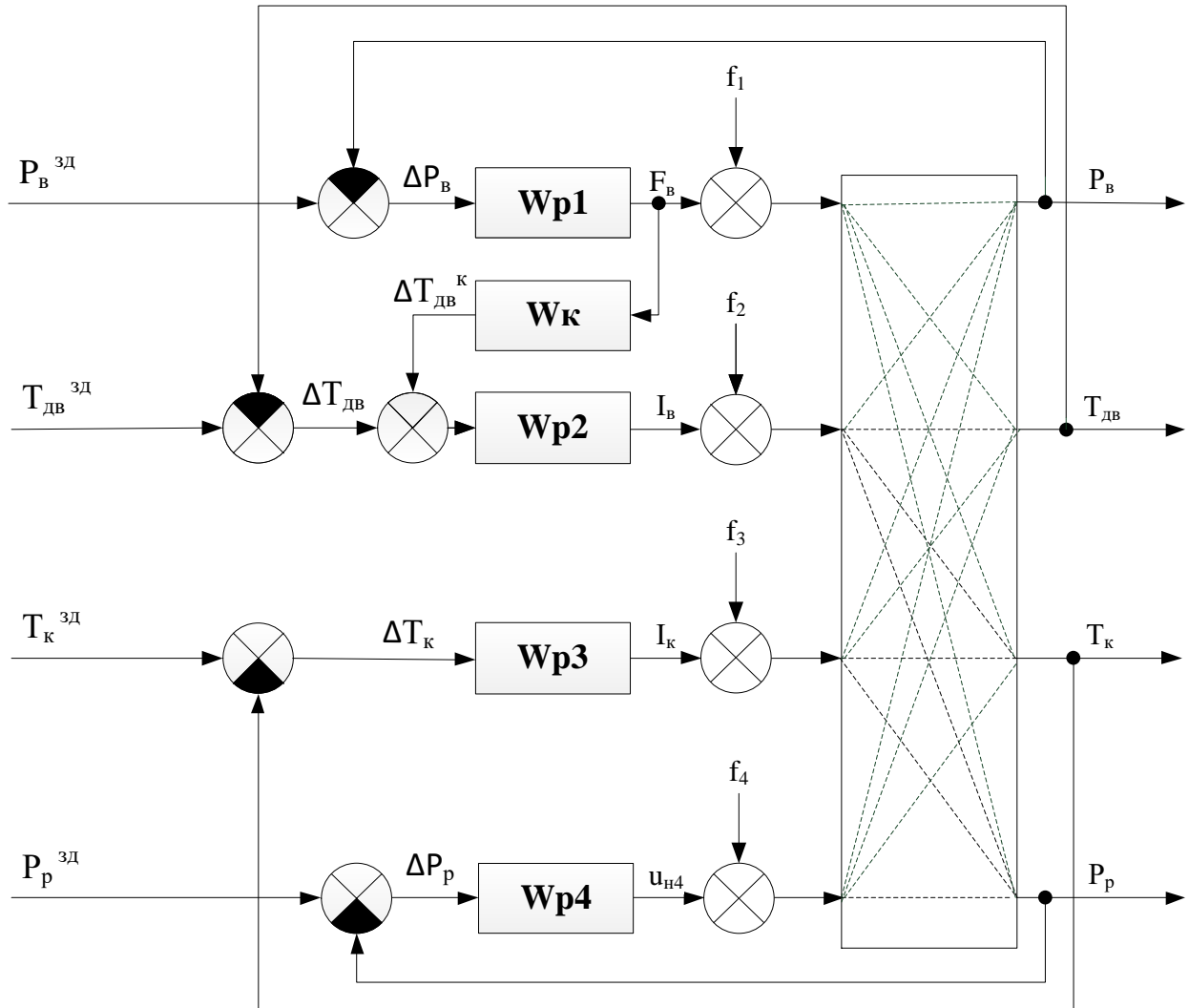


Рисунок 2.11 – Структурна схема чотирьохмірної автономної САР, з міжрегуляторним коригуючим зв'язком

Позначення на рисунку 2.1:

F_B – витрата виноматеріалу;

P_B - тиск в кінці випарника;

$P_B^{зд}$ – задане значення тиску на виході випарника;

ΔP_B – помилка регулювання тиску на виході випарника;

f_1 – вектор неконтрольованих збурень;

$W_{p1}(p)$ – передаточна функція регулятора тиску на виході випарника;

I_B – струм живлення ТЕП випарника;

$T_{ДВ}$ – температура ДВ;

$T_{ДВ}^{зд}$ – задане значення температури ДВ;

$\Delta T_{дв}$ – помилка регулювання температури ДВ;

$\Delta T_{дв}^k$ – коригуюча помилка регулювання температури ДВ;

f_2 – вектор неконтрольованих збурень;

$W_{P2}(p)$ – передаточна функція регулятора температури ДВ;

I_k – струм живлення ТЕП конденсатора;

T_k – температура в конденсаторі;

$T_k^{3Д}$ – задане значення температури в конденсаторі;

ΔT_k – помилка регулювання температури в конденсаторі;

f_3 – вектор неконтрольованих збурень;

$W_{P3}(p)$ – передаточна функція регулятора температури в конденсаторі;

$u_{н4}$ – частота обертання вакуумного насоса;

P_p – тиск у ресивері;

$P_p^{3Д}$ – задане значення тиску у ресивері;

ΔP_p – помилка регулювання тиску у ресивері;

f_4 – вектор неконтрольованих збурень;

$W_{P4}(p)$ – передаточна функція регулятора тиску у ресивері;

$W_{P4}(p)$ – передаточна функція коригуючої ланки;

$$W_k(p) = K_k \cdot e^{-T_{k1}p} \cdot \frac{T_{k2}p}{(T_{k2}p + 1)^2}$$

Необхідною умовою реалізації САР є фізична можливість організації додаткового каналу впливу. Достатньою умовою реалізації САР є фізична реалізація передаточної функції коригуючого зв'язку.

2.3.3 Виведення передатної функції коригуючого зв'язку, аналіз його структури з умов фізичної реалізованості, приведення до фізично реалізуємого виду, представлення у формі з'єднання типових динамічних ланок та отримання перехідних характеристик.

Знайдемо передаточну функцію коригуючого зв'язку $W_{K_F}(p)$, що забезпечує автономність контуру регулювання температури ДВ на виході випарника $T_{дв}$ відносно контуру регулювання тиску на виході з випарника P_v . В

якості вхідного параметра системи регулювання прийемо керуючу дію F .
Запишемо рівняння, яке буде відповідати умові автономності:

$$y = W_{F_B T_{ДВ}}^c(p) \cdot F_B|_{F_B \neq 0} = 0$$

Умова автономності виконується, якщо $W_{F_B T_{ДВ}}^c(p) = 0$. Для забезпечення автономності при записі передаточної функції системи за означеним каналом замкненими контурами САР можна знехтувати. Звідси передаточна функція коригуючого зв'язку:

$$W_{F_B T_{ДВ}}^K(p) = - \frac{W_{F_B T_{ДВ}}^o(p)}{W_{I_{ПВ} T_{ДВ}}^p(p) \cdot W_{I_{ПВ} T_{ДВ}}^o(p)}$$

Якщо:

$$W_{F_B T_{ДВ}}^o(p) = \frac{-0,78 \cdot e^{-16,7p}}{10,5p + 1};$$

$$W_{I_{ПВ} T_{ДВ}}^o(p) = \frac{1,4 \cdot e^{-9,05p}}{9,24p + 1};$$

$$W_{I_{ПВ} T_{ДВ}}^p(p) = 1,31 \cdot \left(1 + \frac{1}{15,9p} + 8,6p\right).$$

Тоді:

$$\begin{aligned} W_{F_B T_{ДВ}}^K(p) &= - \frac{W_{F_B T_{ДВ}}^o(p)}{W_{I_{ПВ} T_{ДВ}}^p(p) \cdot W_{I_{ПВ} T_{ДВ}}^o(p)} = \\ &= - \frac{-0,78 \cdot e^{-16,7p}}{10,5p + 1} = \\ &= - \frac{-0,78 \cdot e^{-16,7p}}{1,31 \cdot \left(1 + \frac{1}{15,9p} + 8,6p\right) \cdot \frac{1,4 \cdot e^{-9,05p}}{9,24p + 1}} = \\ &= - \frac{0,78 \cdot e^{-16,7p}}{10,5p + 1} \cdot \frac{9,24p + 1}{1,4 \cdot e^{-9,05p} \cdot 1,31 \cdot \left(1 + \frac{1}{15,9p} + 8,6p\right)} = \\ &= - \frac{0,78}{1,4 \cdot 1,31} \cdot e^{(-16,7p + 9,05p)} \cdot \frac{9,24p + 1}{(10,5p + 1) \cdot \left(\frac{136,74p^2 + 15,9p + 1}{15,9p}\right)} = \\ &= 0,428 \cdot e^{-7,46p} \cdot \frac{15,9p \cdot (9,05p + 1)}{(10,5p + 1) \cdot (136,74p^2 + 15,9p + 1)} \end{aligned}$$

Отримана передаточна функція коригуючого зв'язку є фізично реалізуємою, оскільки містить ланку чистого запізнення.

Структурна схема моделювання передатної функції коригуючого зв'язку приведена на рис. 2.12, а її перехідна характеристика - на рис. 2.13.

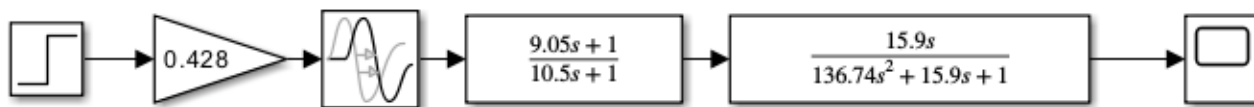


Рисунок 2.12 – Структурна схема моделювання передатної функції коригуючого зв'язку

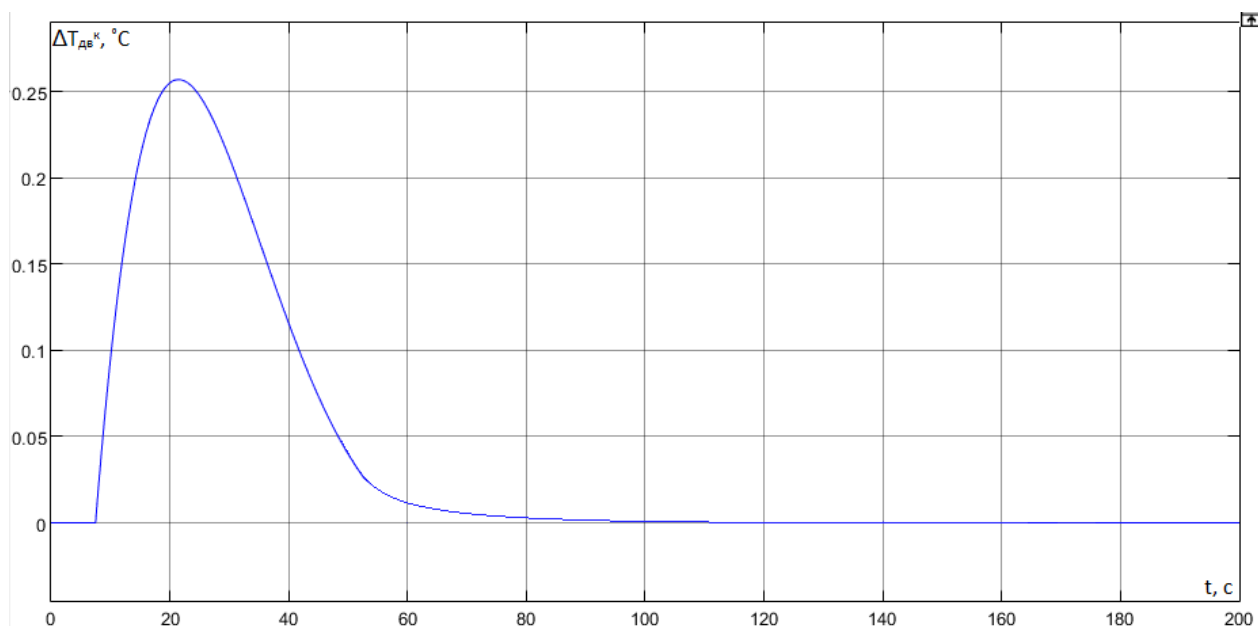


Рисунок 2.13 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку

2.3.4 Спрощення коригуючих зв'язків з урахуванням особливостей їх технічної реалізації і параметричний синтез САР при детермінованих вхідних діях.

2.3.4.1 Аналіз складності технічної реалізації коригувальних зв'язків проводиться з урахуванням доцільності такої реалізації та можливостей технічних засобів.

За результатами такого аналізу роблять висновок про спрощення ПФКЗ за рахунок зниження їх розмірності, апроксимації запізнення дрібно-раціональними передаточними функціями і т.п. зі збереженням загальних властивостей зв'язків.

Отримана передаточна функція коригуючого зв'язку представлена дуже складною функцією, тому її треба спростити, при цьому зберегти її диференціюючі властивості. Спрощена передатна функція коригуючого зв'язку буде мати такий вигляд:

$$W_{F_{BT_H}}^K(p) = K_K \cdot e^{-T_{K1}p} \cdot \frac{T_{K2}p}{(T_{K2}p+1)^2}$$

2.3.4.2 Вибір початкових наближень параметрів спрощених коригуючих зв'язків, який здійснюється з умов близькості перехідних характеристик коригуючих зв'язків до і після їх спрощення, де можливо застосувати будь-який метод як оптимізаційного, так і звичайного.

Як початкові наближення параметрів коригуючого зв'язку використаємо наступні значення параметрів: $K_K = 0,43$; $T_{K1} = 7,5$; $T_{K2} = 15,9$. Для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку скористаємося схемою моделювання, яка наведена на рис. 2.14. В результаті оптимізації параметрів коригуючої ланки отримані наступні значення: $K_K = 0,7$; $T_{K1} = 9,3$; $T_{K2} = 10,5$. Перехідні характеристики коригуючого зв'язку до та після оптимізації наведені на рис. 2.15.

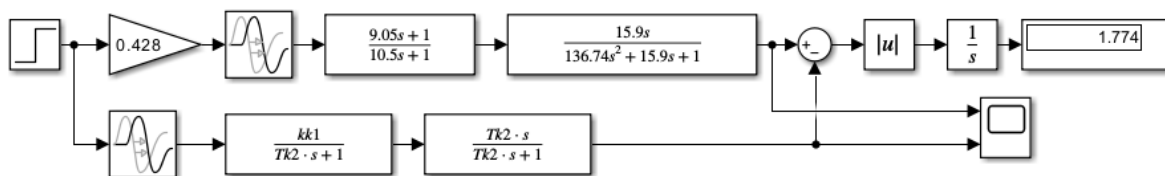


Рисунок 2.14 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку

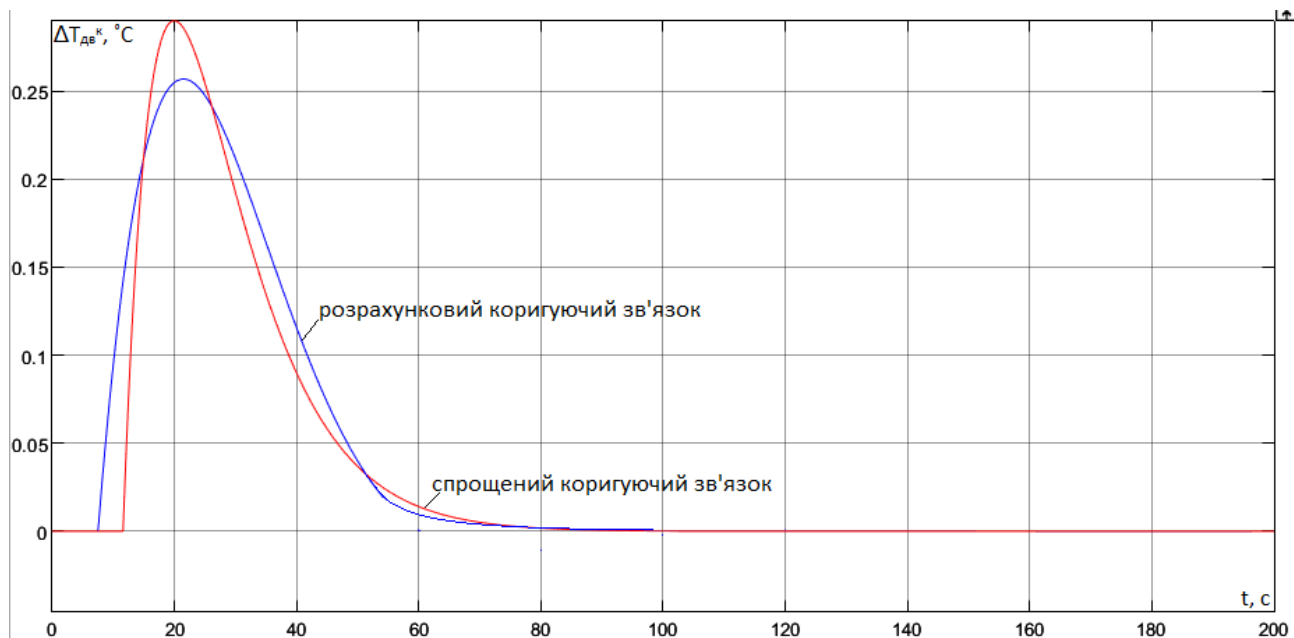


Рисунок 2.15 – Перехідна характеристика розрахункового та спрощеного коригуючого зв'язку

2.3.5 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 наведена на рис. 2.16, а результати оптимізації - на рис. 2.17 та 2.18.

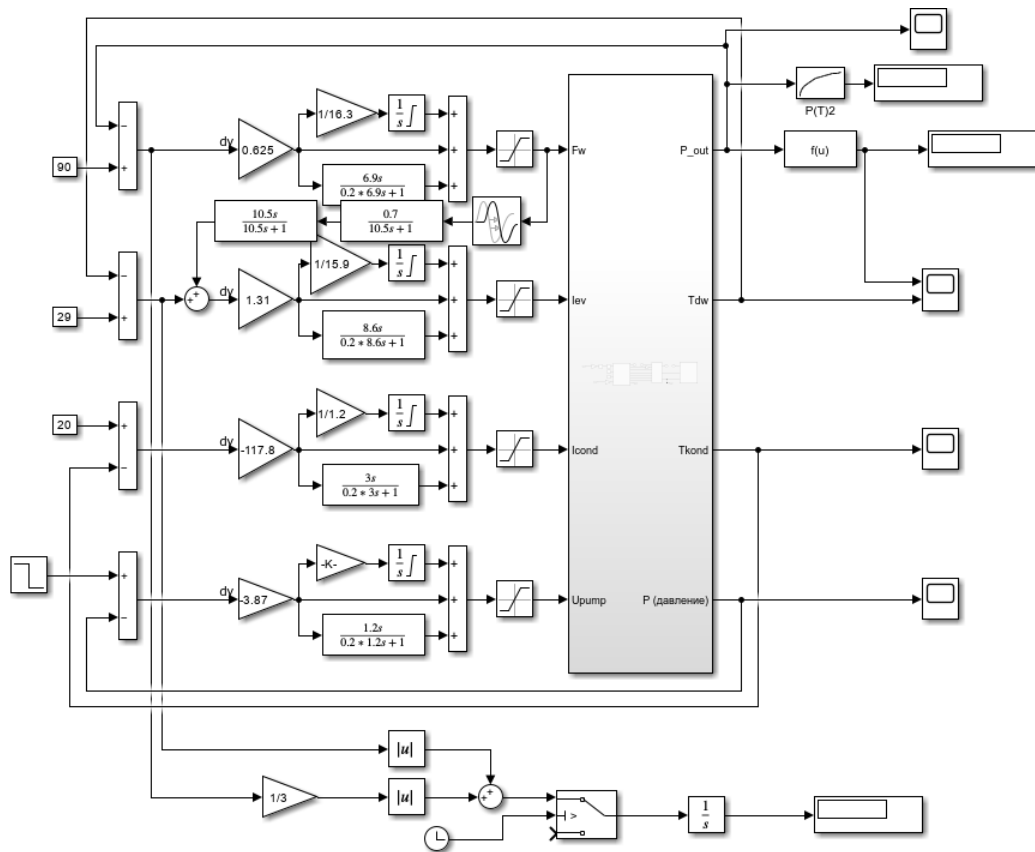


Рисунок 2.16 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку

Результати моделювання з порівнянням САР базової структури та САР ПДТ до та після оптимізації коригуючого зв'язку наведено на рисунках 2.17 та 2.18.

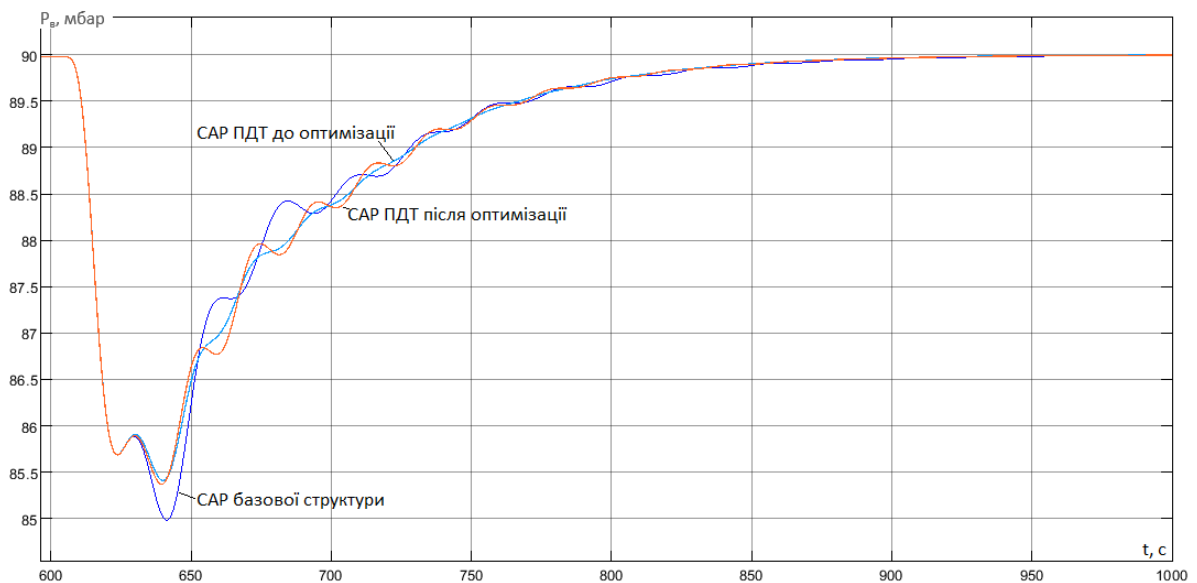


Рисунок 2.17 – Порівняння САР тиску на виході з випарника базової структури, з коригуючим зв'язком до та після оптимізації

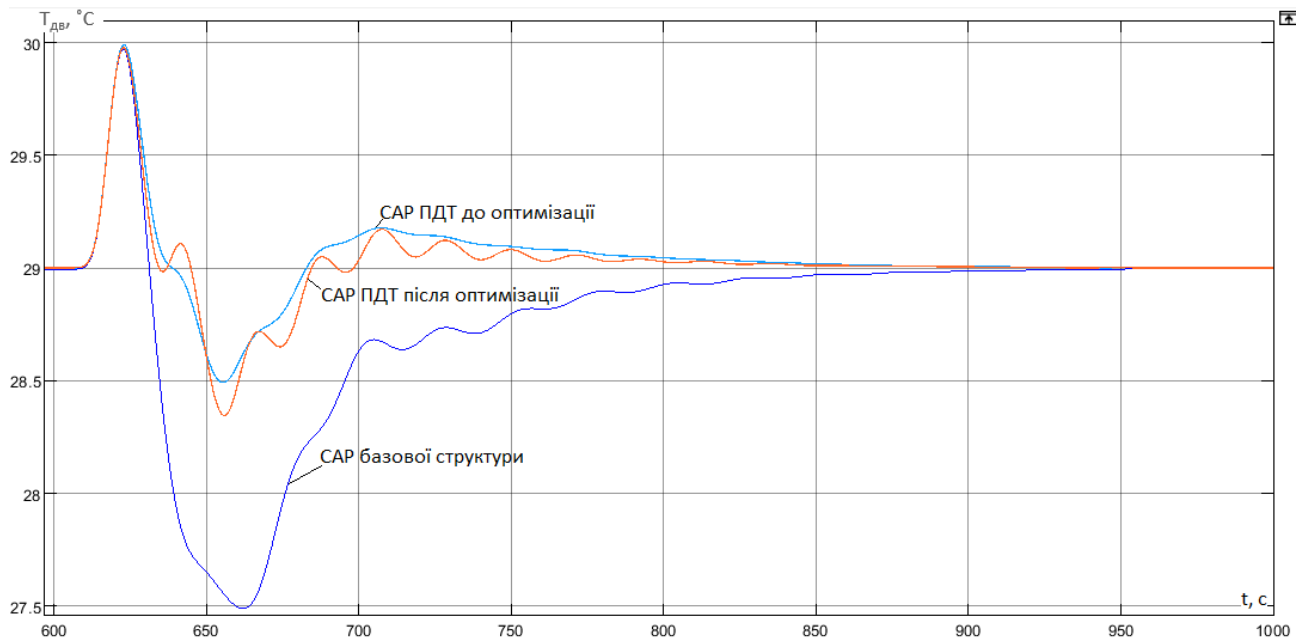


Рисунок 2.18 – Порівняння САР температури ДВ на виході випарника базової структури, з коригуючим зв'язком до та після оптимізації

Порівняння інтегральних та прямих показників якості САР базової структури та САР ПДТ представлено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння показників якості САР базової структури та САР ПДТ

Назва змінної	Початкове наближення	Оптимальне значення	Контур ОК	Значення критерію оптимальності		Прямі показники якості			
				до оптимізації	після оптимізації	Δu^{\max}		$t_{\text{пер}}$	
						до оптимізації	після оптимізації	до оптимізації	після оптимізації
K_k	0,7	0,625	« $F_v - P_v$ »	356,7	356,7	4,6	4,6	129,8	129,8
T	10,5	16,3		38,57	34,48	1	1	56,7	60,4
τ	9,3	6,9	« $I_v - T_{\text{ДВ}}$ »						

2.3.6 Перевірка САР ПДТ на грубість в умовах різної концентрації виноматеріалу.

Перевірка САР ПДТ тиску та температури ДВ на виході випарника проведено в умовах різної концентрації виноматеріалу до та після оптимізації коригуючого зв'язку. Результати перевірки наведені на рисунках 2.19 - 2.22.

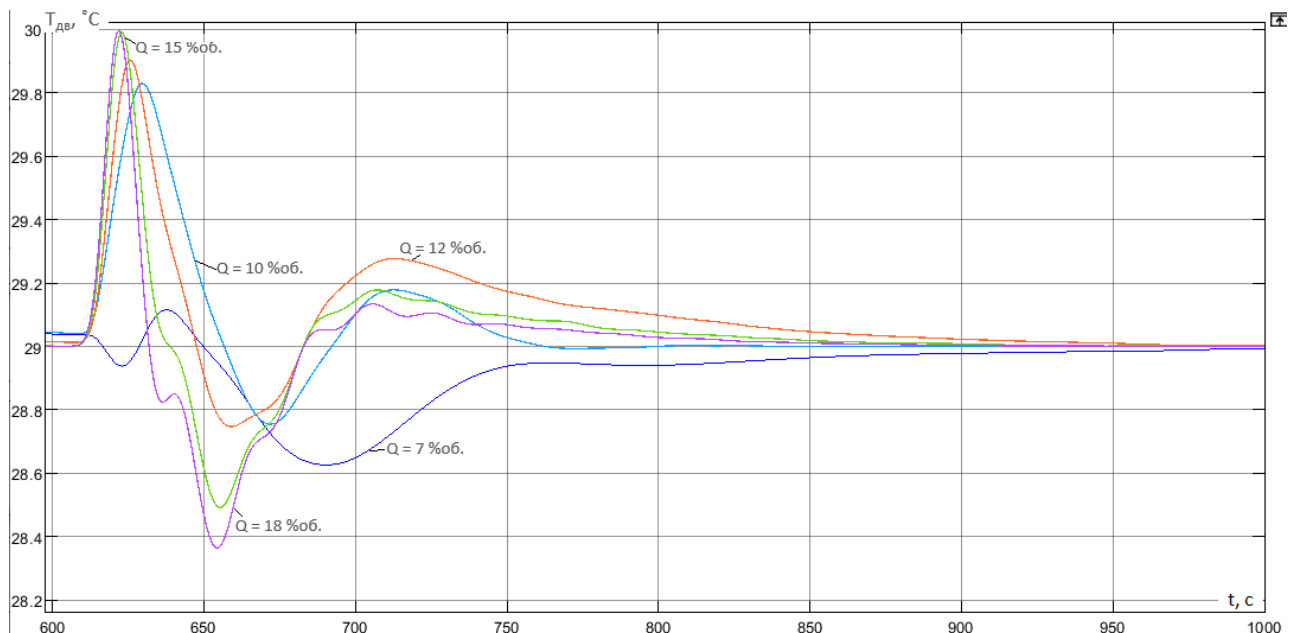


Рисунок 2.19 - Перехідний процес САР температури ДВ при різних концентраціях виноматеріалу до оптимізації коригуючого зв'язку

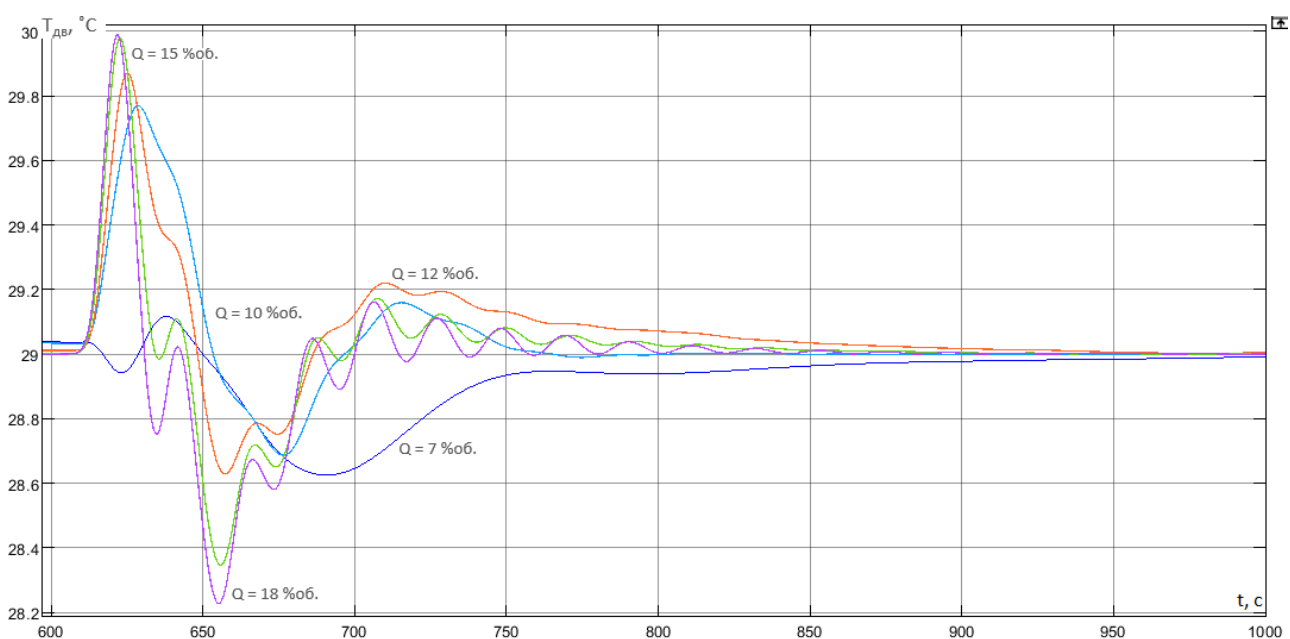


Рисунок 2.20 - Перехідний процес САР температури ДВ при різних концентраціях виноматеріалу після оптимізації коригуючого зв'язку

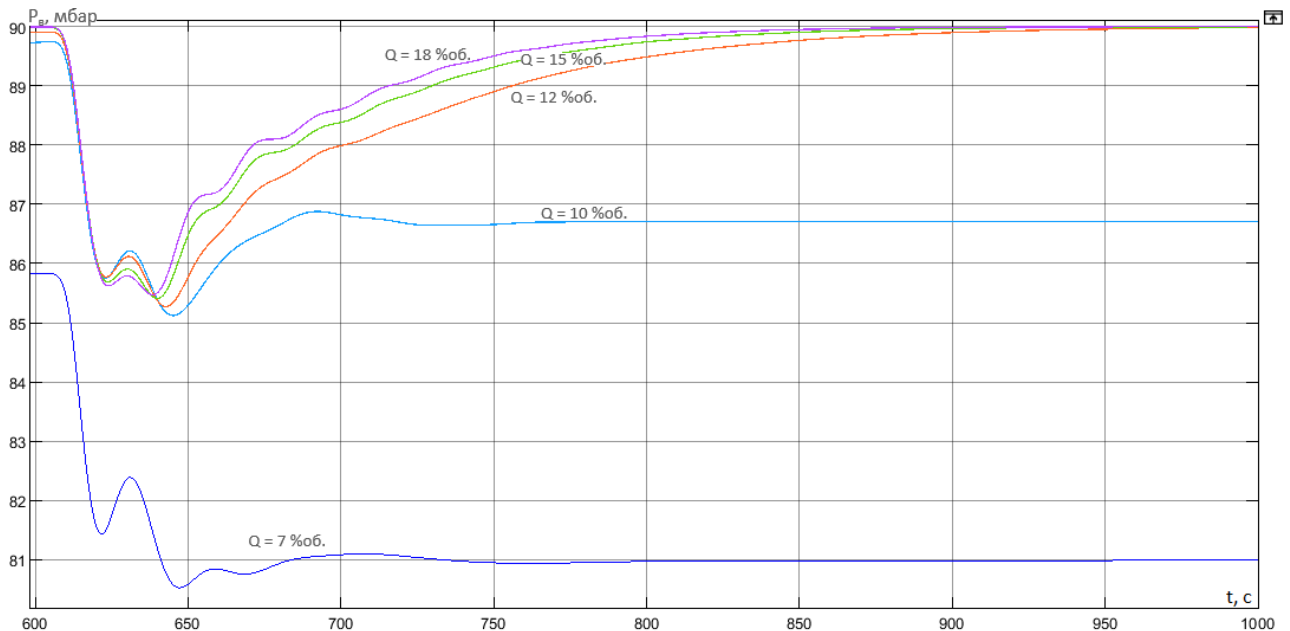


Рисунок 2.21 - Перехідний процес САР ПДТ тиску на виході з випарника при різних концентраціях виноматеріалу до оптимізації коригуючого зв'язку

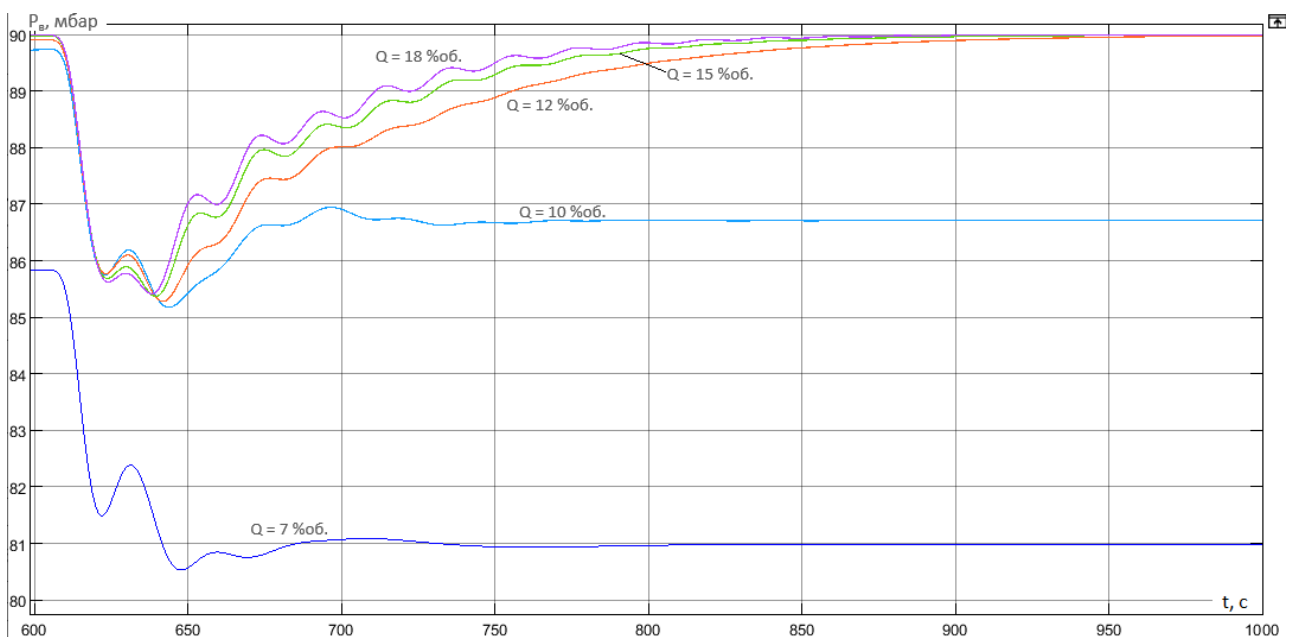


Рисунок 2.22 - Перехідний процес САР ПДТ тиску на виході з випарника при різних концентраціях виноматеріалу після оптимізації коригуючого зв'язку

Таблиця 2.4 – Значення критерію оптимальності САР при різних концентраціях виноматеріалу

Тип САР	Значення критерію оптимальності при				
	Q = 7% об.	Q = 10% об.	Q = 12% об.	Q = 15% об.	Q = 17% об.
Базова	1209	499,1	254	225,2	211
ПДТ до оптимізації	1207	473,4	196,4	157,5	142,3
ПДТ після оптимізації	1207	473	190,7	153,4	140,5

З результатів видно що САР стійка так як графіки сходяться. Але при концентраціях спирту у виноматеріалі менше 10 % об. кількості пари не достатньо для досягнення заданого значення тиску на виході з випарника.

2.4 Висновки за розділом.

У розділі зформульовані задачі керування, вимоги до їх розв'язку і обрані основні принципи побудови автоматичних систем

САР базової структури синтезована на базі ПД регуляторів. Синтез САР проведено в два етапи. На першому етапі розрахунок налаштувань ПД регуляторів проводився за інженерними методиками Капеловича, на другому етапі було застосовано оптимальний параметричний синтез.

Хоча із налаштуваннями регуляторів, отриманими за інженерними методиками САР дає стійкі перехідні процеси, після оптимізації інтегральні показники якості суттєво зменшилися що свідчить про підвищення динамічної якості системи. Також варто зазначити, що попри вжиті заходи існує запас підвищення динамічної точності САР.

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є дія перехресного зв'язку витрати виноматеріалу на температуру ДВ на виході випарника. Основним шляхом підвищення динамічної точності в даному випадку обрано побудову автономної САР.

В основу підвищення динамічної точності САР було покладено принцип інваріантності Петрова, сутність якого у введенні додаткових каналів впливу через коригувальний зв'язок.

Було виведено передатну функцію коригуючого зв'язку, приведено її до фізично реалізуємого виду та представлено у виді типових динамічних ланок. Оскільки передатна функція містить ланку чистого запізнення вона є фізично реалізуємою.

Після спрощення коригуючого зв'язку вибрано початкові наближення його параметрів з їх подальшою оптимізацією. Розроблено схему моделювання САР

підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку.

Було проведено порівняльний аналіз САР базової структури та САР ПДТ в умовах ступінчатої зміни завдання контуру регулювання тиску в ресивері та в умовах різної концентрації спирту у виноматеріалі. Суттєве зменшення інтегральних показників якості, максимального динамічного відхилення та часу регулювання свідчить про те що САР ПДТ є більш якісною в порівнянні з САР базової структури.

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

3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем керування, побудованих на базі апарата нечіткої логіки для розглянутого об'єкта керування.

Однією з основних проблем при автоматичному керуванні технологічними процесами є нелінійність контурів регулювання. В таких випадках зазвичай використовуються такі методи як лінійна апроксимація або кусочно-лінійна апроксимація, за яких не завжди отримується бажаний результат. Інший варіант САК, який забезпечує більшу ефективність, це системи керування з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

Найбільш вигідне, в порівнянні з традиційними САК, використання нечіткого керування за умов невизначеності інформації про динамічну поведінку ОК. Нечіткі регулятори більш грубі, оскільки цей підхід забезпечує можливість формування числа правил управління залежно від комбінації значень вхідних змінних регулятора і, отже, від зміни режиму роботи, рівня збурень.

Нечіткі регулятори забезпечують грубість і стабільну збіжність процесів в умовах невизначеності, що виникає через ряд факторів таких як: збурюючі випадкові впливи, складність розробки динамічної моделі, її високий порядок та нелінійний характер.

Істотні невизначеності у статичних і динамічних характеристиках процесу деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу як об'єкту керування представляють труднощі в формалізації завдань синтезу регуляторів системи керування. У зв'язку з цим є актуальним застосування регуляторів, заснованих на нечіткій логіці.

Наявність в сучасних системах програмування контролерів вбудованих бібліотек нечіткого керування, що мають добрий графічний інтерфейс, у якому дуже легко і наочно представляється і коректується вид функцій приналежності і нечіткого висновку, що дуже спрощують налаштування системи автоматичного

регулювання, є перевагою нечіткого регулювання.

3.2 Реалізація в програмному середовищі Matlab\Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування що характеризується нелінійними статичними характеристиками.

Для підтвердження актуальності застосування системи керування, побудованої на базі апарата нечіткої логіки, необхідно переконатися, що розглянутий у даній роботі об'єкт керування описується нелінійною моделлю. Тобто, моделі каналів регулювання розглянутого об'єкта управління повинні характеризуватися нелінійною статичною характеристикою. Спочатку представимо нелінійну статичну характеристику ОК для підтвердження відповідності з моделлю об'єкта керування. На рисунку 3.1 представлена екстремальна статична характеристика ОК для того, щоб переконатися у присутності нелінійних властивостей об'єкта за каналом регулювання тиску в ресивері.

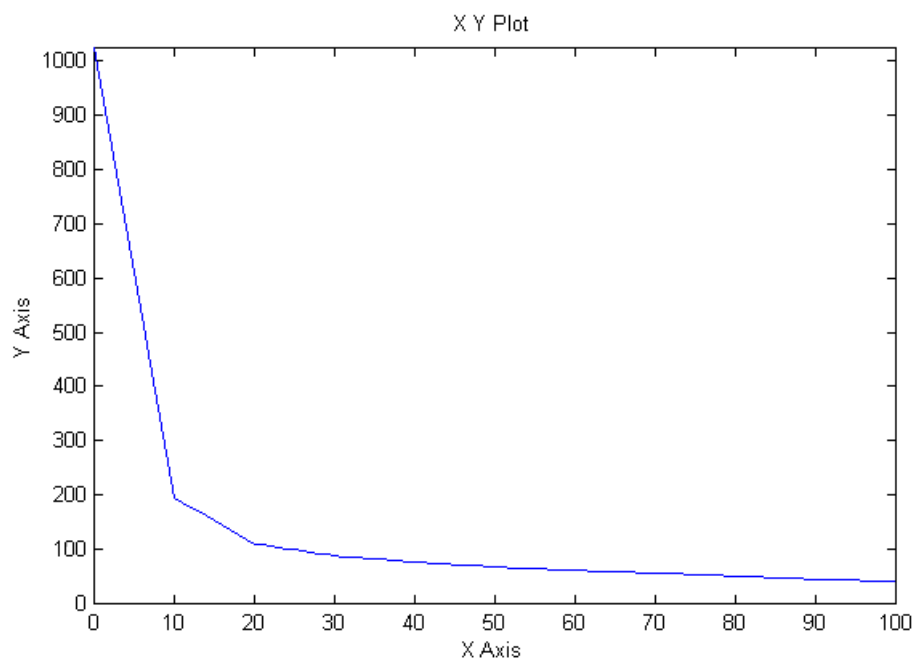


Рисунок 3.1 - Статична характеристика об'єкта управління за каналом «керуюча дія $u_{н4}$ – тиск у ресивері P_p , мБар»

Для представлення статичної характеристики моделі об'єкта управління необхідно на вхід відповідного каналу регулювання подавати повільно

наростаючу керуючу дію, а інші регульовані змінні підтримувати на номінальному рівні. Повільно наростаючий сигнал необхідно реалізувати за допомогою включення блоку Ramp у відповідну модель каналу регулювання, а для підтримання регульованих змінних інших каналів використаємо ПІД-регулятори. Структурна схема повної моделі ОК з додатковим блоком Ramp представлена на рис. 3.2.

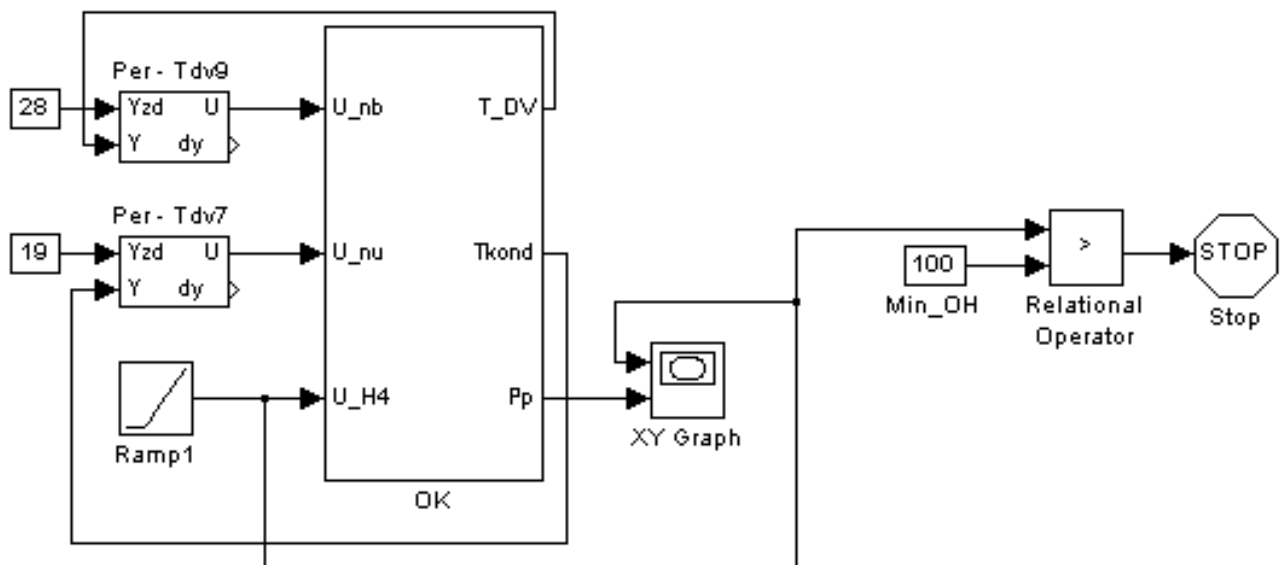


Рисунок 3.2 – Схема моделювання для отримання статичних залежностей тиску в ресивері від частоти обертання вакуумного насосу

В остаточному підсумку в результаті моделювання була отримана статична характеристика моделі каналу регулювання « $u_{H4} - P_p$, мБар», яка має вигляд, представлений на рисунку 3.3.

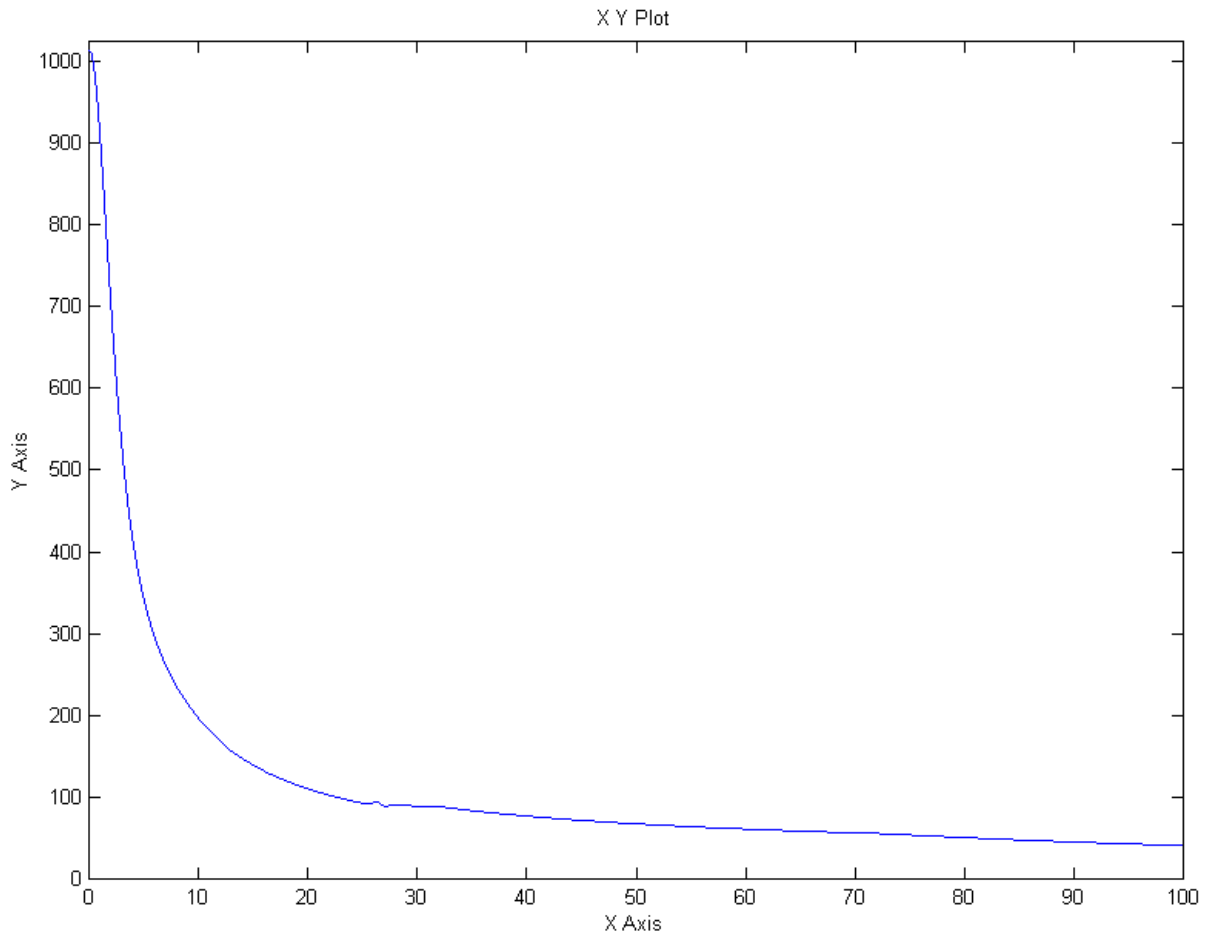


Рисунок 3.3 – Статична характеристика моделі каналу регулювання « $u_{H4} - P_p$ »

З рисунку 3 видно, що статична характеристика моделі каналу регулювання нелінійна та відповідає експериментальним даним, це дає можливість виконати синтез САК з традиційними ПІД регуляторами і одержати необхідні показники якості регулювання.

3.3 Параметричний синтез САК з традиційним ПІД регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.

У даній роботі був виконаний параметричний синтез САУ з традиційним – лінійним ПІД регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Параметри настроювання регуляторів були визначені на основі статичних і динамічних параметрів ОК в рамках лінійної моделі.

Для реалізації параметричної оптимізації регуляторів системи керування в програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 у відповідності з рисунком 3.1 була розроблена схема моделювання системи управління з автоматичним оптимізатором, що забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів за наступним компромісним критерієм якості роботи системи:

$$J = \int_0^{\infty} (|e_1(t)| + \beta \cdot |e_2(t)|) dt \rightarrow \min$$

де: $e_1(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням тиску в ресивері;

$e_2(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величиною і заданим значенням температури повітря в сушильній камері;

β – коефіцієнт.

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, що представлені на рисунку 3.5 у вікні результатів оптимізації. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання тиску в ресивері, помітно покращилася після оптимізації САК. Однак слід зазначити, що при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можуть мати місце лише при відповідних режимах роботи чи початкових умовах системи керування.

Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальні в іншому випадку, це визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів.

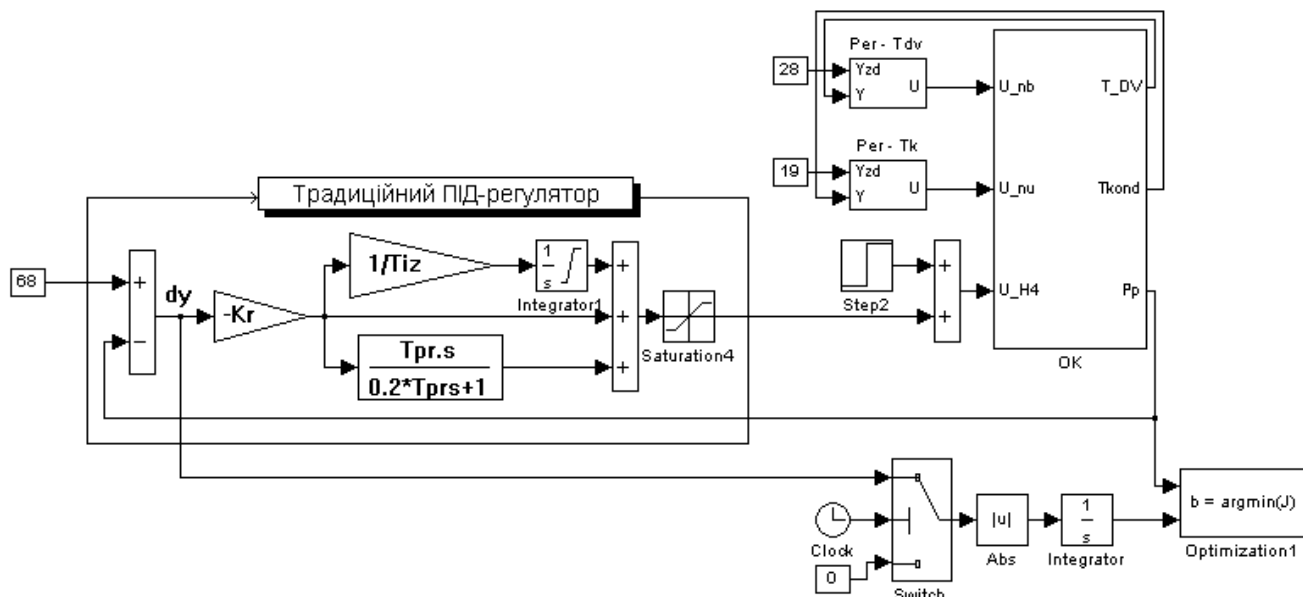
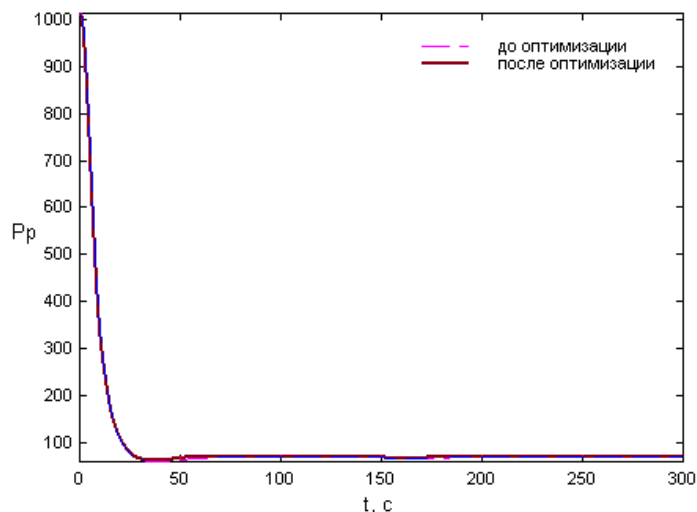


Рисунок 3.4 – Структурна схема моделі САК з традиційним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB Simulink для визначення оптимальних налаштувань системи керування за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
Kr	-3.3133	-15	-2.8	0	до - 38.1607
Tiz	6.8933	0	9.4	20	після - 27.5817
Tpr	4.7	0	4.7	30	оптимізації.
					Количество шагов
					процедуры оптимізації:
					максимальное - 100
					фактическое - 12

Рисунок 3.5 - Результати параметричної оптимізації значень параметрів

регуляторів САК з каналом регулювання, що характеризується нелінійною статичною характеристикою

3.4 Розробка моделі САК з нечітким регулятором (нр) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.

З урахуванням властивостей лінії з деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу, як нелінійного об'єкта керування, доцільно застосувати в контурі регулювання тиску в ресивері нечіткий логічний регулятор (НЛР), який має властивості нелінійного регулятора. Застосування нечіткого-логічного регулятора (Fuzzy – регулятора) обумовлено наявністю нелінійного об'єкта управління, а також складного опису його статичних режимів роботи.

Складність опису статичних режимів роботи лінії з деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу 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 САК із Fuzzy – нечітким регулятором.

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фазіуправління: фазіфікація, логічного висновку і дефазіфікація. Спрощена структурна схема розробляємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.6. З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками.

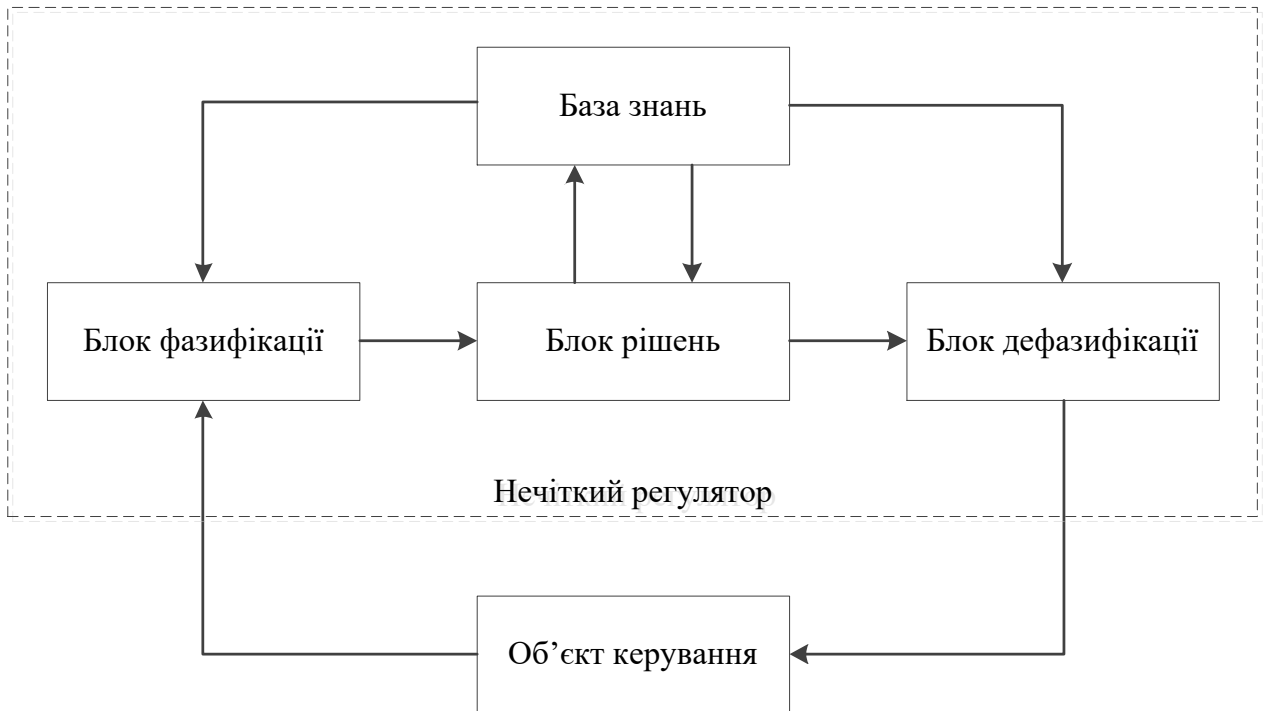


Рисунок 3.6 - Спрощена структурна схема нечіткого логічного регулятора

Всі визначені блоки (фазифікація, блок рішень, дефазифікація), що представлені на рисунку 3.6, 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 необхідний алгоритм (Sugeno або Mamdani) та дві вхідні і дві вихідні змінні.

На рисунку 3.7 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора тиску в ресивері з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

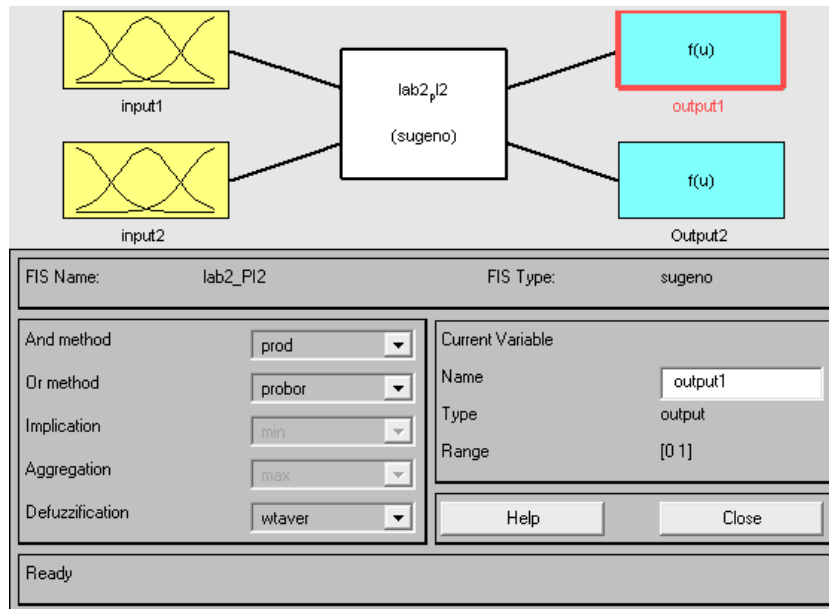


Рисунок 3.7 - Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

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, та алгоритм Мамдані.

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

У базі правил використовуються тільки правила нечітких продукцій в формі:

$$\text{ПРАВИЛО } \langle 1 \rangle: \text{ЯКЩО } (x \in A_1 \text{ } \wedge \text{ } y \in B_1), \text{ ТО, } z_1 = f(x_1, \dots, x_n),$$

$$\text{ПРАВИЛО } \langle 2 \rangle: \text{ЯКЩО } (x \in A_2 \text{ } \wedge \text{ } y \in B_2), \text{ ТО, } z_2 = f(x_1, \dots, x_n),$$

де x, y – вхідні змінні, A_i, B_i - нечіткі множини, $z_i = f(x_1, \dots, x_n)$ - довільна чітка

функція.

Якщо у якості f використовується поліном $f(x) = C_i$, то говорять про алгоритм Сугено 0-порядку. Тоді правила будуть мати наступний вигляд:

$$\text{ПРАВИЛО } \langle 1 \rangle: \text{ЯКЩО } (x \in A_1 \text{ } \wedge \text{ } y \in B_1), \text{ ТО, } z_1 = C_1,$$

$$\text{ПРАВИЛО } \langle 2 \rangle: \text{ЯКЩО } (x \in A_2 \text{ } \wedge \text{ } y \in B_2), \text{ ТО, } z_2 = C_2,$$

(1)

де C_1, C_2 - звичайні (чіткі) числа.

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_1 належить нечіткій множині «велика позитивна PE» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія $u_1 = w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w_2$;

П2: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «велика негативна NE» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія $u_1 = -w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = -w_2$;

П3: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія $u_1 = 0$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = 0$;

П4: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «велика позитивна PE», то керуюча дія $u_1 = w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w_2$;

П5: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «велика негативна NE», то керуюча дія $u_1 = -w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = -w_2$.

Відповідно вище представленим правилам складемо таблиці баз знань для НЛР тиску в ресивері.

Таблиця 4.1 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора тиску в ресивері

e_1	Δe_1		
	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (Приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	-	$u_1 = 5000$ $\Delta u_1 = 5$	-
Z	$u_1 = 5000$ $\Delta u_1 = 5$	$u_1 = 0$ $\Delta u_1 = 0$	$u_1 = -5000$ $\Delta u_1 = -5$

PE	-	$u_1 = -5000$ $\Delta u_1 = -5$	-
----	---	------------------------------------	---

Як видно з рисунку 3.7, 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:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

[a, c] - діапазон зміни змінної, для справжнього випадку $a = -1000$, $c = 1000$;

b - найбільш можливе значення змінної.

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.8 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 3.9.

Згідно з таблицею 3.1 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 3.10.

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

$$y_{out} = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n (\alpha_i)}$$

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

$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(x_0))$, $\alpha_2 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_2}(x_0))$ – значення ступенів істинності всіх висновків правил нечітких продукцій з використанням методу \min -активізації.

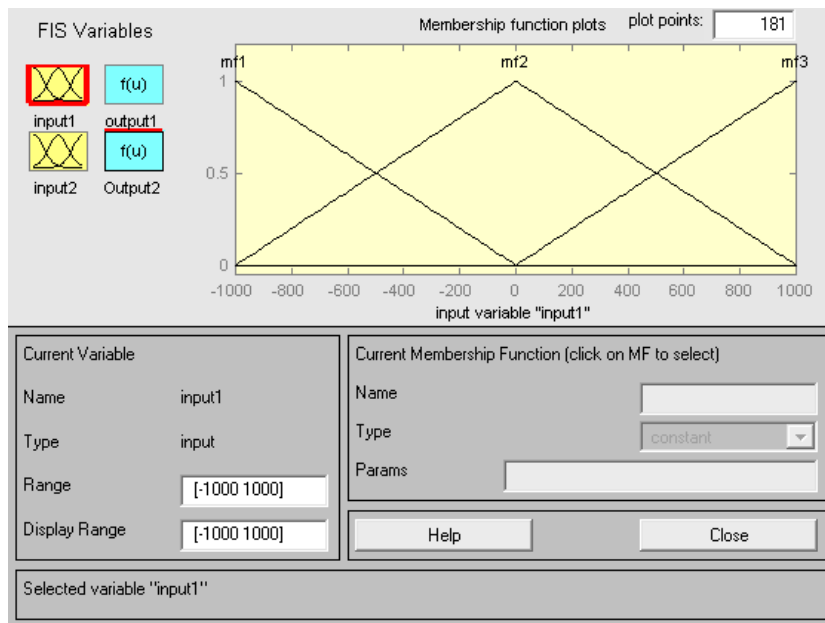


Рисунок 3.8 - Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища

MATLAB\Simulink

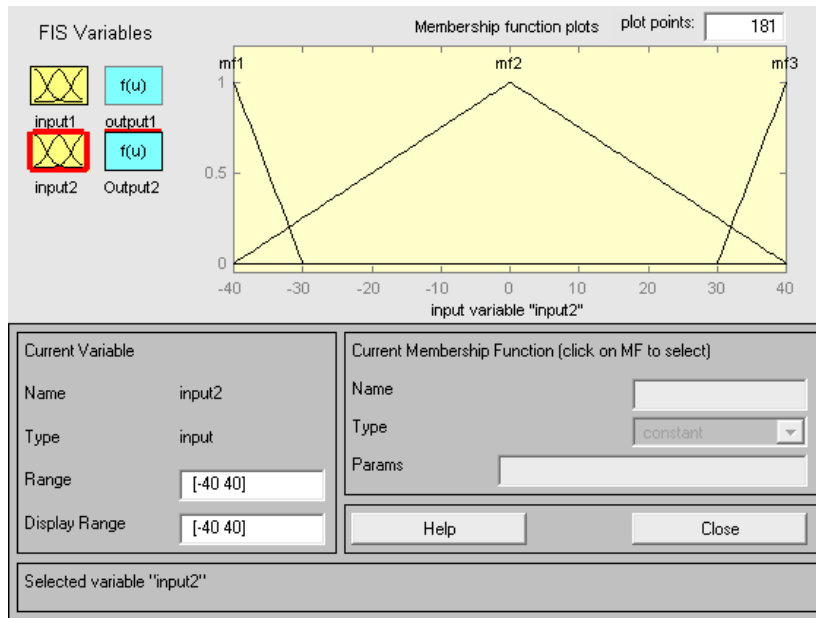


Рисунок 3.9 - Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У даному випадку вихідні значення сигналів C_i згідно з алгоритмом Сугено нульового порядку були визначені у вікні реактора, представленого на рисунку 3.11. Виходами синтезованого нечіткого регулятора визначені зміни «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відпрацьовувати інтегральну П-складову регулятора, а «output2» – відповідно І-складову.

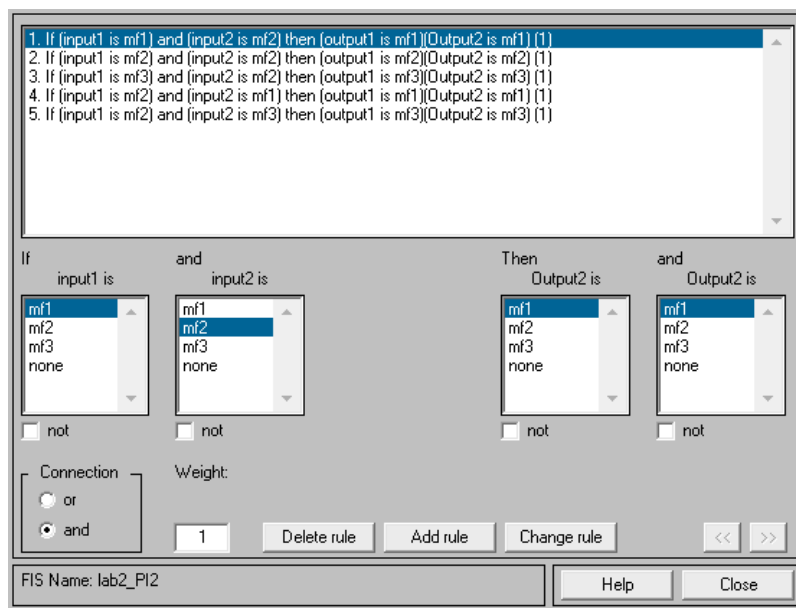


Рисунок 3.10 - Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

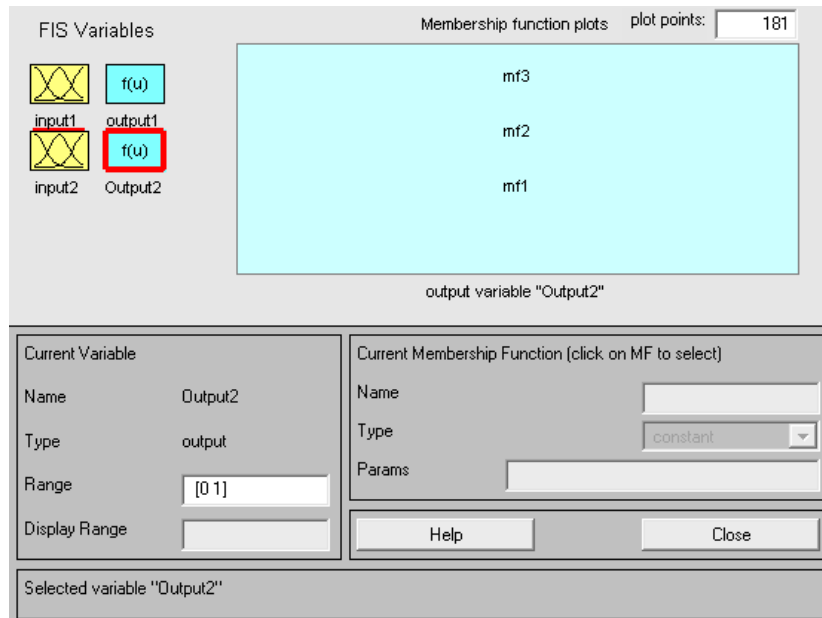


Рисунок 3.11 - Вікна редактора вихідних функцій приналежності нечіткого регулятора Сугено 0-порядку у середовищі MATLAB\Simulink

Алгоритм Мамдані використовується переважно в задачах нечіткого моделювання, де дозволяє значно зменшити обсяги обчислень.

Формується в предметній області у вигляді нечітких предикатних правил виду:

П1: якщо $x \in A_1$, тоді $z \in B_1$,

П2: якщо $x \in A_2$, тоді $z \in B_2$,

.....

Пn: якщо $x \in A_n$, тоді $z \in B_n$,

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

Відповідно вище представленим правилам складемо таблиці баз знань для НЛР тиску в ресивері.

Таблиця 3.2 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора тиску в ресивері

e_1	Δe_1
-------	--------------

	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (Приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	-	$u_1 = PE$ $\Delta u_1 = PE$	-
Z	$u_1 = PE$ $\Delta u_1 = PE$	$u_1 = Z$ $\Delta u_1 = Z$	$u_1 = NE$ $\Delta u_1 = NE$
PE	-	$u_1 = NE$ $\Delta u_1 = NE$	-

Так само як і в регуляторі з використанням алоготиртму Сугено 0-порядку, на вхід даного нечіткого регулятора будуть подаватись дві змінні – помилка регулювання (input1) та приріст помилки регулювання (input2). Для змінної input1 так само задаємо три трикутні функції приналежності «trimf».

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.12 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 3.13.

Згідно з таблицею 3.2 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 3.14.

При дефазифікації вихідних змінних використовується дефазифікація центроїдним методом, коли чітке значення вихідної змінної визначається як центр ваги для кривої. $\mu_{\Sigma}(z)$

Метод центру ваги (тяжіння) Центр ваги (англ. Centre of Gravity, CoG) або центроїд площі 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 ;

$\mu(x)$ – 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.

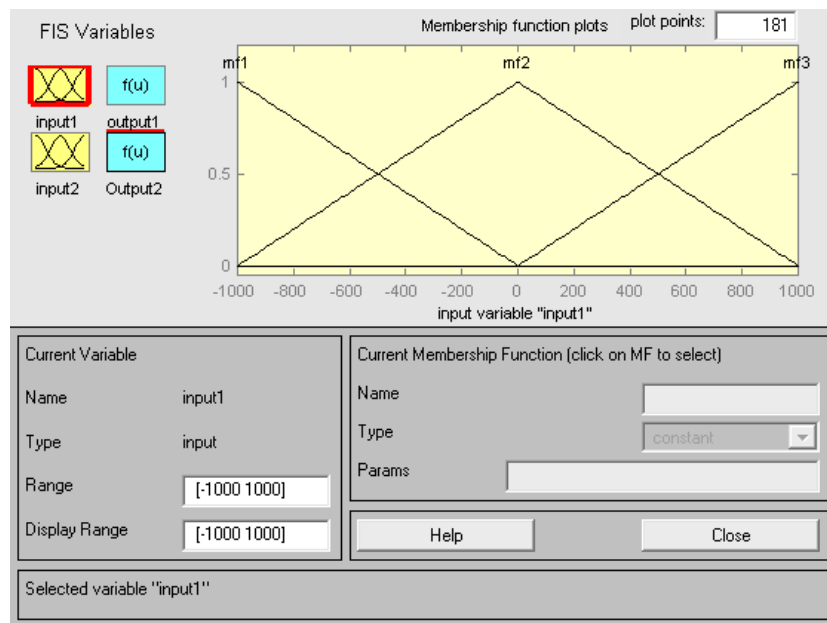


Рисунок 3.12 - Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

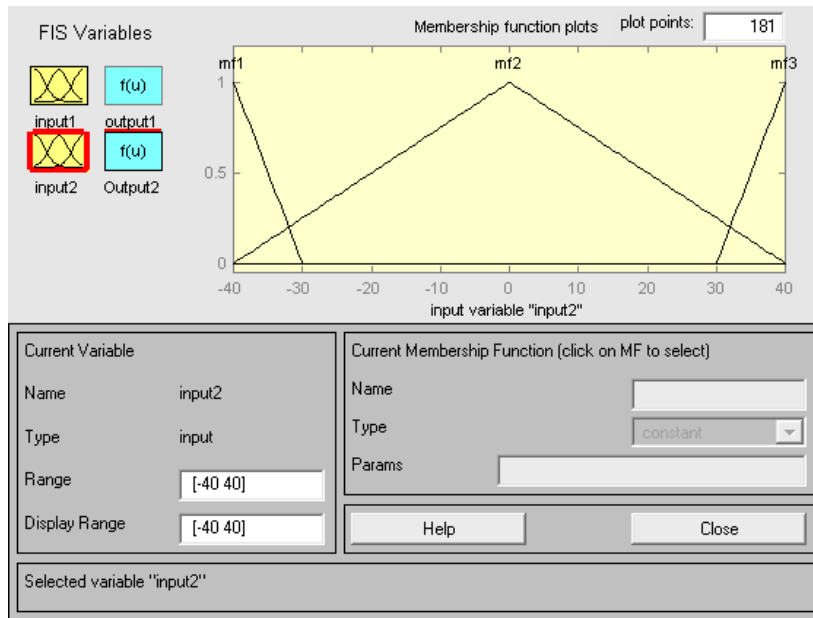


Рисунок 3.13 - Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У даному випадку вихідні значення сигналів C_i згідно з алгоритмом Мамдані були визначені у вікні реактора, представленого на рисунку 3.15. Виходами синтезованого нечіткого регулятора визначені зміни «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відпрацьовувати інтегральну П-складову регулятора, а «output2» – відповідно І-складову.

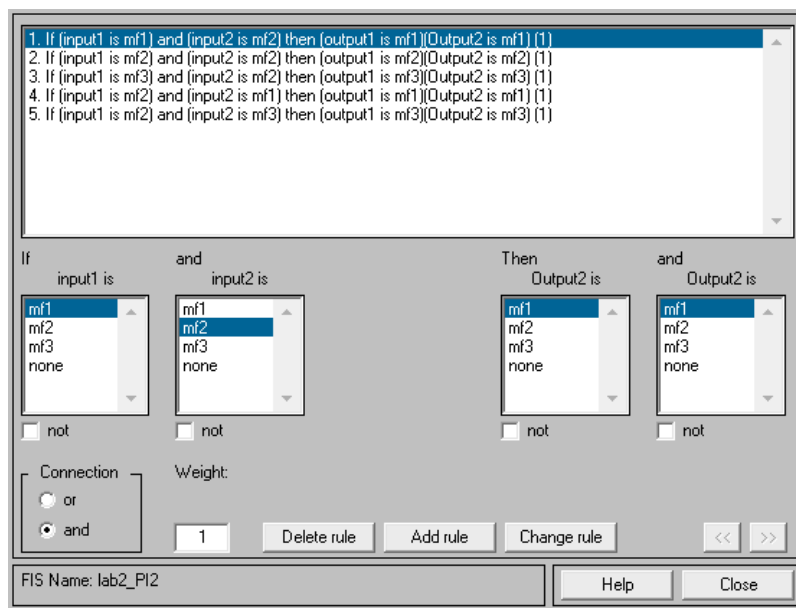


Рисунок 3.14 - Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

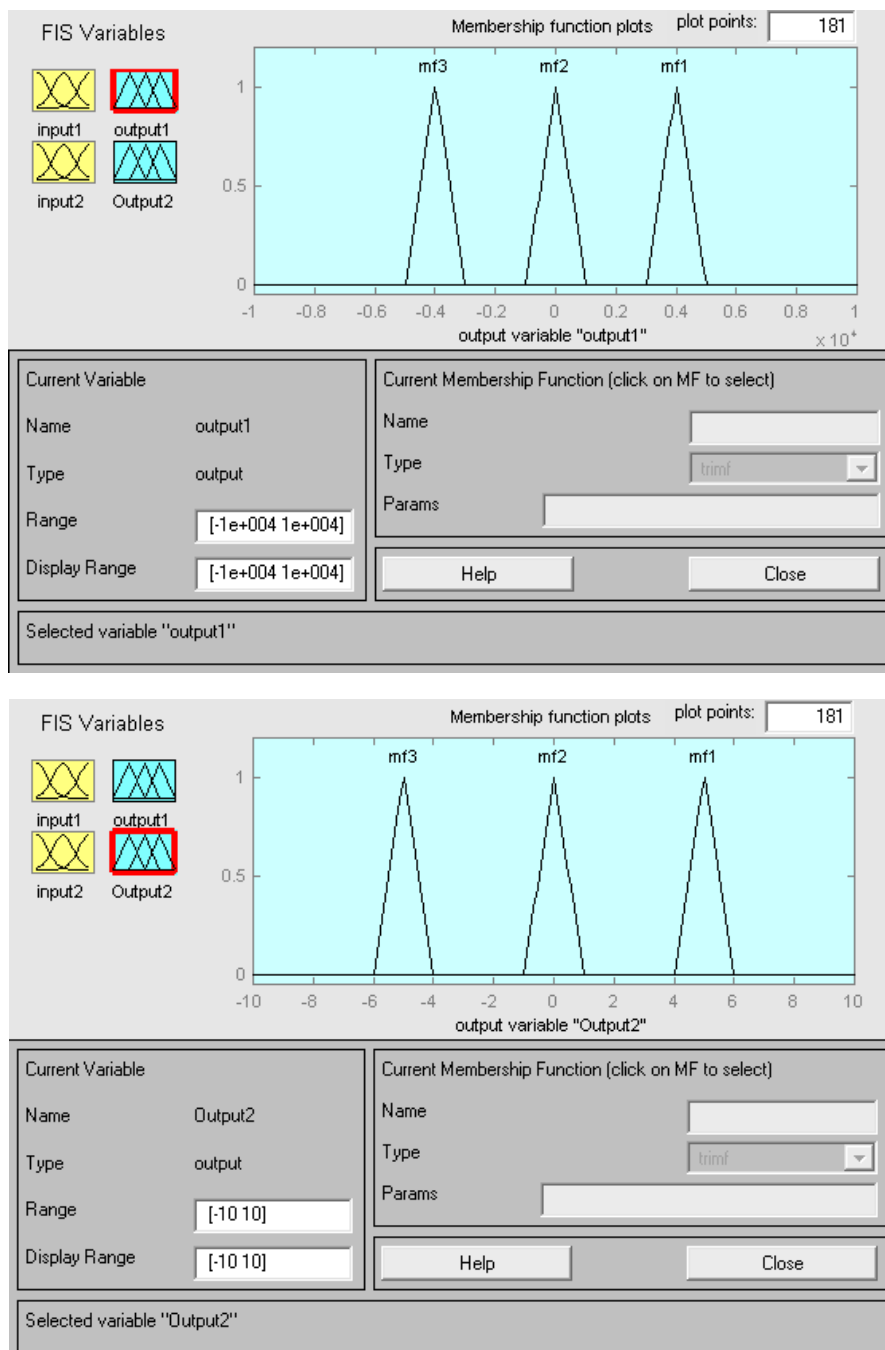


Рисунок 3.15 - Вікна редактора вихідних функцій приналежності нечіткого регулятора Мамдані у середовищі MATLAB\Simulink

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.

У кінцевому випадку були визначені схеми моделювання САК з нечіткими регуляторами, що зображені на схемі порівняння перехідних характеристик САК тиску в ресивері з традиційним ПІД-регулятором та нечіткими логічними регуляторами Сугено 0-порядку та Мамдані (рисунок 3.16). З нього видно, що керуюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

$$u(t) = u_1(t) + (u_2(t - \tau_z) + \Delta u_2)$$

де $u_1(t)$ – керуюча дія П-складової регулятора;

$\Delta u_2 = u_2(t) - u_2(t - \tau_z)$ - приріст керуючої дії від нечіткого регулятора;

$u_2(t - \tau_z)$ - керуюча дія з затримкою за часом τ_z .

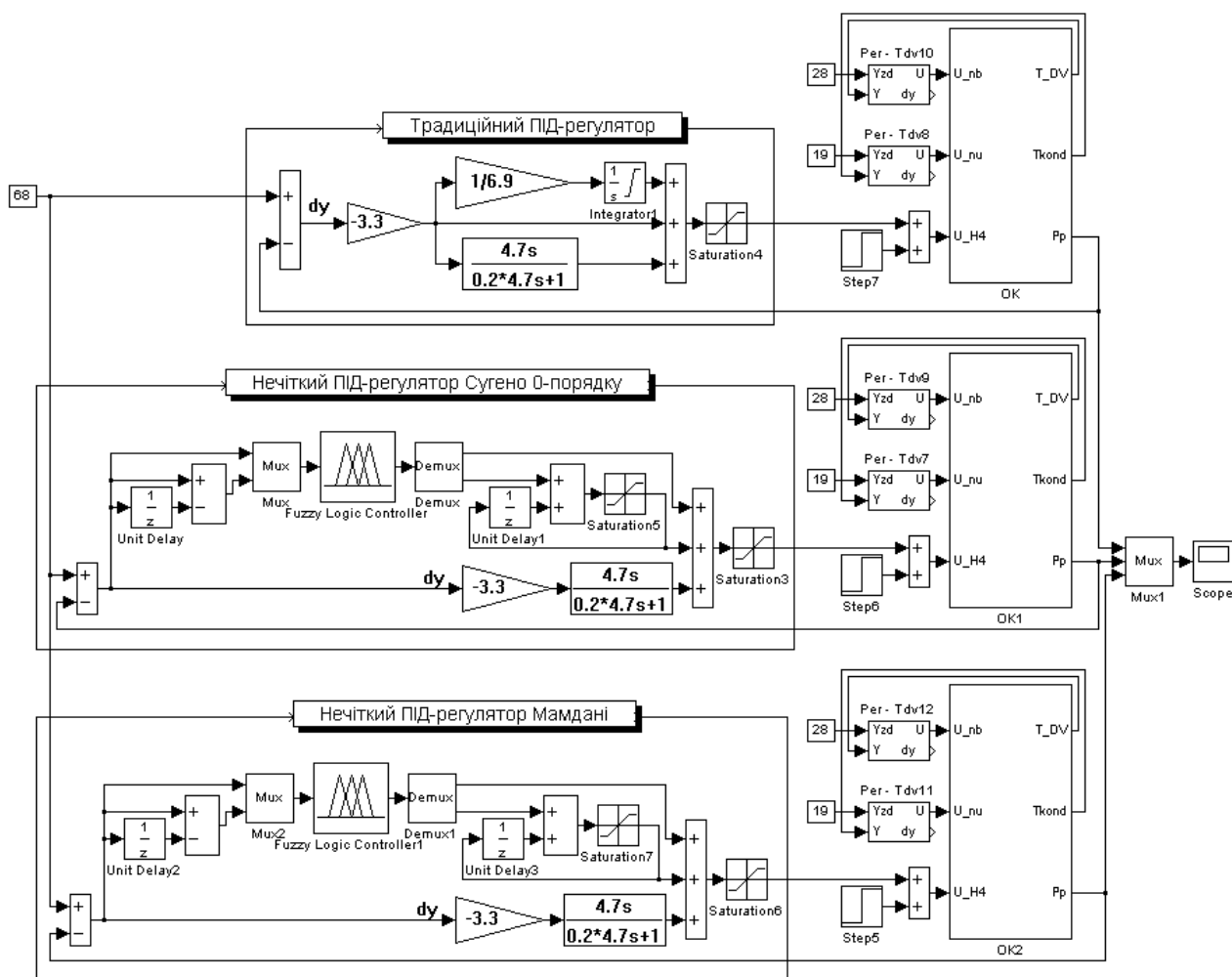


Рисунок 3.16 - Схема порівняння перехідних характеристик САК тиску в ресивері з традиційним ПІД-регулятором та нечіткими логічними регуляторами Сугено 0-порядку та Мамдані

Слід зазначити, що при синтезі нечіткого логічного регулятора «Fuzzy Logic Controller» всі функції приналежності к нечітким множинам та логічні правила функціонування визначені на базі експертних даних. А потім скореговані при моделюванні методом «проб і помилок». Також логічні правила функціонування були визначені з урахуванням правил функціонування нечітких регуляторів, представлених у відомих наукових роботах, одних із перших з Fuzzy керування.

3.5 Порівняльний аналіз функціонування САК з традиційним ПД регулятором і з САК з нечітким регулятором.

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

На рисунку 3.17 представлені графіки перехідних процесів з виходу системи на номінальний режим функціонування. А на рисунку 3.18 представлені графіки динамічних процесів при детермінованому збурюючому впливі і при випадковому впливі, що був введений на 200 секунді.

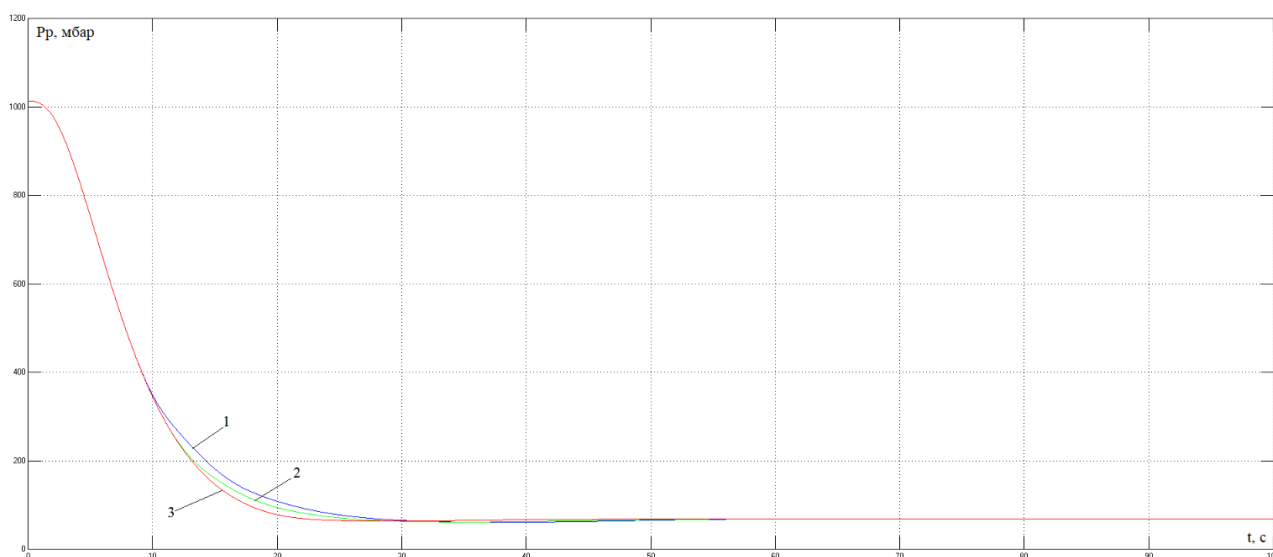


Рисунок 3.17 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при виході на номінальний режим: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку; графік 3 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Мамдані

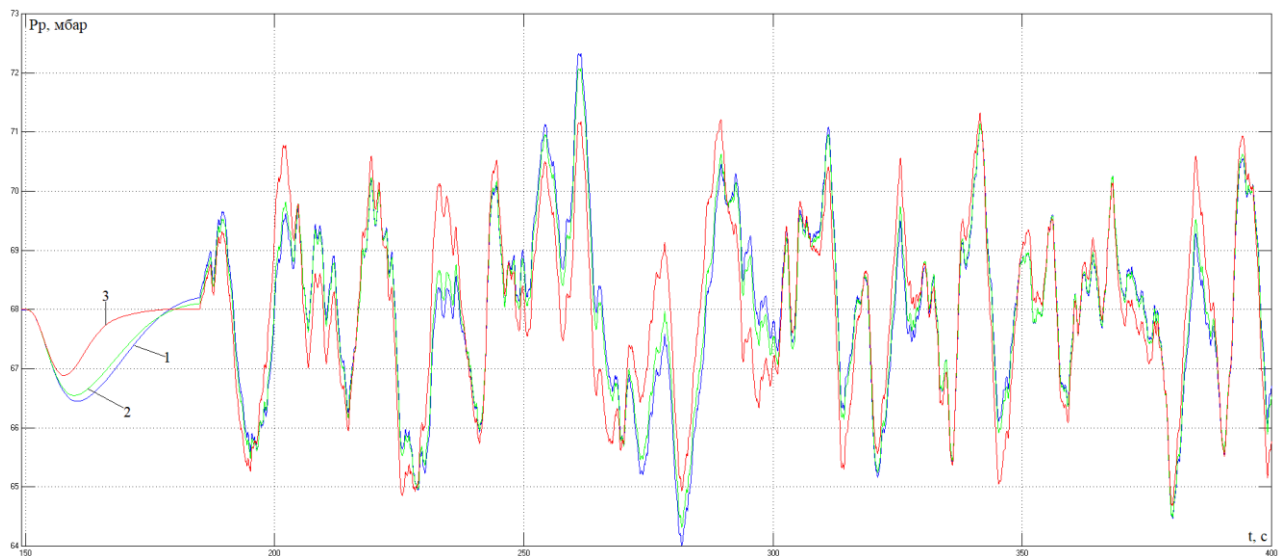


Рисунок 3.18 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при випадкових збурюючих впливах: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку; графік 3 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Мамдані

З рисунків можна побачити, що за якістю регулювання різні САК функціонують ідентично, як з традиційним, так і з нечітким регулятором. Графіки перехідних процесів різних САК зливаються в один. Це отримано завдяки корегуванню параметрів нечіткого регулятора.

3.6 Обґрунтування актуальності застосування нейромережових алгоритмів керування.

Штучні нейронні мережі застосовуються в областях де людський інтелект малоефективний, а традиційні обчислення трудомісткі або фізично неадекватні. Застосування нейронних мереж актуалізується з необхідністю розв'язку погано формалізованих задач. Основні області застосування нейронних мереж: автоматизація процесів класифікації, прогнозування, розпізнавання, прийняття розв'язків; керування, кодування і декодування інформації; апроксимації залежностей та ін.

В різних предметних областях завжди є місце для застосування штучних нейронних мереж (ШНМ). Одним з важливих напрямків використання штучних

нейронних мереж є нейрокерування в системах автоматичного керування різних типів. Нейрокерування — це окремий випадок інтелектуального керування, при якому у якості інструмента для розв'язку завдань керування застосовуються штучні нейронні мережі.

Штучна нейронна мережа як нейрорегулятор здійснює нелінійне перетворення вхідного сигналу і формування управляючого впливу. Великою перевагою цього регулятора є те що він може мати велику кількість оптимізованих параметрів (коефіцієнтів міжнейронних зв'язків), що дає можливість оптимізувати його практично під будь-який об'єкт з нелінійною статичною характеристикою. У даній роботі нейронна мережа – це математична модель з параметрами, що оптимізуються, яка буде виконувати функції розробленого раніше нечіткого логічного регулятора.

3.7 Розробка моделі САК з нейрорегулятором.

Нейрорегулятор у нашому випадку – це штучна нейронна мережа, що характеризується нелійними характеристиками. Завдяки цьому застосування нейрорегулятора на базі нейронної мережі дозволить досягти більш високих результатів в керуванні. 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.

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:

$$x_1w_1 + x_2w_2 + \dots + x_nw_n = \sum_{i=1}^n x_iw_i$$

Для формування адекватного вихідного сигналу використовують функцію активації. Вона перетворює зважену суму в якесь число, яке і є виходом нейрона.

У зв'язку з тим, що нечіткій регулятора визначає приріст керуючої 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 (tansig). Така функція дозволяє отримати на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1), що може бути необхідним в системі керування. Графічне представлення функції відображено на рисунку 3.20.

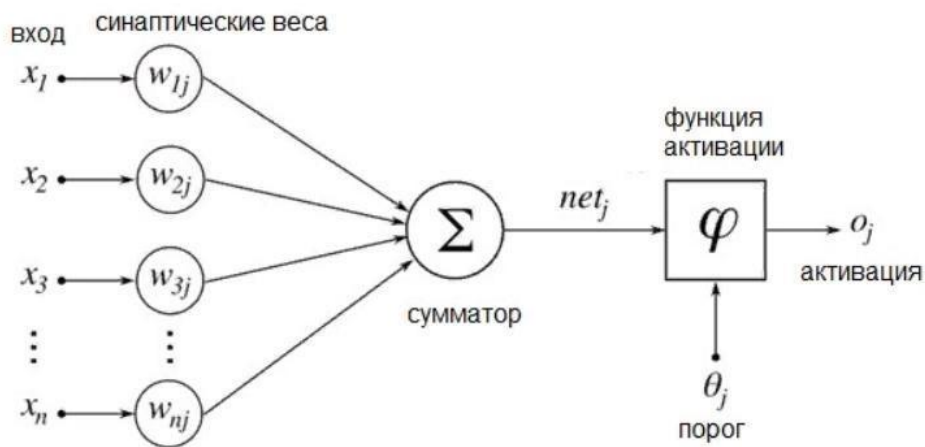


Рисунок 3.19 - Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

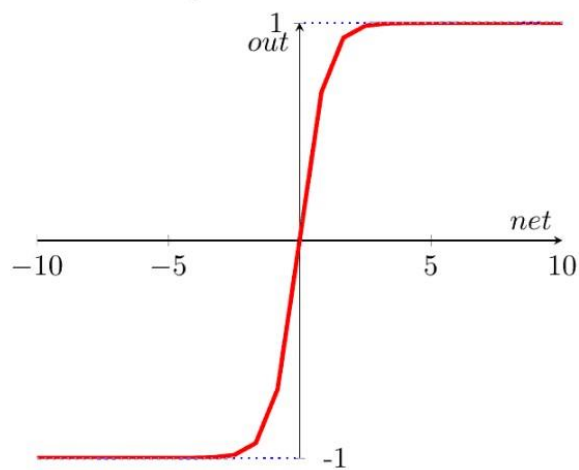


Рисунок 3.20 - Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

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

Відомо, що одношарова нейронна мережа має обмежені можливості. Багатошарова чотирьох-шарова вже надлишкова для рішення різних задач. В даному випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рисунку 3.21. На рисунку 3.21 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.

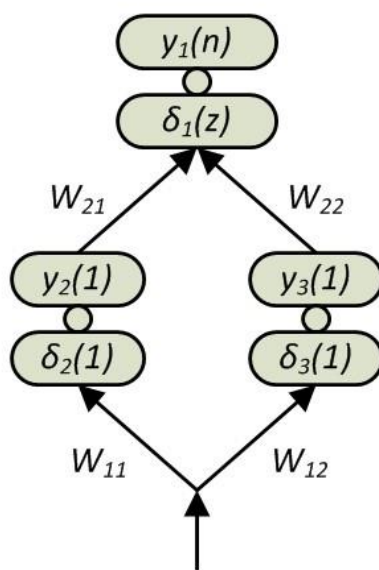


Рисунок 3.21 - Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

Для визначення ваг між нейронними з'єднаннями за методом зворотного поширення було використано програмне середовище MATLAB, що дозволяє згенерувати задану нейронну 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 керуючої дії.

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 3.3). Дані, представлені у таблиці 3.3, визначені на базі моделювання нечіткого регулятора.

Таблиця 3.3 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	Δy	Δu	u
1	-1000	5	100
2	-200	1	100
3	-25	0,125	100
4	-20	0,1	80
5	-15	0,075	60
6	-10	0,05	40
7	-5	0,025	20
8	0	0	0
9	5	-0,025	-20
10	10	-0,05	-40
11	15	-0,075	-60
12	20	-0,1	-80
13	25	-0,125	-100
14	200	-1	-100
15	1000	-5	-100

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 3.22.

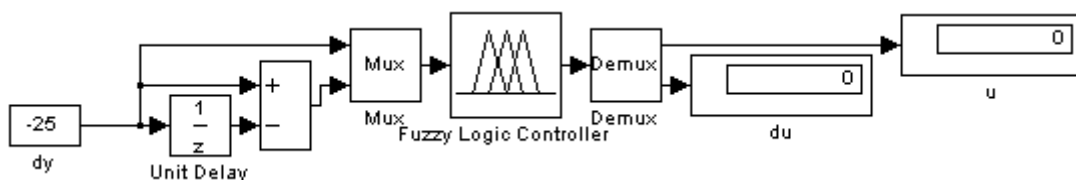


Рисунок 3.22 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.23 і 3.24 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.

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.

```

>> P=[-1000 -200 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 200 1000];
>> t=[1 1 1 0.8 0.6 0.4 0.2 0 -0.2 -0.4 -0.6 -0.8 -1 -1 -1];
>> net=newff([-1000 1000], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
>> net.trainParam.epochs=300;
>> net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 1.45341/0, Gradient 606.141/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 0.000547565/0, Gradient 0.00482303/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 0.000487655/0, Gradient 0.0061552/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 0.000473673/0, Gradient 0.00154829/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 0.00046602/0, Gradient 0.00236642/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 0.000463733/0, Gradient 0.0290268/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 0.000461704/0, Gradient 0.00134335/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 0.000461165/0, Gradient 0.00042784/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 0.000460126/0, Gradient 0.00212372/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 0.000459813/0, Gradient 0.000547424/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 0.000459658/0, Gradient 0.000246503/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 0.000459283/0, Gradient 0.00213925/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 0.000459138/0, Gradient 0.000550142/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

>> a=sim(net, P)
a =

Columns 1 through 7

    1.0000    1.0000    0.9532    0.8244    0.6142    0.3870    0.1830

Columns 8 through 14

    0.0000   -0.1830   -0.3870   -0.6142   -0.8244   -0.9532   -1.0000

Column 15

   -1.0000

>> gensim(net)

```

Рисунок 3.23 - Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

```

>> P=[-1000 -200 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 200 1000];
>> t=[0.5 0.1 0.0125 0.01 0.0075 0.005 0.0025 0 -0.0025 -0.005 -0.0075 -0.01 -0.0125 -0.1 -0.5];
>> net=newff([-1000 1000], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
>> net.trainParam.epochs=300;
>> net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.562154/0, Gradient 998.441/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 0.00030387/0, Gradient 32.7287/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 1.00758e-005/0, Gradient 0.718604/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 8.75578e-006/0, Gradient 0.0718929/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 7.29458e-006/0, Gradient 0.291308/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 6.97197e-006/0, Gradient 0.0776619/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 6.81843e-006/0, Gradient 0.0370131/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 6.70974e-006/0, Gradient 0.0219853/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 4.63806e-006/0, Gradient 0.0900352/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 2.43151e-008/0, Gradient 0.232082/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 1.21951e-008/0, Gradient 0.0182429/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 9.01367e-009/0, Gradient 0.427716/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 5.15708e-009/0, Gradient 0.0253392/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

>> a=sin(net, P)
a =
Columns 1 through 7
    0.5000    0.0998    0.0125    0.0100    0.0075    0.0050    0.0025
Columns 8 through 14
    0.0000   -0.0025   -0.0050   -0.0075   -0.0099   -0.0124   -0.1002
Column 15
   -0.5000
>> gensin
??? No appropriate methods for function gensin.
>> gensin(net)

```

Рисунок 3.24 - Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.25, з яких можливо побачити, що десь на 120-му кроці навчання коректування ваг між нейронними з'єднаннями пропорційної складової нейрорегулятора було закінчено, а інтегральної складової – на 270.

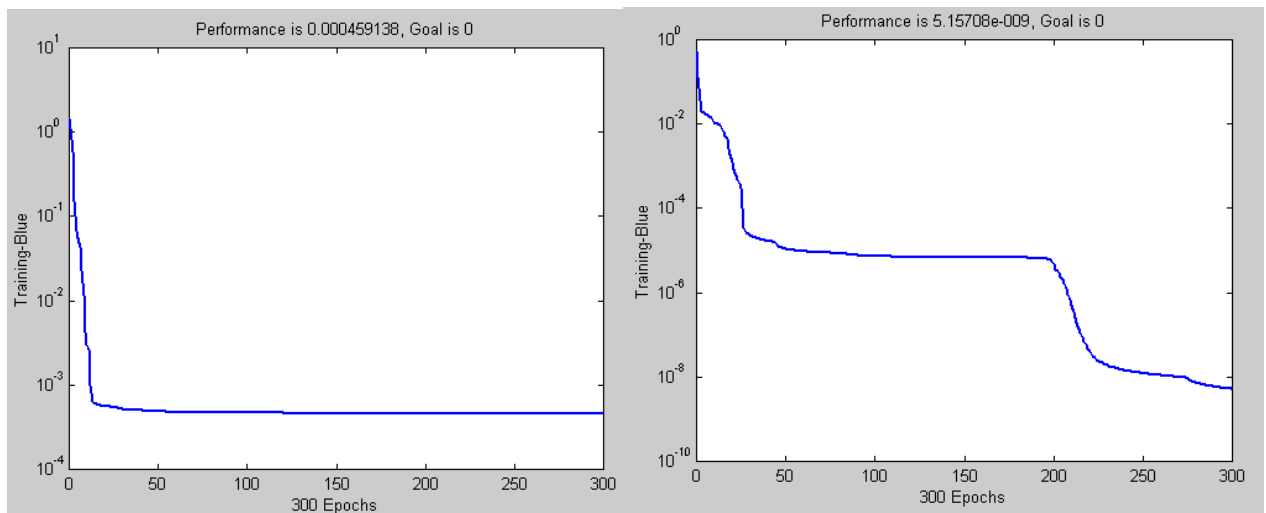


Рисунок 3.25 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону мережі. На

рисунках 3.26 та 3.27 зображено бажані та фактичні значення вихідного сигналу ітого вихідного нейрону НМ, що відтворює І – складову та ІІ – складову нейрорегулятора відносної вологи окремо.

Фактичні значення:														
0,5	0,0998	0,0125	0,01	0,0075	0,005	0,0025	0	-0,0025	-0,005	-0,0075	-0,0099	-0,0124	-0,1002	-0,5
Бажані значення:														
0,5	0,1	0,0125	0,01	0,0075	0,005	0,0025	0	-0,0025	-0,005	-0,0075	-0,01	-0,0125	-0,1	-0,5

Рис. 3.26 - Бажані та фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює І – складову нейрорегулятора

Фактичні значення:														
1	1	0,9532	0,8244	0,6142	0,387	0,183	0	-0,183	-0,387	-0,6142	-0,8244	-0,9532	-1	-1
Бажані значення:														
1	1	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1	-1	-1

Рис. 3.27 - бажані та фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює ІІ – складову нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених на рисунках 3.26 та 3.27, розрахуємо похибки для вихідного шару та похибки для і-тих нейронів прихованого шару НМ за методом зворотного поширення для оцінки якості тренування нейронної мережі.

Згідно навчанню штучної нейронної мережі за методом зворотного розповсюдження похибки, похибка для вихідного шару нейронної мережі визначається за наступною формулою:

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

де d_i – бажане значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону мережі. y_i – фактичне значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону мережі.

Похибка для і-того нейрону прихованого шару розраховується за наступною формулою:

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

де w_{in+1} – вага між-нейронного з'єднання n+1 шару; $\delta_i(n+1)$ – похибка і-

того нейрону n+1 шару.

Таким чином, розрахунок похибок для I – складової нейрорегулятора наступний:

Розрахунок помилки вихідного шару :

$$\delta_1(z) = (y_1(n) - d_i) \cdot y_1(n) \cdot (1 - y_1(n)) = (-0,1002 + 0,1) \cdot (-0,1002) \cdot (1 + 0,1002) = 0,000022$$

Розрахунок помилки для і-тих нейронів прихованого шару:

$$\delta_2(n) = y_2(n) \cdot (1 - y_2(n)) \cdot w_{21} \cdot \delta_1(z) = 0,1203 \cdot (1 - 0,1203) \cdot (-6,6448671163820876) \cdot 0,000022 = -0,00001981$$

$$\delta_3(n) = y_3(n) \cdot (1 - y_3(n)) \cdot w_{31} \cdot \delta_1(z) = 0,2562 \cdot (1 - 0,2562) \cdot 0,21992639247675425 \cdot 0,000022 = 0,000000935$$

Розрахунок помилок для II – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\delta_1(z) = (y_1(n) - d_i) \cdot y_1(n) \cdot (1 - y_1(n)) = (0,9532 - 1) \cdot (0,9532) \cdot (1 - 0,9532) = -0,002087$$

Розрахунок помилки для і-тих нейронів прихованого шару:

$$\delta_2(n) = y_2(n) \cdot (1 - y_2(n)) \cdot w_{21} \cdot \delta_1(z) = 1 \cdot (1 - 1) \cdot 58,646534580158266 \cdot (-0,002087) = 0$$

$$\delta_3(n) = y_3(n) \cdot (1 - y_3(n)) \cdot w_{31} \cdot \delta_1(z) = -0,9968 \cdot (1 + 0,9968) \cdot 58,647338940156897 \cdot (-0,002087) = 0,2436$$

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 3.28. У такий спосіб була синтезована модель САК з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink.

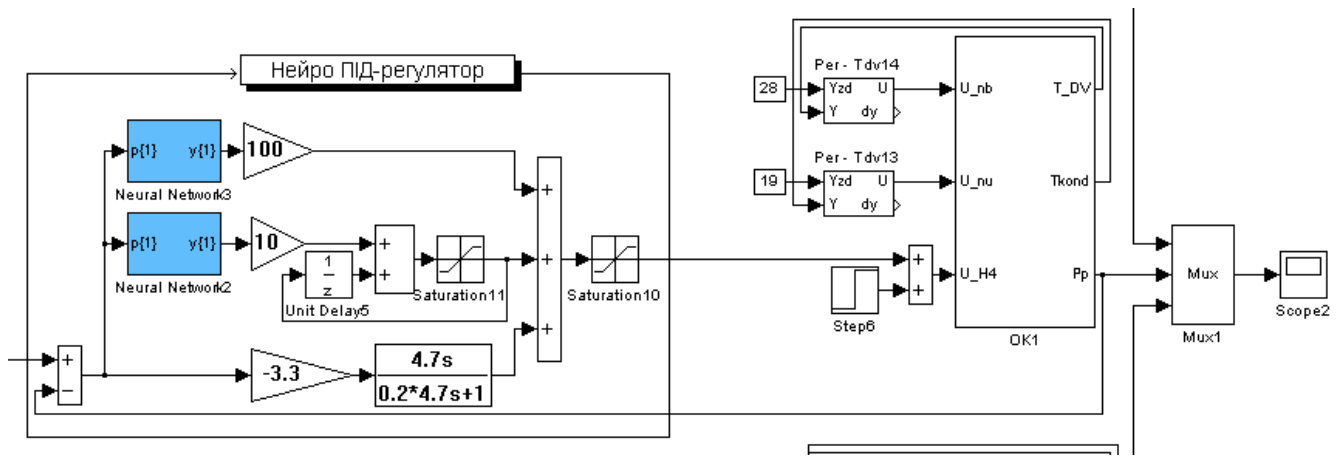


Рисунок 3.28 – Схема моделювання САК тиску в ресивері з нейрорегулятором який представлений засобами середовища MATLAB\Simulink

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.29, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.28.

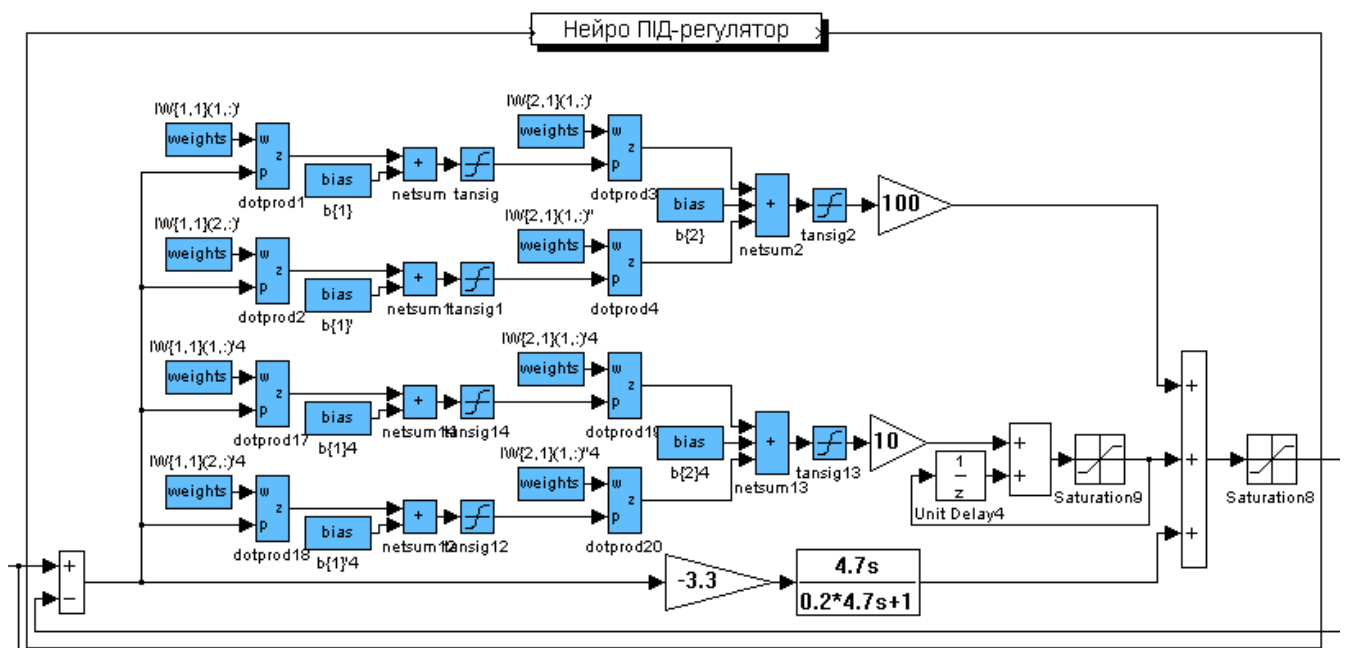


Рисунок 3.29 – Схема моделювання нейронного регулятора

У результаті моделювання САК з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САК з нечітким регулятором та традиційним ПІД-регулятором. Ці графіки представлені на рисунках 3.30 та 3.31. З графіків перехідних процесів можливо

побачити, що за якістю регулювання САК з нейрорегулятором працює значно гірше, ніж САК з нечітким регулятором. Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування в усіх САК складає 30 секунд. Але при детермінованому збурюючому впливі у САК з нейрорегулятором час регулювання значно більший ніж в інших САК. А найменше максимальне динамічне відхилення та нечітким регулятором Мамдані, як показано на рисунку 3.31. При цьому регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має вісім ваг між нейронних з'єднань, тобто параметри які можна оптимізувати для додаткового покращення якості регулювання. Також, як видно з рисунку 3.29, є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

Можливо зробити висновок, що виходячи з якості регулювання різних САК необхідно оптимізувати нейрорегулятор при тих же умовах, як і попередній традиційний ПД-регулятор для визначення остаточного висновку про доцільність застосування різних САК.

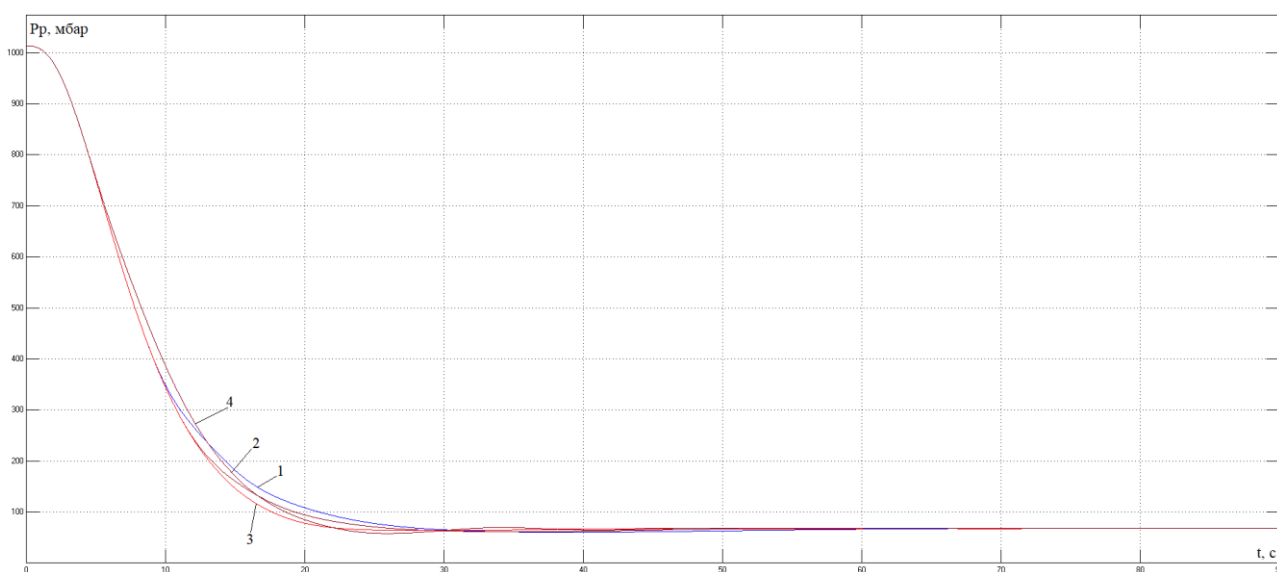


Рисунок 3.30 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при виході на номінальний режим: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку; графік 3 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Мамдані, графік 4 – перехідний процес у САК з нейронним регулятором

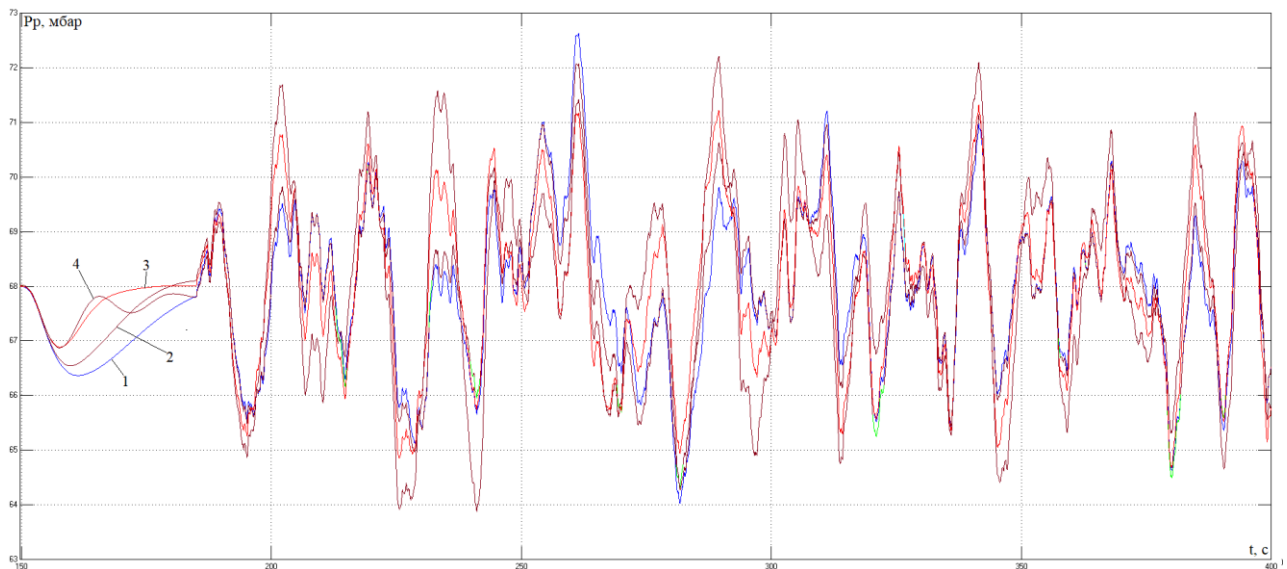


Рисунок 3.31 - Графіки переходних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при випадкових збурюючих впливах: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку; графік 3 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Мамдані, графік 4 – перехідний процес у САК з нейронним регулятором

3.8 Параметрична оптимізація САК з нейрорегулятором.

Для покращення якості регулювання проведена параметрична оптимізація САК з нейронним регулятором. Оптимізувались чотири вагових коефіцієнти нейронних з'єднань першого вхідного шару штучної нейронної мережі. Оптимізація нейронного регулятора проводилась в таких же умовах і з тим же інтегральним показником якості, які були при оптимізації САК з традиційним ПІД регулятором. У програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 визначена структурна схема моделі САК з нейронним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором для визначення оптимальних налаштувань системи керування за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання, що зображена на рисунку 3.32.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки переходних процесів до і після оптимізації, оптимальні визначені ваги між-нейронних з'єднань першого шару нейронної мережі та результат оптимізації, який був

отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації при визначеному інтегральному критерії якості роботи системи, що зображені на рисунку 3.33.

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.

Результати параметричної оптимізації показують, що нейрорегулятор на відміну від традиційного та нечіткого регуляторів, має велику можливість налаштування під обраний об'єкт з нелінійною статичною характеристикою каналів регулювання.

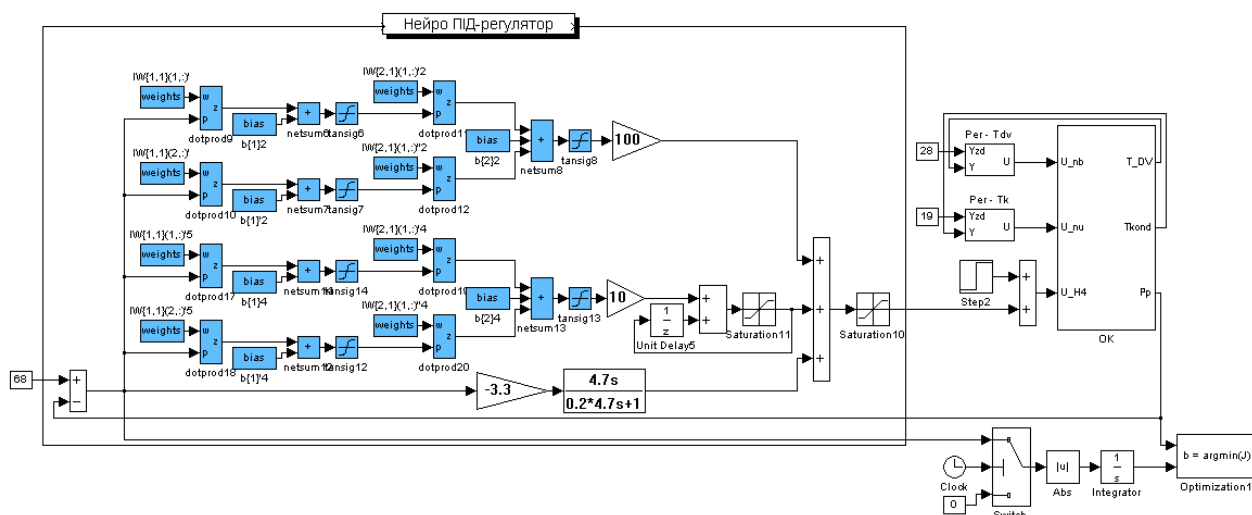
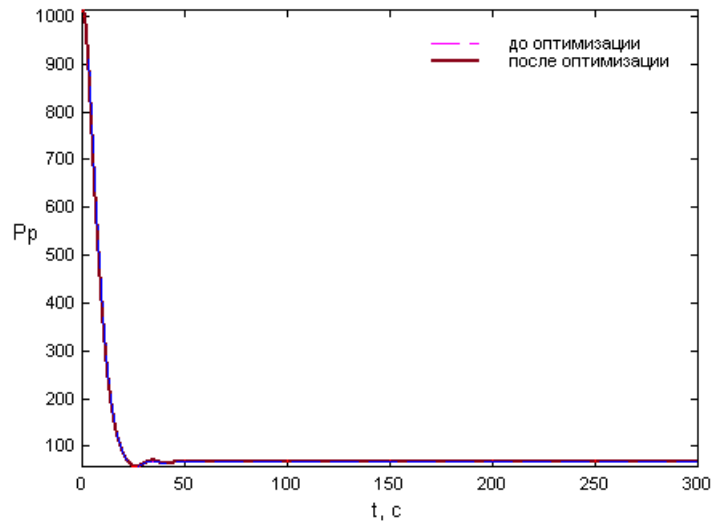


Рисунок 3.32 – Структурна схема моделі САК з нейронним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB Simulink для визначення оптимальних налаштувань системи керування за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
W1	-0.044315	-10.04	0.5378158353	6033.1	до - 29.4776
W2	-0.045371	-10.04	0.5378026860	5514.1	после - 23.3521
W3	0.00012562	-0.0001	0.9457060813	2959.1	оптимизации.
W4	0.00091057	-10.001	0.0999341824	9204.1	Количество шагов процедуры оптимизации:
					максимальное - 100
					фактическое - 12

Рисунок 3.33 – Результати параметричної оптимізації значень параметрів нейронного регулятора САК з каналом регулювання, що характеризується нелінійною статичною характеристикою

Після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора стійкість САК при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених на етапі розробки моделі у діапазоні +/- 20 %. Результати перевірки системи на грубість за допомогою відповідного програмного забезпечення, вбудованого в середовище MATLAB\Simulink, представлені на рисунку 3.34. З рисунку 3.34 можливо побачити, що система не втрачає стійкість при різних параметрах у діапазоні +/- 20 %, які відзначені у тому ж вікні перевірки системи на грубість. Отже синтезований нейрорегулятор можливо перетворити у відповідний код – програму для визначеного промислового контролеру для практичного застосування його у відповідній системі керування.

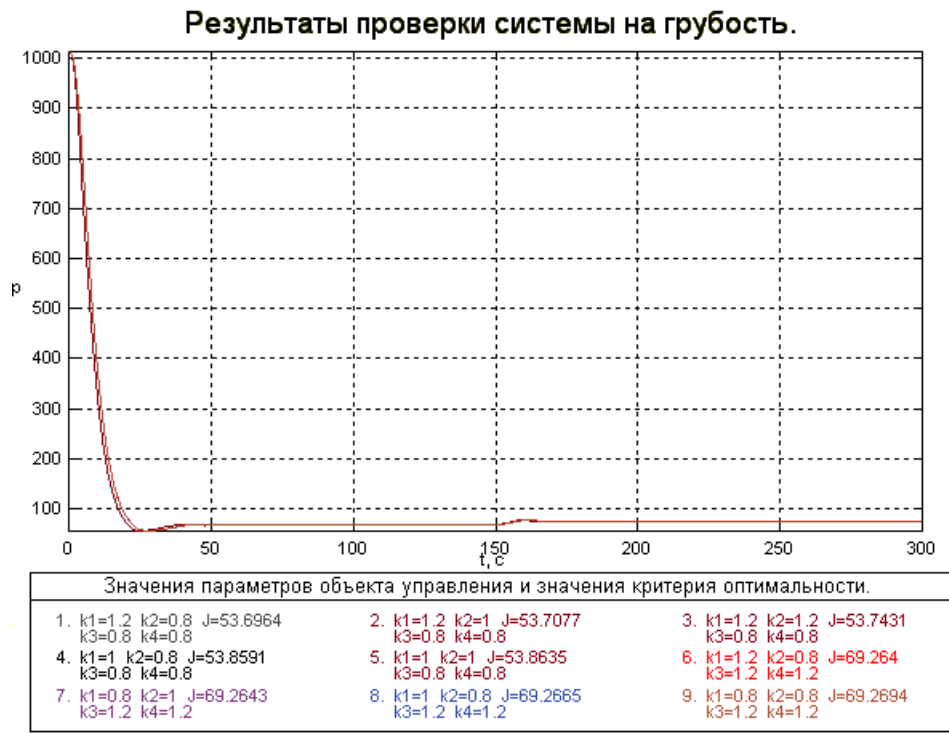


Рисунок 3.34 – Вікно результатів перевірки САК з нейронним ПІД-регулятором на грубість

3.9 Дослідження якості регулювання різних САК при умовах наявності збурюючих впливів випадкового характеру.

На заключному етапі розробки САК виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САК за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САК за виходом системи на номінальний режим функціонування, що показані на рисунку 3.35. Також у результаті моделювання були отримані відповідні графіки перехідних процесів при випадкових збурюючих впливах, що відображені на рисунку 3.36. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування значно менший при САК з регулятором, що представлений на базі штучної нейронної мережі, але при випадкових збурюючих впливах, різниця в якості регулювання різних САК практично непомітна.

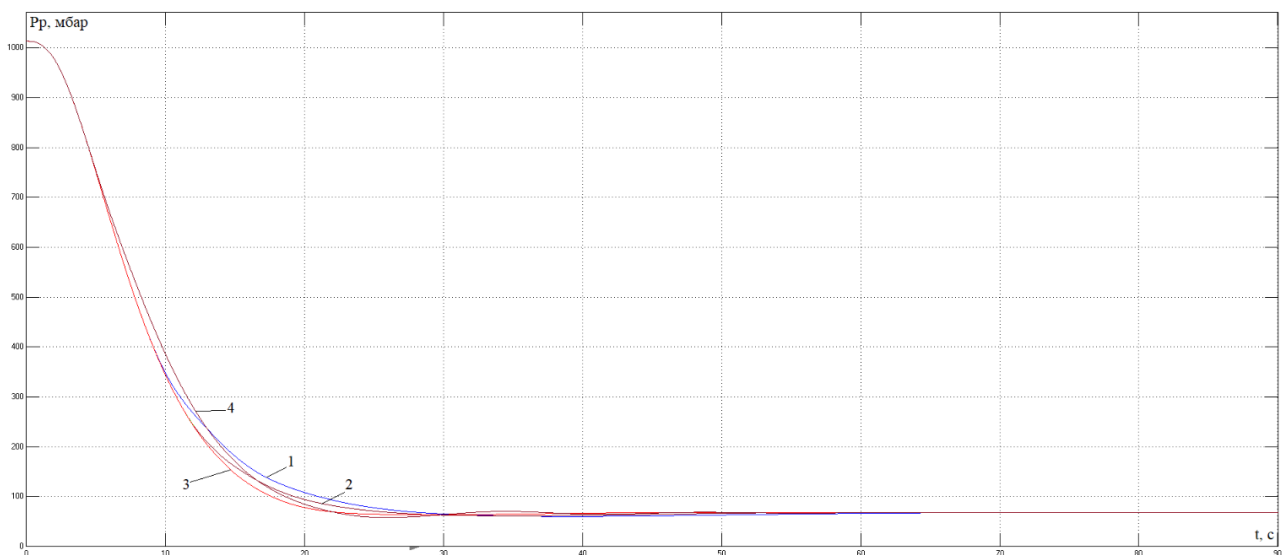


Рисунок 3.35 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при виході на номінальний режим: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку; графік 3 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Мамдані, графік 4 – перехідний процес у САК з нейронним регулятором

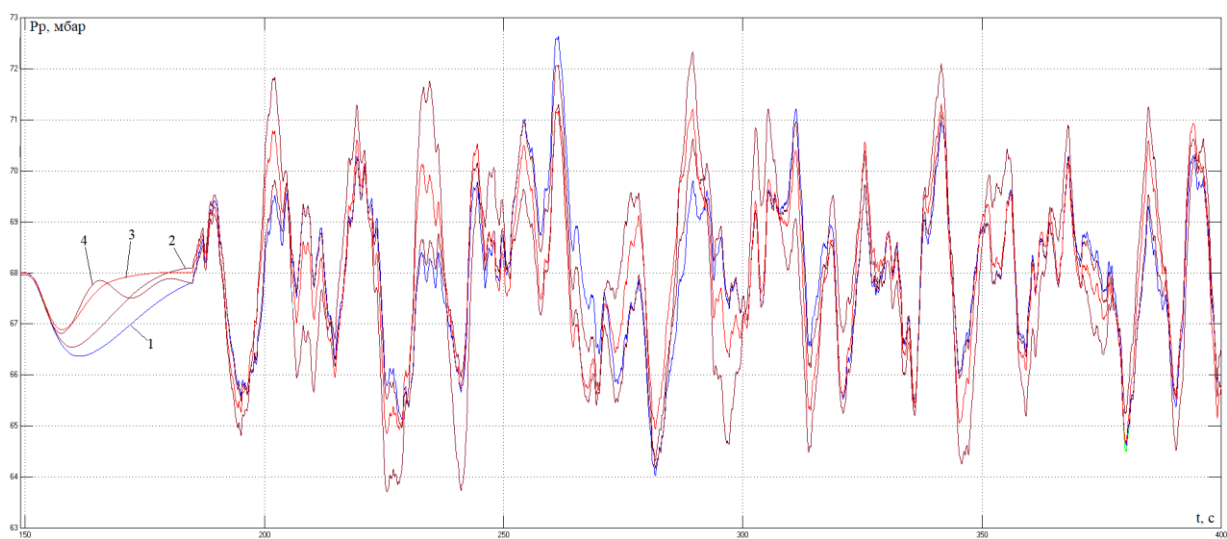


Рисунок 3.36 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при випадкових збурюючих впливах: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку; графік 3 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Мамдані, графік 4 – перехідний процес у САК з нейронним регулятором

За допомогою аналізатора імовірнісних характеристик, що вбудований у середовище MATLAB\Simulink, визначена якість регулювання різних САК при випадкових збурюючих впливах. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень похибки регулювання САК з традиційним ПД-регулятором, з нечітким регулятором Мамдані та САК з нейронним регулятором при випадкових збурюючих впливах. Результати представлені на рисунку 3.37, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання різних САК.

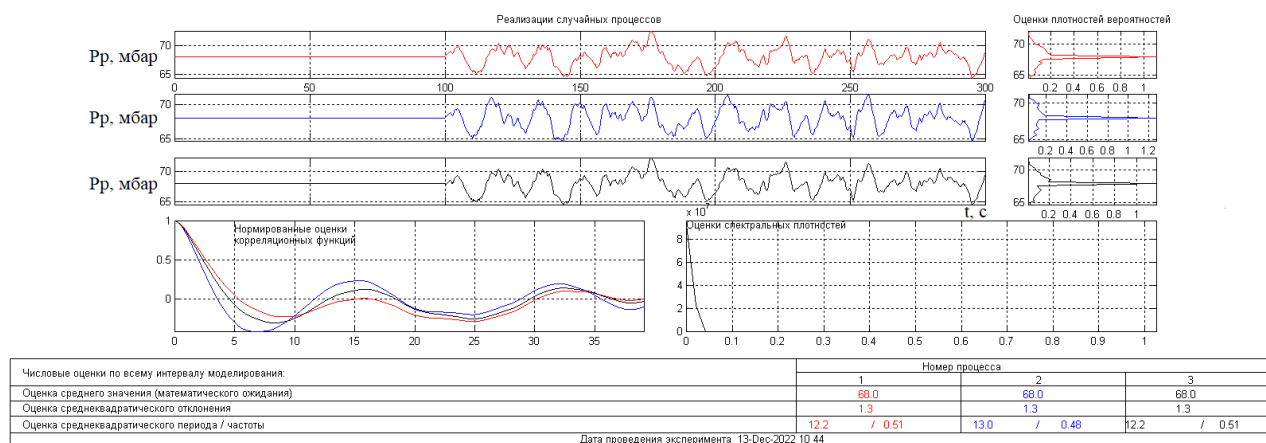


Рисунок 3.37 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

З рисунку 3.37 можна побачити, що за середньо квадратичним відхиленням САК з традиційним ПД-регулятором, САК з нейронним регулятором і САК з нечітким регулятором функціонують практично ідентично. В кінцевому випадку показники функціонування різних САК за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.35.

З таблиці 3.4 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САК з нейронним регулятором незначно краще функціонує, ніж інші розглянуті САК.

Таблиця 3.4 – Показники якості регулювання різних САК

Критерій	САК		
	САК з традиційним ПД регулятором	САК з нечітким регулятором Мамдані	САК з нейронним регулятором
Час регулювання	22,2	19,7	19,7
Максимальне	1,6	1,1	1,2

динамічне відхилення			
Інтегральний показник	253,2	262,6	250,1
Середнє квадратичне відхилення	1,3	1,3	1,3

3.10 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.

Генерування коду у структурованому текстовому форматі з моделі Simulink для промислових систем керування можна автоматично отримати за допомогою Simulink PLC Coder. Для генерації коду використана програма Matlab версії 2022b. Розроблена програма 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: blok_neupo_per.scl
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem
"blok_neupo_per/Neupo_per"
*
* Model name           : blok_neupo_per
* Model version        : 1.4
* Model creator         : sergy
* Model last modified by : sergy
* Model last modified on  : Tue Dec 13 21:02:44 2022
* Model sample time     : 0.01s
* Subsystem name        : blok_neupo_per/Neupo_per
* Subsystem sample time : 0.01s
* Simulink PLC Coder version : 3.7 (R2022b) 13-May-2022
* ST code generated on   : Wed Dec 14 18:55:53 2022
*
* Target IDE selection   : Siemens SIMATIC Step 7
* Test Bench included    : No
```

```

*
*)
FUNCTION_BLOCK Neypo_per
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    Y: REAL;
    Y_k: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    u: REAL;
END_VAR
VAR
    b_DiscreteTransferFc: REAL;
    UnitDelay_DSTATE: REAL;
    rtb_Sum11: REAL;
    rtbZZ27: REAL;
    rtb_Product_b: REAL;
    DiscreteTransferFcnv: REAL;
    temp1: REAL;
    temp2: REAL;
    temp3: REAL;
    temp4: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:
        (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/Neypo_per' *)
        (* InitializeConditions for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer
Fcn' *)
        b_DiscreteTransferFc := 0.0;
        (* InitializeConditions for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay' *)
        UnitDelay_DSTATE := 0.0;
        (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/Neypo_per' *)
    1:
        (* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Neypo_per' *)
        (* Sum: '<S1>/Sum19' *)
        rtb_Sum11 := Y - Y_k;
        (* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' incorporates:
        * Gain: '<S1>/o_ЯНЯР27' *)
        DiscreteTransferFcnv := ((-2.86 * rtb_Sum11) - b_DiscreteTransferFc) /
0.940000000000000006;
        (* Sum: '<S16>/Sum' incorporates:
        * Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,;)"
        * Product: '<S16>/Product' *)
        rtb_Product_b := -0.044315 * rtb_Sum11;
        (* Product: '<S20>/Product' incorporates:

```

* Constant: '<S1>/TW{1,1}(2,:)' *
 rtbZZ27 := -0.045371 * rtb_Sum11;
 (* Sum: '<S1>/Sum11' incorporates:
 * Constant: '<S12>/one'
 * Constant: '<S12>/one1'
 * Constant: '<S13>/one'
 * Constant: '<S13>/one1'
 * Constant: '<S14>/one'
 * Constant: '<S14>/one1'
 * Constant: '<S1>/TW{1,1}(1,:)'4'
 * Constant: '<S1>/TW{1,1}(2,:)'4'
 * Constant: '<S1>/TW{2,1}(1,:)'4'
 * Constant: '<S1>/TW{2,1}(1,:)'4'
 * Constant: '<S1>/b{1}'4'
 * Constant: '<S1>/b{1}'4'
 * Constant: '<S1>/b{2}'4'
 * Gain: '<S12>/Gain'
 * Gain: '<S12>/Gain1'
 * Gain: '<S13>/Gain'
 * Gain: '<S13>/Gain1'
 * Gain: '<S14>/Gain'
 * Gain: '<S14>/Gain1'
 * Gain: '<S1>/o_ЯНЯP18'
 * Math: '<S12>/Math Function'
 * Math: '<S12>/Math Function1'
 * Math: '<S13>/Math Function'
 * Math: '<S13>/Math Function1'
 * Math: '<S14>/Math Function'
 * Math: '<S14>/Math Function1'
 * Product: '<S17>/Product'
 * Product: '<S18>/Product'
 * Product: '<S19>/Product'
 * Product: '<S21>/Product'
 * Sum: '<S12>/Sum'
 * Sum: '<S12>/Sum1'
 * Sum: '<S13>/Sum'
 * Sum: '<S13>/Sum1'
 * Sum: '<S14>/Sum'
 * Sum: '<S14>/Sum1'
 * Sum: '<S1>/netsum12'
 * Sum: '<S1>/netsum13'
 * Sum: '<S1>/netsum14'
 * UnitDelay: '<S1>/Unit Delay'
 *
 * About '<S12>/Math Function':

```

* Operator: exp
*
* About '<S12>/Math Function1':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S13>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S13>/Math Function1':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S14>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S14>/Math Function1':
* Operator: reciprocal *)
temp1 := EXP(((0.00012562 * rtb_Sum11) + 0.098992717555475451) * -
2.0);
temp2 := EXP(((0.00091057 * rtb_Sum11) + 0.060084226290747916) * -
2.0);
rtb_Sum11 := (((1.0 / (EXP(((((((1.0 / (temp1 + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * -
6.6448671163820876) + 0.64248596994131346)
+ (((1.0 / (temp2 + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 0.21992639247675425)) * -2.0)
+ 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 10.0) + UnitDelay_DSTATE;
(* Saturate: '<S1>/Saturation9' *)
IF rtb_Sum11 > 100.0 THEN
    rtb_Sum11 := 100.0;
ELSIF rtb_Sum11 < 0.0 THEN
    rtb_Sum11 := 0.0;
END_IF;
(* End of Saturate: '<S1>/Saturation9' *)

(* Sum: '<S1>/Sum12' incorporates:
* Constant: '<S10>/one'
* Constant: '<S10>/one1'
* Constant: '<S11>/one'
* Constant: '<S11>/one1'
* Constant: '<S15>/one'
* Constant: '<S15>/one1'
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)'
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)'
* Constant: '<S1>/b{1}'
* Constant: '<S1>/b{2}'
* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn'
* Gain: '<S10>/Gain'

```

* Gain: '<S10>/Gain1'
 * Gain: '<S11>/Gain'
 * Gain: '<S11>/Gain1'
 * Gain: '<S15>/Gain'
 * Gain: '<S15>/Gain1'
 * Gain: '<S15>/Gain2'
 * Gain: '<S1>/o_ЯНЯР17'
 * Math: '<S10>/Math Function'
 * Math: '<S10>/Math Function1'
 * Math: '<S11>/Math Function'
 * Math: '<S11>/Math Function1'
 * Math: '<S15>/Math Function'
 * Math: '<S15>/Math Function1'
 * Product: '<S22>/Product'
 * Product: '<S23>/Product'
 * Sum: '<S10>/Sum'
 * Sum: '<S10>/Sum1'
 * Sum: '<S11>/Sum'
 * Sum: '<S11>/Sum1'
 * Sum: '<S15>/Sum'
 * Sum: '<S15>/Sum1'
 * Sum: '<S1>/netsum'
 * Sum: '<S1>/netsum1'
 * Sum: '<S1>/netsum2'
 * Sum: '<S20>/Sum'
 *
 * About '<S10>/Math Function':
 * Operator: exp
 *
 * About '<S10>/Math Function1':
 * Operator: reciprocal
 *
 * About '<S11>/Math Function':
 * Operator: exp
 *
 * About '<S11>/Math Function1':
 * Operator: reciprocal
 *
 * About '<S15>/Math Function':
 * Operator: exp
 *
 * About '<S15>/Math Function1':
 * Operator: reciprocal *)
 temp3 := EXP((rtb_Product_b + 4.3416737590763654) * -2.0);
 temp4 := EXP((rtbZZ27 - 4.3416805890655654) * -2.0);

```

u := ((((((1.0 / (EXP(((((((1.0 / (temp3 + 1.0)) * 2.0) - 1.0) *
586.46534580158266) + 0.0080435885709579536) + (((1.0 / (temp4 + 1.0)
) * 2.0) - 1.0) * 586.473389401569))) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 3.0) *
100.0) + rtb_Sum11) + (4.7 * DiscreteTransferFcnv)
;
(* Saturate: '<S1>/Saturation8' *)
IF u > 100.0 THEN
  (* Outport: '<Root>/u' *)
  u := 100.0;
ELSIF u < 0.0 THEN
  (* Outport: '<Root>/u' *)
  u := 0.0;
END_IF;
(* End of Saturate: '<S1>/Saturation8' *)

(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' *)
b_DiscreteTransferFc := DiscreteTransferFcnv;
(* Update for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay' *)
UnitDelay_DSTATE := rtb_Sum11;
(* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Neypo_per' *)
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.

3.11 Висновки з розділом

В процесі виконання розділу розроблено 2 моделі САК з нечітким регулятором. Нечіткі регулятори розроблені у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Визначено функції приналежності до нечітких множин, сформовано бази правил функціонування регуляторів у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначено алгоритми нечіткого виводу – Сугено 0-порядку та Мамдані.

Встановлено, що за якістю регулювання такі САК функціонують приблизно однаково, а можливо трохи краще, ніж САК з традиційним ПД-

регулятором при об'єкті керування з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої реалізації параметричної оптимізації САК за характеристиками нечіткого регулятора виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може, виконувати роль нейрорегулятора. Тренування штучної нейронної мережі виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink. Розроблена модель САК з регулятором, що представляється штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САК з нейрорегулятором проведена при тих же умовах, що і САК з традиційним ПІД-регулятором.

У результаті моделювання різних САК було встановлено, що за якістю регулювання САК з нейрорегулятором функціонує незначно краще, ніж інші САК, це за інтегральним показником якості регулювання відповідно 250,1 у САК з нейрорегулятором і 253,2 у САК з традиційним ПІД-регулятором. Середнє квадратичне відхилення регульованої зміни від заданого значення, при випадкових впливах, що збурюють, практично однаково як у САК з традиційним ПІД-регулятором 1,3, так і у САК з нейрорегулятором 1,3.

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

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

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА САК ПРОЦЕСОМ ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЇ ВИНА В ПОТОЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСУ, ЩО РЕАЛІЗУЄ ФУНКЦІЮ МАКСИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРИ ГАРАНТУВАННІ ДОТРИМАННЯ ОБМЕЖЕНЬ ПО ТЕМПЕРАТУРІ

4.1. Обґрунтування актуальності додаткової функції гарантування дотримання обмежень температури ДВ на виході випарника САК процесом деалкоголізації вина в потоці для підвищення продуктивності.

Найчастіше на змінні об'єкта керування (ОК) регламентами накладаються обмеження, порушення яких може мати дуже несприятливі наслідки. Вони можуть призводити до аварійних зупинок обладнання, втрат сировини та енергоносіїв, зниження якості продукції, необхідність мати великий штаб персоналу та ремонтних служб. Для процесу деалкоголізації вина в потоці є температури ДВ на виході випарника $T_{дв}$.

В даному випадку на температуру ДВ на виході випарника регламентом накладається обмеження $28,5^{\circ}\text{C}$. Таке значення зумовлено тим, що температура кипіння спирту з виноматеріалу при тиску 90 мбар складає $27,7^{\circ}\text{C}$, але через можливі коливання тиску на виході випарника температура кипіння може збільшуватися до $28,5^{\circ}\text{C}$. Для гарантування повного википання спирту необхідно підтримувати перегрів деалкоголізованого виноматеріалу вище температури кипіння спирту. При цьому слід зауважити, що зі збільшенням температури перегріву зменшується зона кипіння алкоголю, що означає зменшення продуктивності установки та надлишкове збільшення енергетичних витрат на перегрів. Також надлишковий перегрів може призводити до втрати якостей готового продукту. Тобто підтримання температури ДВ на виході випарника якомога ближче до $28,5^{\circ}\text{C}$ підвищує продуктивність, енергоефективність та якості готового продукту.

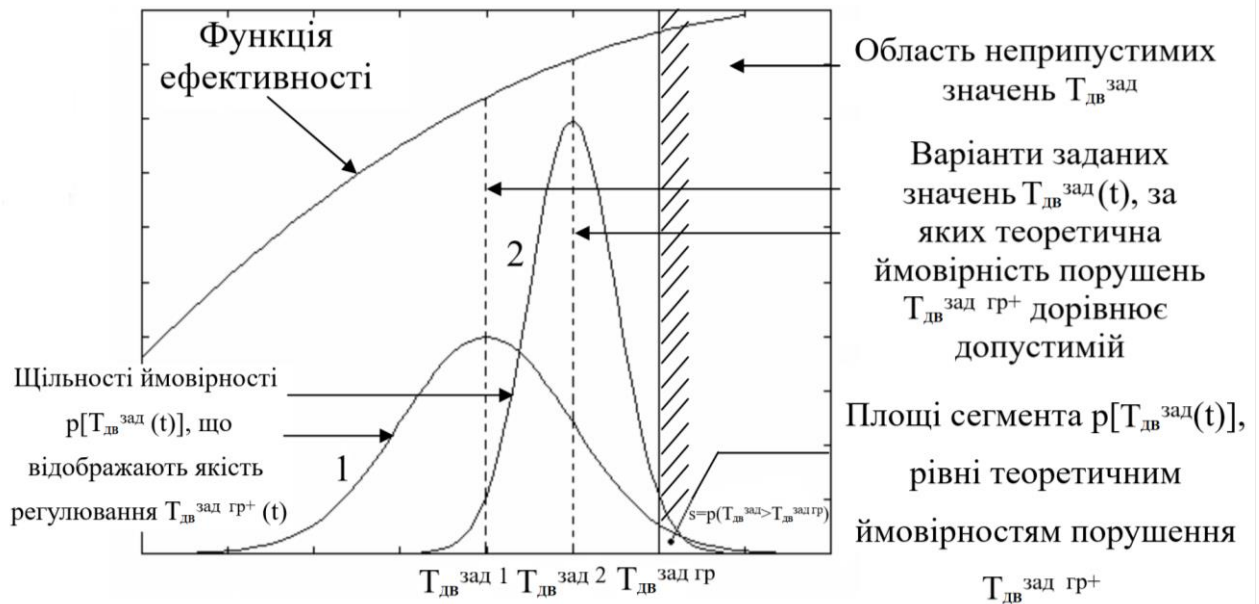


Рис. 4.1 – Функція ефективності процесу dealкоголізації вина в потоці

Оскільки ОК є суттєво нелінійним, має запізнення в каналах керування, схильний до впливу різного типу збурень задане температури ДВ на виході випарника для САР базової структури необхідно встановлювати на рівні, суттєво віддаленому від нижньої межі $28,5^{\circ}\text{C}$. Недоліком даної системи є низька ефективність роботи ОК при цьому гарантувати невихід за межу не можливо. В свою чергу впровадження системи гарантуючого керування (СГК) дозволить одночасно з функціями регулювання реалізувати функцію гарантованого дотримання встановлених обмежень з наперед заданою ймовірністю і працювати з максимально можливою продуктивністю.

4.2. Вибір і опис принципу реалізації функції гарантування дотримання обмежень температури ДВ на виході випарника.

Концепція побудови таких систем полягає у безперервному оцінюванні (на ковзному 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 (МПР).

Оцінювати (прямо чи опосередковано) поточне значення ймовірності відсутності порушення $\hat{P}_{\bar{S}}(y^{rp\pm}, T, t)$, тобто відсутності події $S = \bar{S}$, можливо, якщо для процесу $y(t)$ і потоку подій $S(t)$ можуть бути прийняті наступні моделі (гіпотези):

регульована змінна $y(t)$ може розглядатися як випадковий процес і має дві адитивні складові:

$$y(t) = m_y(t) + \tilde{y}^0(t), \quad (4.1)$$

де $m_y(t)$ – математичне очікування $y(t)$;

\tilde{y}^0 - центрований випадковий процес, що володіє властивостями диференційності, нормальності та квазістаціонарності на $T \gg T_{кст}$;

$T_{кст}$ - мінімальний інтервал часу, де виконується умова квазістаціонарності $\tilde{y}^0(t)$.

потік подій $S(t)$ є пуассонівським, тобто ймовірність події \bar{S} (відсутності S) визначається з виразу:

$$P_{\bar{S}}(y^{rp\pm}, T) = \exp\{-n_S(y^{rp\pm})T\} = \exp\{N_S(y^{rp\pm}, T)\}, \quad (4.2)$$

де $n_S(y^{rp\pm})$ – середня частота (інтенсивність) порушень у обмежень $y^{rp\pm}$ на T ;

$N_S(y^{rp\pm}, T)$ – загальна кількість подій S на T .

Гіпотеза (4.1) є "класичною" для завдань керування і, як показує практика, добре виконується для великої кількості, якщо не більшості об'єктів. Вона дає можливість використовувати як математичну основу МПР (модель порушення регламенту) теорію викидів випадкових процесів. Гіпотеза (4.2) застосовна, якщо події S є незалежними (рідкісними), тобто, середній період їх появи значно більший за інтервал кореляції $y(t)$. Ця умова априорі виконується, оскільки тільки для рідкісних S має сенс функціонування об'єкта керування.

Розглянемо варіанти МПР, найбільш актуальні для завдань, що ми розглядаємо. Вони представлені у формі виразів для розрахунку поточних значень оцінок середньої інтенсивності подій S , тобто $\hat{n}_S(y^{rp\pm}, T)$. Вихідною інформацією цих розрахунків є результати оцінювання імовірнісних характеристик процесу $y(t)$ і значення $y^{rp\pm}$. Вигляд МПР залежить від прийнятої

моделі зміни $y(t)$ і, конкретно, від виду прийнятої моделі зміни $m_y(t)$:

а) $m_y(t)$ квазістаціонарна (практично постійна) на $T_{кст}$ функція часу, тобто $m_y(t) = m_y = const \forall t \in T_{кст}$ –

$$\hat{n}^{\pm}(y^{rp\pm}, t) = \exp \left\{ -\frac{\hat{\sigma}_y}{2\pi\hat{\sigma}_y} \exp \left\{ -\frac{y^{rp\pm} - \hat{m}_y}{2\hat{\sigma}_y^2} \right\} \right\}; \quad (4.3)$$

б) $m_y(t)$ є сумою постійної та гармонійної (з випадковою початковою фазою) функцій часу квазістаціонарних на $T_{кст}$, тобто $m_y(t) = m_y + A_y(\sin \omega_y t + \varphi_y)$,

$$\varphi_y \in \{-\pi; \pi\} -$$

$$\hat{n}^{\pm}(y^{rp\pm}, t) = \frac{\hat{\sigma}_y \hat{\omega}_y}{2\pi\hat{\sigma}_y} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi' \left(\frac{y^{rp\pm} - \hat{m}_y - \hat{A}_y \cos \psi_y}{\hat{\sigma}_y} \right) \times \\ \times \left\{ \Phi' \left(\frac{\hat{\omega}_y \hat{A}_y}{\hat{\sigma}_y} \sin(\hat{\omega}_y t + \hat{\varphi}_y) + \frac{\hat{\omega}_y \hat{A}_y}{\hat{\sigma}_y} \sin \psi_y \right) \Phi \left(\frac{\hat{\omega}_y \hat{A}_y}{\hat{\sigma}_y} \sin \psi_y \right) \right\} d\psi_y; \quad (4.4)$$

в) $m_y(t)$ є априорі невідомою функцією часу –

$$\hat{n}_s^{\pm}(y^{rp\pm}, t) = \frac{\hat{\sigma}_y}{2\pi\hat{\sigma}_y} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \text{sign} \Delta y^{\pm} \left[\frac{y^{rp\pm} - \hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \right]^2 \right\} \times \\ \times \left\{ \exp \left(-\frac{\hat{m}_y(t)}{2\hat{\sigma}_y} \right) \mp \sqrt{2\pi} \frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y(t)} \Phi \left(\mp \frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \right) \right\}, \quad (4.5)$$

де $\Phi(\dots) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp \left\{ -\frac{1}{2} z^2 \right\} dz$, $\Phi'(\dots) = \frac{1}{2\pi} \exp \left\{ -\frac{1}{2} z^2 \right\}$ – інтеграл

ймовірності та його похідна;

$\hat{m}_y, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_y, \hat{A}_y, \hat{\omega}_y$ – оцінки відповідних характеристик випадкових процесів, що обчислюються на ковзному інтервалі часу $T_{кст}$;

$\hat{m}_y(t), \hat{m}_y(t)$ – оцінки математичного очікування, що змінюється, і його першої похідної, що обчислюються на ковзному інтервалі часу $T_m \ll T_{кст}$.

Оцінки характеристик випадкових процесів, що обчислюються в реальному часі на ковзних інтервалах, визначаються усередненням на $T_{кст}$ (або на $T_m \ll T_{кст}$ для $m(t)$). При усередненні з рівномірним зважуванням реалізуються такі вирази:

$$\hat{m}_y = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} y(t) dt, \quad \hat{m}_y = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \dot{y}(t) dt, \quad \hat{m}_y(t) = \frac{1}{T_m} \int_t^{t+T_m} y(t) dt,$$

$$\begin{aligned}\hat{m}_{\dot{y}} &= \frac{1}{T_m} \int_t^{t+T_m} \dot{y}(t) dt; \\ \hat{\sigma}_y &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (y(t) - \hat{m}_y)^2 dt, \quad \hat{\sigma}_{\dot{y}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (\dot{y}(t) - \hat{m}_{\dot{y}})^2 dt, \\ \hat{\mu}_y^4 &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (y(t) - \hat{m}_y)^4 dt, \quad \hat{\mu}_{\dot{y}}^4 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (\dot{y}(t) - \hat{m}_{\dot{y}})^4 dt.\end{aligned}\quad (4.6)$$

Для розрахунків (3.4) необхідні оцінки можуть бути обчислені з наступних співвідношень:

$$\hat{\sigma}_{y_1}^2 = \hat{\sigma}_y^2 - \sqrt{2 \left(\hat{\sigma}_y^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y^4 \right)} = \hat{\sigma}_y^2 - \frac{\hat{A}_y^2}{2}, \quad \hat{\sigma}_{\dot{y}_1}^2 = \hat{\sigma}_{\dot{y}}^2 - \sqrt{2 \left(\hat{\sigma}_{\dot{y}}^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_{\dot{y}}^4 \right)} = \hat{\sigma}_{\dot{y}}^2 - \frac{\hat{A}_{\dot{y}}^2}{2},$$

$$\hat{A}_y = \sqrt{2} \sqrt{2 \left(\hat{\sigma}_y^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y^4 \right)}; \quad \hat{A}_{\dot{y}} = \sqrt{2} \sqrt{2 \left(\hat{\sigma}_{\dot{y}}^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_{\dot{y}}^4 \right)}; \quad \hat{\omega}_y = \hat{A}_y / \hat{A}_{\dot{y}}, \quad (4.7)$$

де $y_1(t) = y(t) - \hat{A}_y \sin(\omega_y t + \varphi_y)$, $\dot{y}_1(t) = d_{y_1}/dt$;

$\hat{\mu}_y^4, \hat{\mu}_{\dot{y}}^4$ – оцінки четвертих центральних моментів $y_C(t)$ на інтервалі $T_{\text{кст}}$.

Зазначимо, що це оцінки, одержувані по (4.6) і (4.7), є безперервними функціями часу, причому $\hat{m}_y(t)$ найбільш високочастотна їх.

Ефект прогнозування зміни $y(t)$ при зміні $y^{3\text{ДД}+}$ і поліпшення динаміки зовнішнього контуру можна отримати використовуючи в модулі оцінки імовірнісних характеристик замість змінної $y(t)$ змінну $\Delta y(t)$. На рисунку цей зв'язок показано пунктирною лінією.

Поліпшення динаміки СГУ можна очікувати також за рахунок визначення $y^{3\text{ДД}+}$ у не в замкнутому контурі, а безпосереднім розрахунком. Оскільки змінна $y(t)$ змінюється на околиці $y^{3\text{Д}}$, то $m_y \approx y^{3\text{Д}} = y^{3\text{ДД}}$. Замінивши змінні у виразах (4.3), (4.4), (4.5) і дозволивши їх щодо $y^{3\text{ДД}}$ (для (4.4) – використовуючи апроксимацію), отримаємо відповідно:

$$\text{а) } y^{3\text{ДД}\pm}(t) = y^{\text{гр}\pm} \mp \hat{\sigma}_y \left| \sqrt{2 \left| \ln \left(T \hat{\sigma}_{\dot{y}} / 2\pi \hat{\sigma}_y \ln \left(\frac{1}{P_S^{\Gamma}(y^{\text{гр}\pm}, T)} \right) \right) \right|} \right|; \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned}
 \text{б) } y^{3\text{ДД}\pm}(t) = & y^{\text{гр}\pm} \mp \hat{\sigma}_{y1} \left| \sqrt{2 \left| \ln \left(T \hat{\sigma}_{y1} / 2\pi \hat{\sigma}_{y1} \ln \left(\frac{1}{P_S^{\Gamma}(y^{\text{гр}\pm}, T)} \right) \right) \right|} \right| + \\
 & + \left(C_0 - C_1 \frac{\hat{A}_y}{\hat{\sigma}_{y1}} - C_2 \frac{\hat{\omega}_S \hat{\sigma}_y}{\hat{\sigma}_{y1}} + C_3 \frac{2\pi}{\hat{\omega}_y T} \ln \left(\frac{1}{P_S^{\Gamma}(y^{\text{гр}\pm}, T)} \right) \right), \quad (4.9)
 \end{aligned}$$

де C_0, C_1, C_2, C_3 – константи, що визначаються в результаті вирішення задачі

апроксимації (3.4);

$$y^{3\text{ДД}\pm}(t) = y^{\text{гр}\pm} \mp$$

$$\hat{\sigma}_y \left| \sqrt{2 \ln \left| \frac{T \hat{\sigma}_y}{2\pi \hat{\sigma}_y \ln P_S^{\Gamma}(y^{\text{гр}\pm}, T)} \exp \left\{ -\frac{\hat{m}_y^2(y)}{2\hat{\sigma}_y^2} \mp \frac{\sqrt{2\pi} \hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \Phi \left(\frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \right) \right\} \right|} \right|, \quad (4.10)$$

Структурна схема SGK з розрахунком поточного значення $y^{3\text{ДД}+}$ за (4.8) ... (4.10) наведена на рис. 4.2.

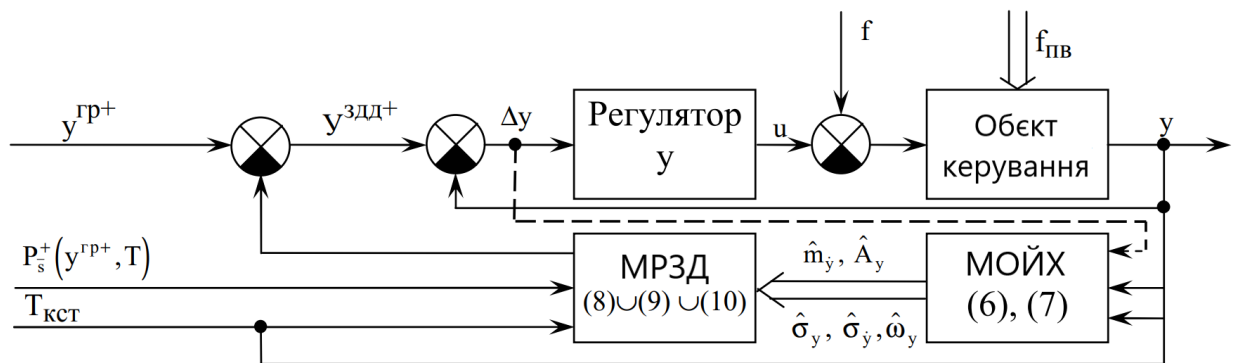


Рис. 4.2. Структурна схема SGK з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту (MRЗД – модуль розрахунку допустимого заданого значення)

4.3. Розробка структурної схеми САК гарантування дотримання обмежень температури ДВ на виході випарника.

Як зазначалося раніше, актуальність SGK для процесу dealкоголізації вина в потоці проявляється тоді, коли поставлено задачу максимальної продуктивності та енергоефективності при гарантованому унеможливленню виходу за температурні режими та створенні аварійної ситуації. Задача максимізації продуктивності та енергоефективності вимагає реалізації таких

температурних режимів роботи ОК, коли фактичне значення температури ДВ на виході випарника $T_{дв}$ наближається до нижнього гранично-допустимого $T_{дв}^{гр}$.

На рисунку 4.3 наведено структурну схему СГК, яка забезпечує максимальне наближення фактичного значення регламентної змінної $T_{дв}$ до її нижнього гранично-допустимого значення $T_{дв}^{гр}$. В розробленій системі використана квазістаціонарна (майже постійна) модель зміни математичного очікування $m_y(t)$ на $T_{кст}$ (мінімальний інтервал часу, де виконується умова квазістаціонарності) функції часу та принцип побудови СГК з розрахунком допустимого заданого значення температури $T_{дв}^{гр}$ безпосередньо за моделлю порушення регламенту з використанням виразу 4.8. При реалізації алгоритму гарантування використовувались такі налаштування: гарантована вірогідність дотримання обмежень $P_s^r = 0,95$ на інтервалі часу $T = 300$ сек., інтервал квазістаціонарності $T_{кст} = 90$ сек.

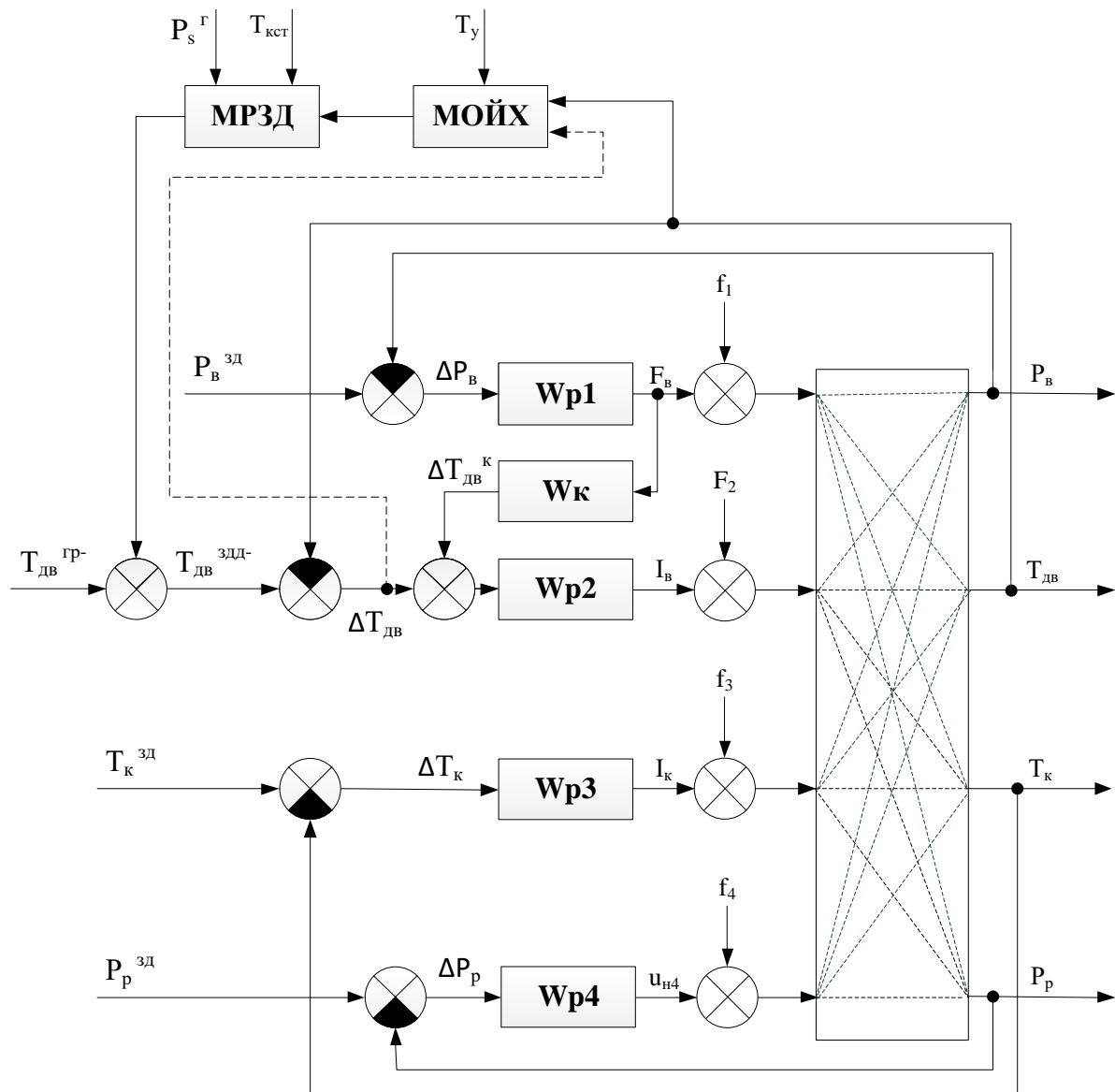


Рисунок 4.3 - Структурна схема СГК, яка забезпечує максимальне наближення фактичного значення регламентної змінної $T_{ДВ}$ до її нижнього гранично-допустимого значення $T_{ДВ}^{гр-}$

4.4. Розробка схеми імітаційного моделювання САК і плану комп'ютерних експериментів по дослідженню її ефективності, представлення та аналіз результатів моделювання.

Схема моделювання СГК процесом деалкоголізації вина в потоці представлена на рисунку 4.4. Вміст блоків розрахунку заданого значення (БРГЗД) та статистичних оцінок (БРСО) зображено на рисунках 4.5 та 4.6 відповідно.

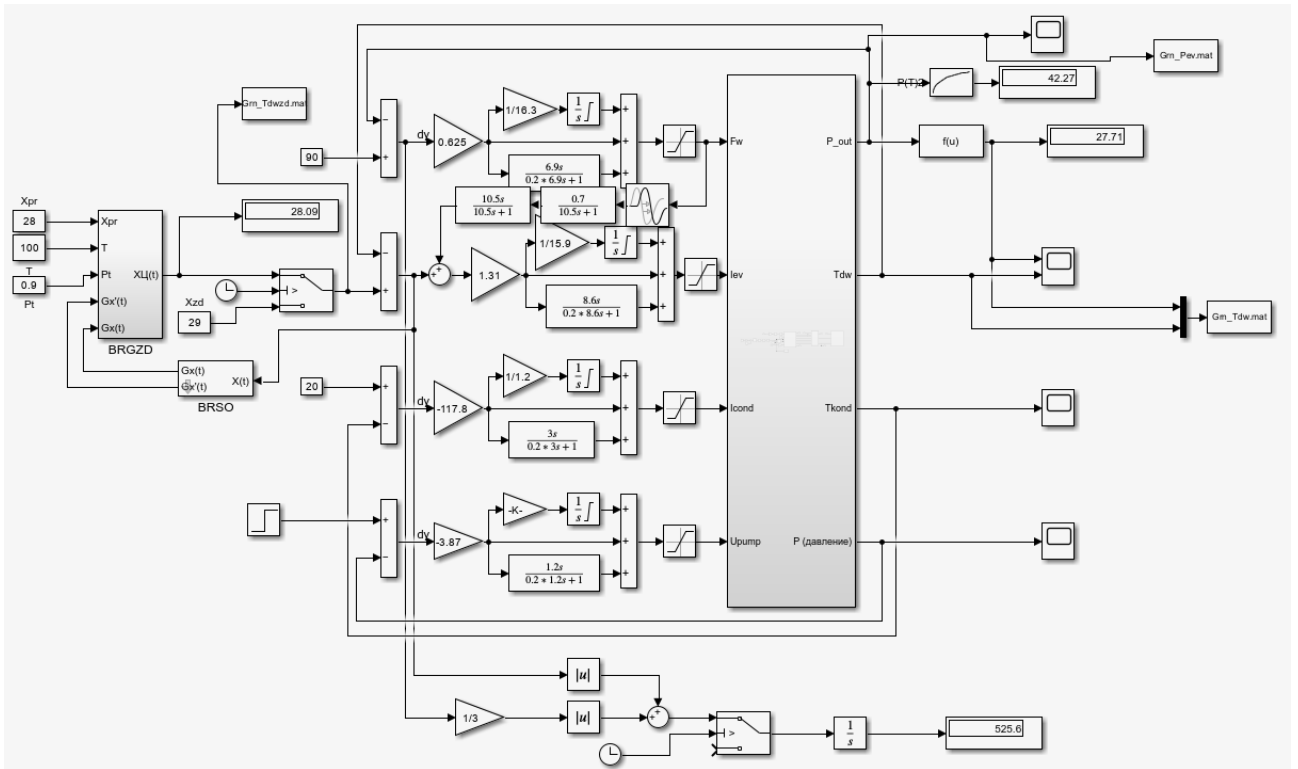


Рисунок 4.4 – Схема моделювання СГК, яка забезпечує максимальне наближення фактичного значення регламентної змінної $T_{дв}$ до її верхнього гранично-допустимого значення $T_{дв}^{гр}$ в середовищі Matlab Simulink

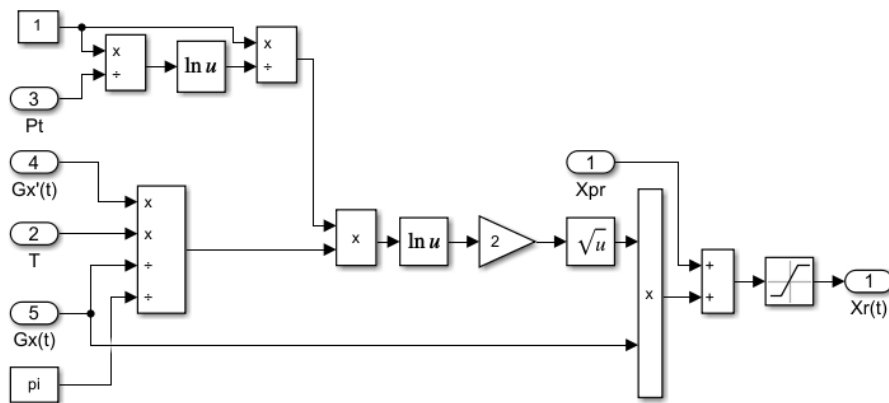


Рисунок 4.5 - Вміст БРГЗД

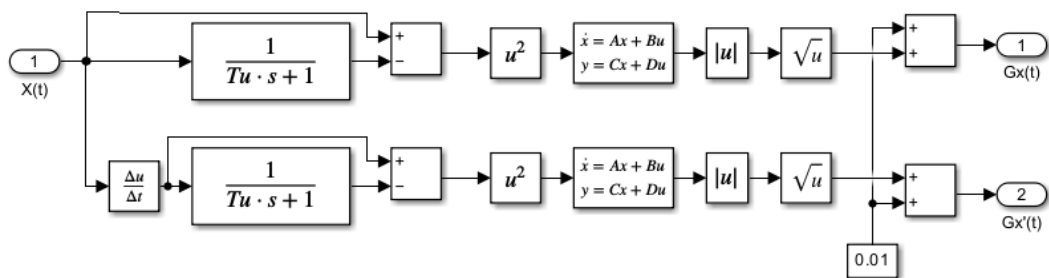


Рисунок 4.6 - Вміст БРСО

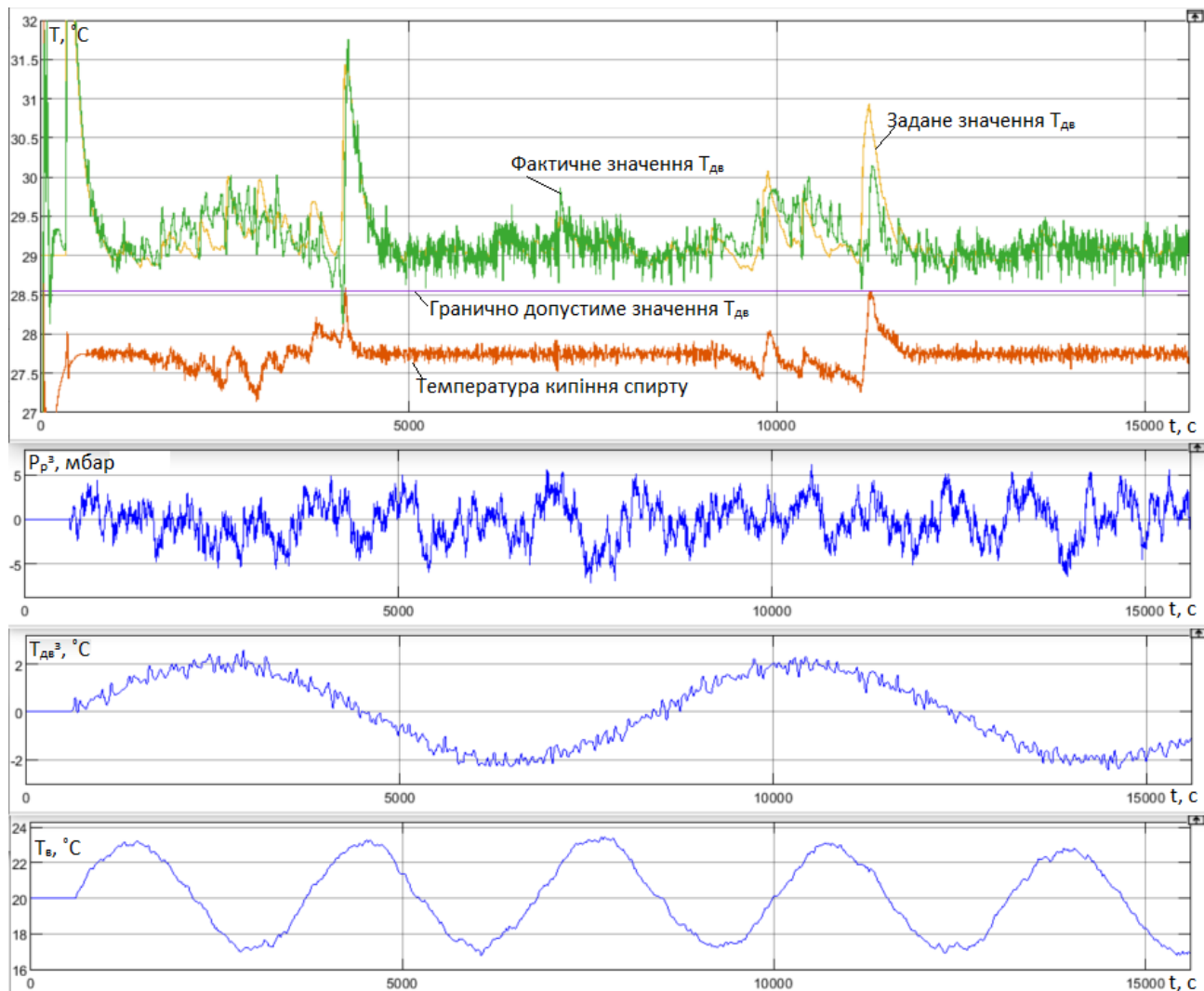


Рисунок 4.7 – Результати моделювання СГК процесом деалкоголізації вина в потоці

Для порівняння роботи різних систем були проведені експерименти з отримання основних показників продуктивності та енергоефективності САР базової структури, ПДТ та СГК процесом каталітичної очистки інертних газів в сталих режимах протягом 25 годин, схема моделювання наведена на рисунку 4.9, результати наведені в таблиці 4.1 та на рисунку 4.10.

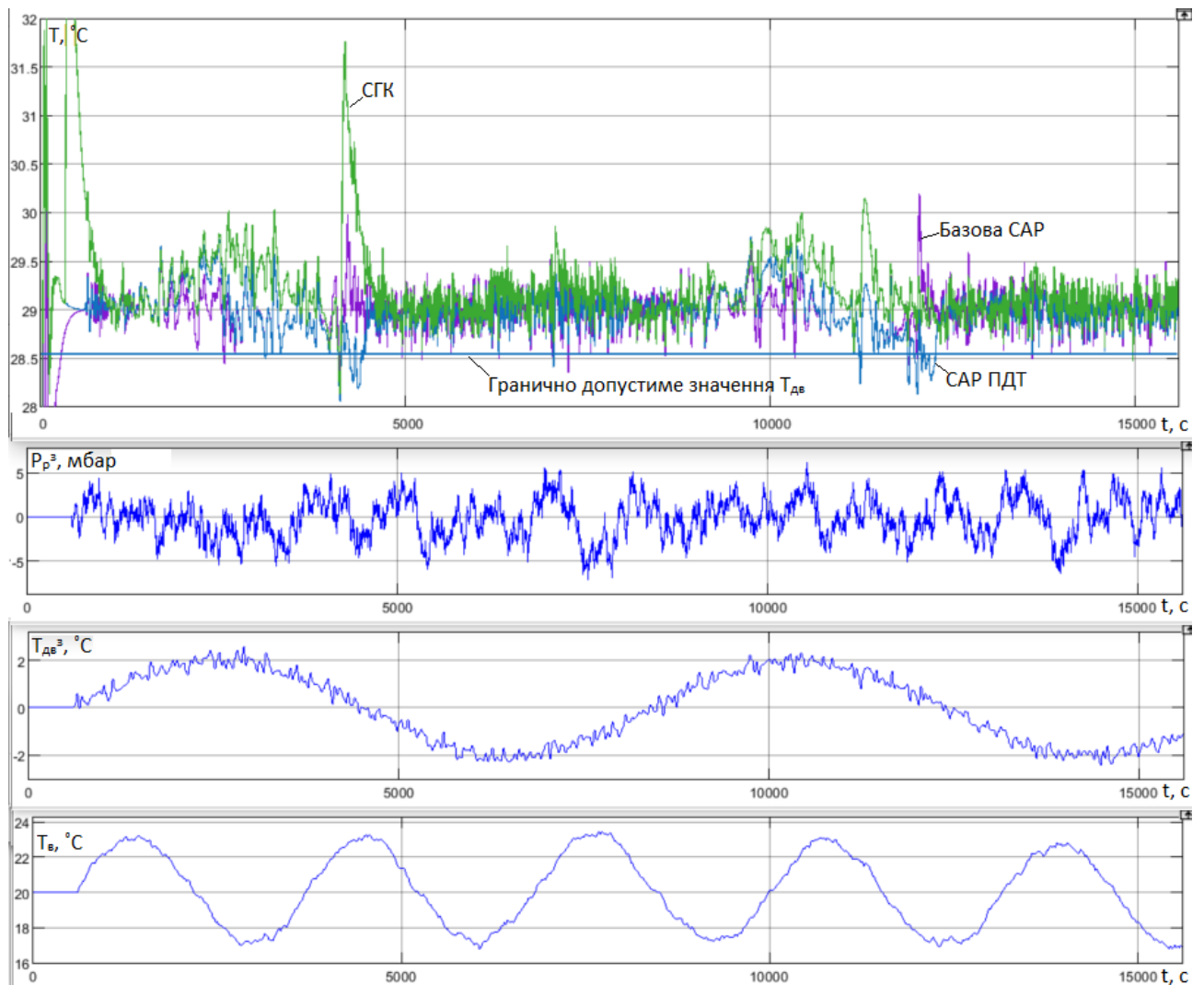


Рисунок 4.10 - Порівняльний аналіз САР базової структури, ПДТ та СГК процесом деалкоголізації вина в потоці

Таблиця 4.1 Порівняння продуктивності та енергоефективності різних систем

САК	Витрата виноматеріалу, л	Продуктивність, л/год	Енергоспоживання, Вт	Питоме енергоспоживання, Вт/год	Питоме енергоспоживання, Вт/л	Дистиллят алког. олю, кг	Залишок спирту, кг	Залишок води, кг	Концентрація спирту в ДВ, %об.	Концентрація спирту в ДВ, %об.
Базова САР	77,8	18,672	671,6	161,18	8,63	8,832	0,395	66,552	0,74	0,59
САР ПДТ	77,5	18,6	679,7	163,13	8,77	8,870	0,321	66,368	0,61	0,48
СГК	74,23	17,8152	700,1	168,02	9,43	8,645	0,159	63,716	0,31	0,25

4.5. Висновки за розділом.

Найчастіше на змінні об'єкта керування регламентами накладаються обмеження, порушення яких може мати дуже несприятливі наслідки. Вони можуть призводити до аварійних зупинок обладнання, втрат сировини та енергоносіїв, зниження якості продукції, необхідність мати великий штаб персоналу та ремонтних служб. Ситуація посилюється, якщо найбільш ефективні режими роботи ОК близькі до гранично-допустимих, ОК є суттєво нестационарним, схильний до інтенсивних неконтрольованих збурень, має запізнення в каналах управління, а наслідки порушень тяжкі.

Для процесу деалкоголізації вина в потоці функція ефективності знаходиться за межами регламенту і задача підвищення продуктивності та ефективності вимагає від нас наближення до верхнього обмеження без його порушення. Для реалізації функції максимізації продуктивності та енергоефективності роботи ОК з гарантованою відсутністю викидів за нижню межу було розроблено SGK з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту. Після порівняльного аналізу роботи САК базової структури, САК ПДТ та САК SGK можна зробити наступні висновки:

Хоч серед трьох запропонованих систем SGK є найменш енергоефективною і продуктивною, вона дозволяє досягти найбільш глибокої деалкоголізації виноматеріалу.

РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.

5.1 Розробка програмно-технічної структури

Промислові програмовані логічні контролери ПЛК стали невід'ємною частиною сучасних систем керування. Хоча кількість та різноманіття поставлених перед ними задач тільки зростають, більшість ПЛК мають закрити та жорстку архітектуру і, у зв'язку з цим, відносно обмежений функціонал. Ціна та специфічні особливості експлуатації таких ПЛК ускладнюють їх використання для домашньої автоматизації та у навчальних цілях. Розділ присвячений розробці вбудованої мікропроцесорної системи керування процесом деалкоголізації вина в потоці на базі одно-платного комп'ютера BeagleBone Black, який матиме відкриту архітектуру, потужним виконавчим середовищем, підтримуватиме більшість сучасних протоколів зв'язку, матиме широкий функціонал і при цьому низьку ціну.

5.1.1 Технічна структура

Для реалізації алгоритмів керування контролер повинен мати:

- аналогові входи для вимірювання температур термоопорами тиску (2),
- UART інтерфейс для взаємодії з блоком живлення ТЕП (2),
- ШІМ вихід для керування насосами (2).

Виходячи з сформованої таблиці та складності алгоритмів керування, для реалізації системи керування було використано одно-платний комп'ютер BeagleBone Black, датчики тиску з SPI інтерфейсом зв'язку XGZP6858D00200KPA та спеціалізовані АЦП для роботи з термоопорами ADC MAX31865. Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом каталітичної очистки інертних газів, що включає АРМ оператора, представлена на рисунку 5.1.

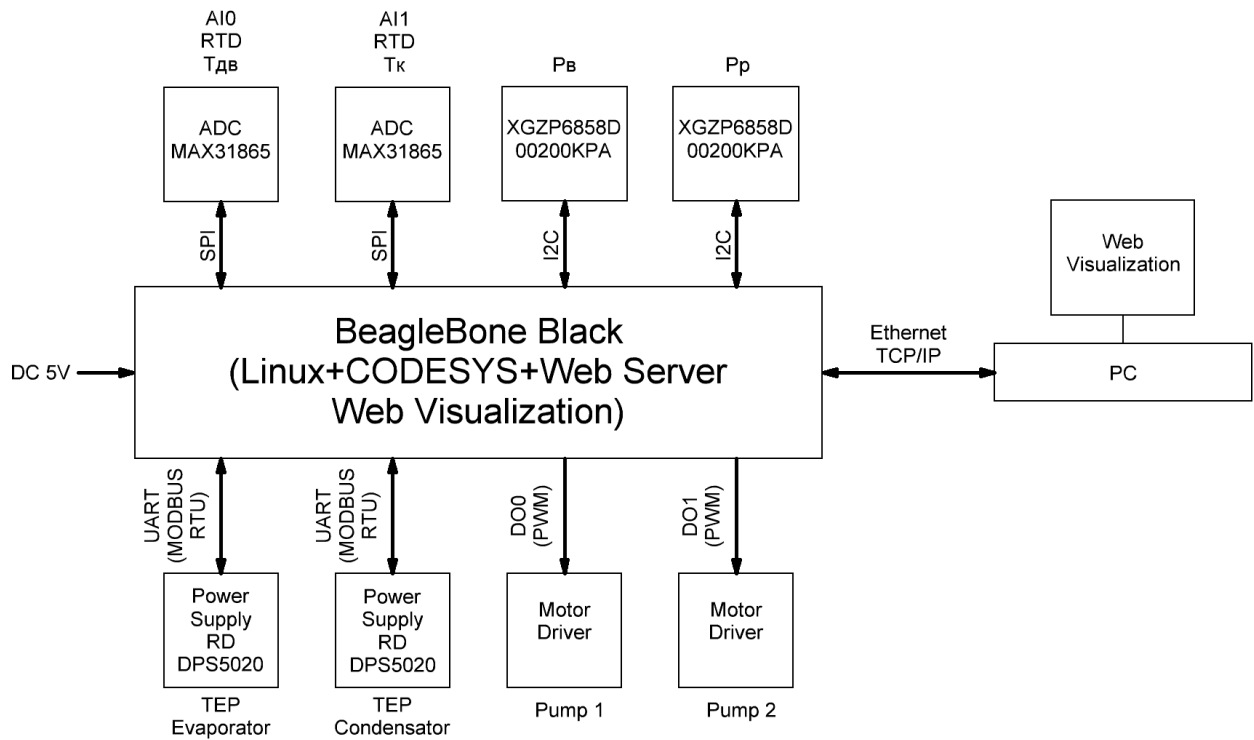


Рис. 5.1 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом каталітичної очистки інертних газів

5.1.2 Реалізація ПЛК на базі BeagleBone Black

Для реалізації ПЛК, орієнтованого на використання у вбудованих системах керування, обрано одноплатний комп'ютер BeagleBone Black з операційною системою (ОС) Linux та виконавчого середовища CoDeSys V3.5.

Основні характеристики BeagleBone Black:

Графічний процесор	SGX530 3D, 20M Polygons/S
Частота процесора	1 ГГц, AM335x з процесором ARM Cortex-A8
Діапазон робочої напруги	5 В з 210-460 мА
Порти GPIO	69 контактів вводу/виводу (але можна використовувати й інші)
Локальна мережа	є
SD-карта	є

HDMI	є
Джерело живлення	DC Power Jack, mini USB Port
Роз'єми розширення	MCASP, SPI, I ² C, LCD, MMC, GPMC, UART, Power Button, XDMA Interrupt, CAN, EHRPWM, PWM, ADC, GPIO
Оперативна пам'ять (SRAM)	512 МБ (DDR3L – 800 МГц)
Налагодження	JTAG and Serial Header
FLASH (пам'ять програм)	4 ГБ, 8-розрядна версія eMMC
EEPROM	512 байтів

5.2 Розробка та налагодження прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування (СГК) процесом деалкоголізації вина в потоці.

5.2.1 Переслідувані цілі та основні положення.

Після розробки та тестування алгоритмів безперервного та логіко-програмного керування, спеціалістами з систем керування, під час програмування ПЛК спеціалістами-програмістами подекуди виникають різноманітні проблеми пов'язані з «людським» фактором, які призводять до неточної реалізації алгоритму в програмному коді. Одним з шляхів запобігання цих помилок є використання модельно-орієнтованого проектування (МОП) програмного забезпечення, що дозволяє розробляти та проводити імітаційне моделювання як усієї системи цілком, так і її компонентів. МОП включає в себе побудову моделі ОК, аналіз і побудова алгоритму керування, моделювання системи керування і як результат – реалізація системи на «реальному» ОК. А автоматична генерація програмного коду зменшує вірогідність появи більшості помилок пов'язаних із людським фактором та дозволяє суттєво скоротити час розробки та верифікації прикладного програмного забезпечення. Одним з інструментів модельно-орієнтованого проектування є пакет прикладних програм

MATLAB та його додаток для візуального програмування при моделюванні динамічних систем SIMULINK. Додаток Simulink PLC Coder дозволяє конвертувати отриманий алгоритм або його частини у програмний код у вигляді структурованого тексту для подальшого використання в різноманітних ПЛК.

Розроблене програмне забезпечення має реалізовувати алгоритм системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці в середовищі Simulink, що описує структурна схема на рисунку 4.3.

В основу цього алгоритму входять не тільки ті елементи, які можна знайти у стандартних бібліотеках середовища програмування CodeSys V3.5. Саме тому виникає необхідність у використанні можливості автоматичної генерації програмного коду.

5.2.2. Реалізація «цифрової» моделі СГК процесом каталітичної очистки інертних газів в середовищі Simulink, з використанням бібліотеки PLCLib пакета Simulink PLC Coder.

Після розробки та тестування «безперервної» моделі системи керування, першим кроком в до її конвертації у програмний код у вигляді структурованого тексту для подальшого використання в середовищі програмування CodeSys V3.5 є представлення цієї моделі в «дискретному» (цифровому) часі. Модель системи керування складається з різних модулів, які конвертуються окремо один від одного, а саме: ПД-регулятор (рисунок 5.2), коригуючий міжрегуляторний зв'язок (рисунок 5.3), блок розрахунку статистичних оцінок (рисунок 5.4) та блоку розрахунку гарантуючого заданого значення (5.5).

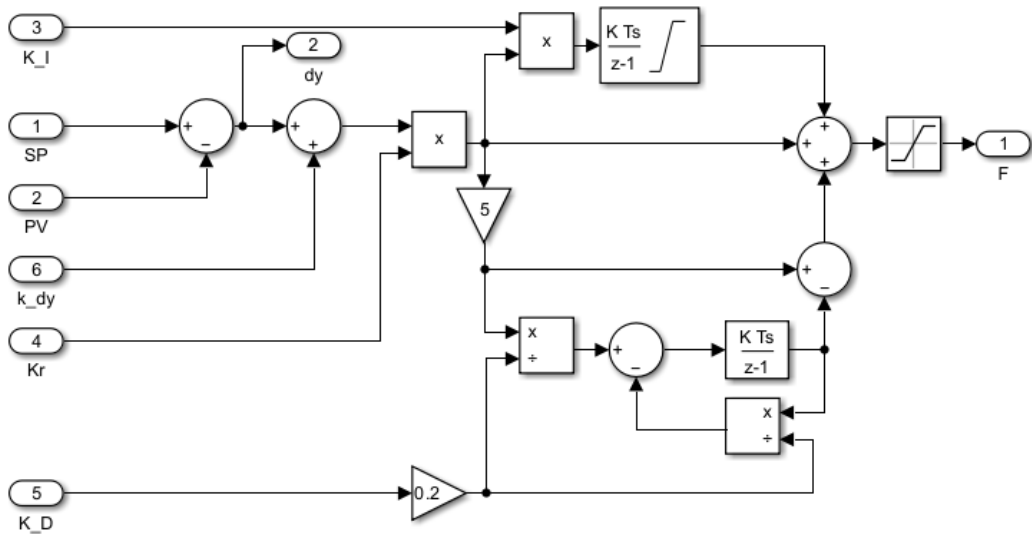


Рисунок 5.2 – Цифрова реалізація ПІД-регулятора в середовищі Simulink

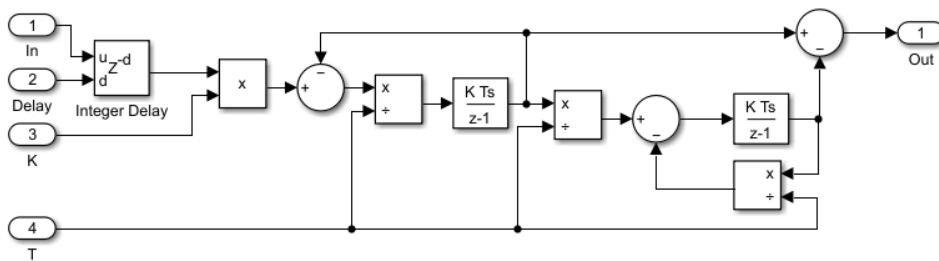


Рисунок 5.3 – Цифрова реалізація коригуючого міжрегуляторного зв'язку в середовищі Simulink

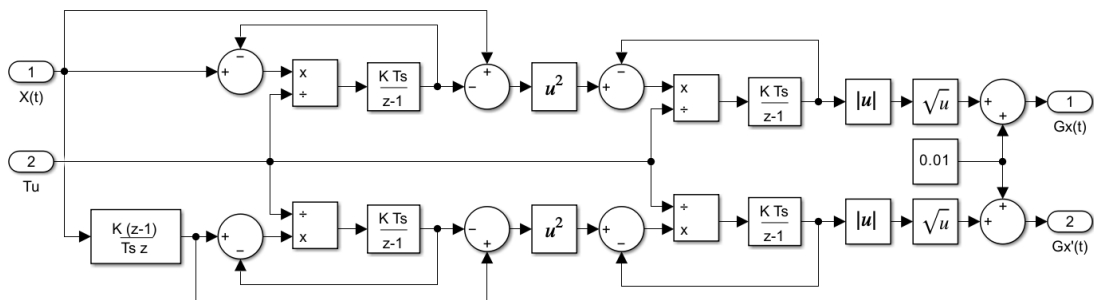


Рисунок 5.4 – Цифрова реалізація блоку розрахунку статистичних оцінок (БРСО) в середовищі Simulink

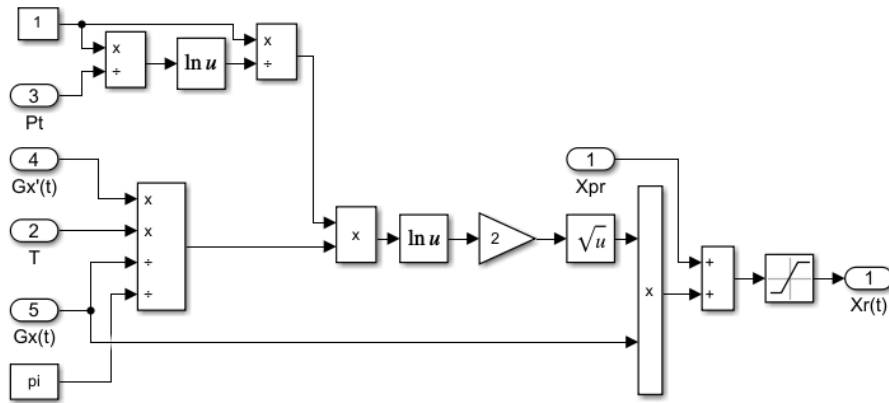


Рисунок 5.5 – Цифрова реалізація блоку розрахунку гарантованого заданого значення (БРГЗД) в середовищі Simulink

Схема для порівняння роботи цифрової та «безперервної» моделей системи гарантуючого керування процесом dealкоголізації вина в потоці в середовищі Simulink представлена на рисунку 5.6, результати порівняльного моделювання цих систем – на рисунку 5.7.

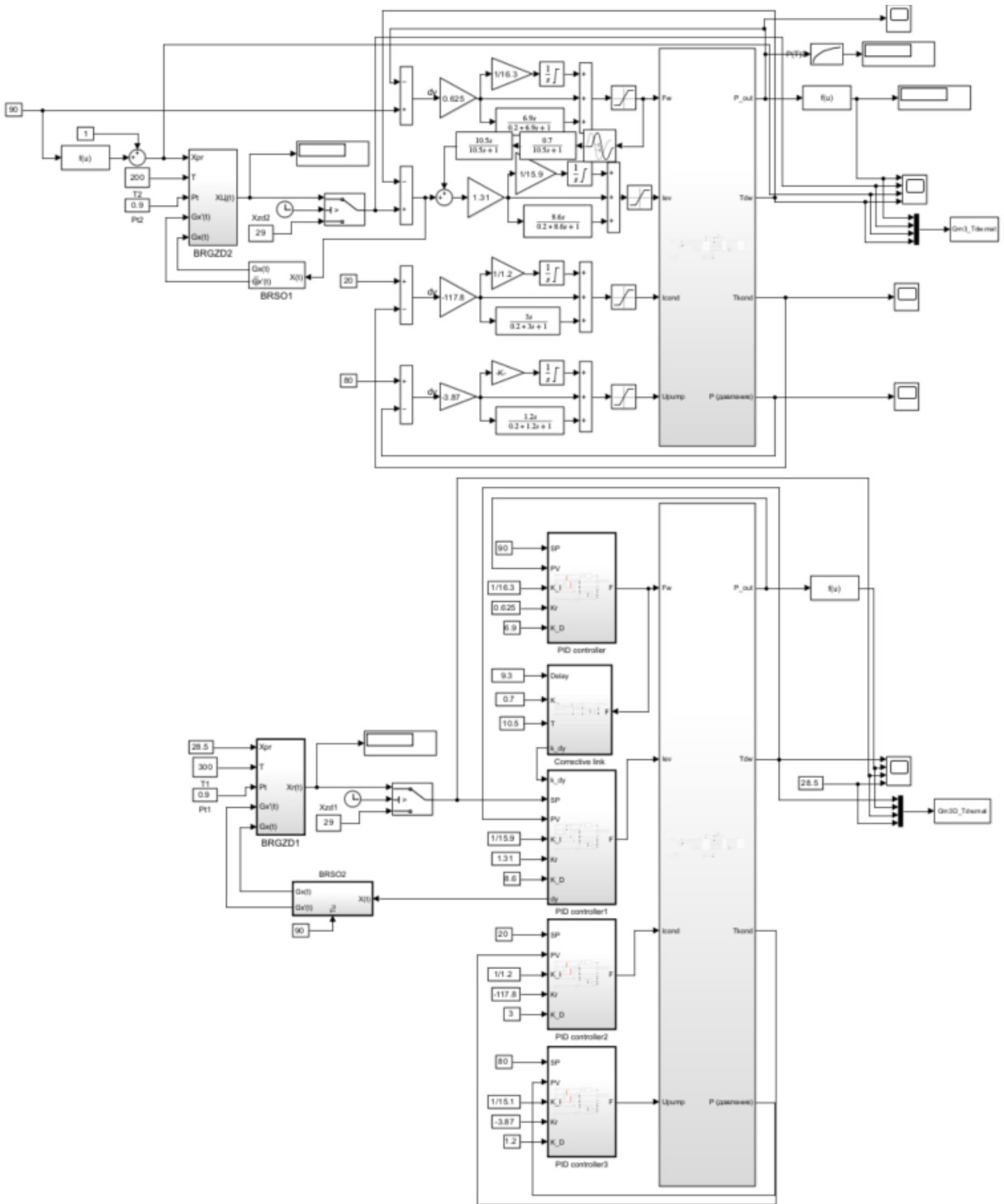


Рисунок 5.6 – Схема для порівняння роботи цифрової та «безперервної» моделей системи гарантуючого керування процесом dealкоголізації вина в потоці в середовищі Simulink

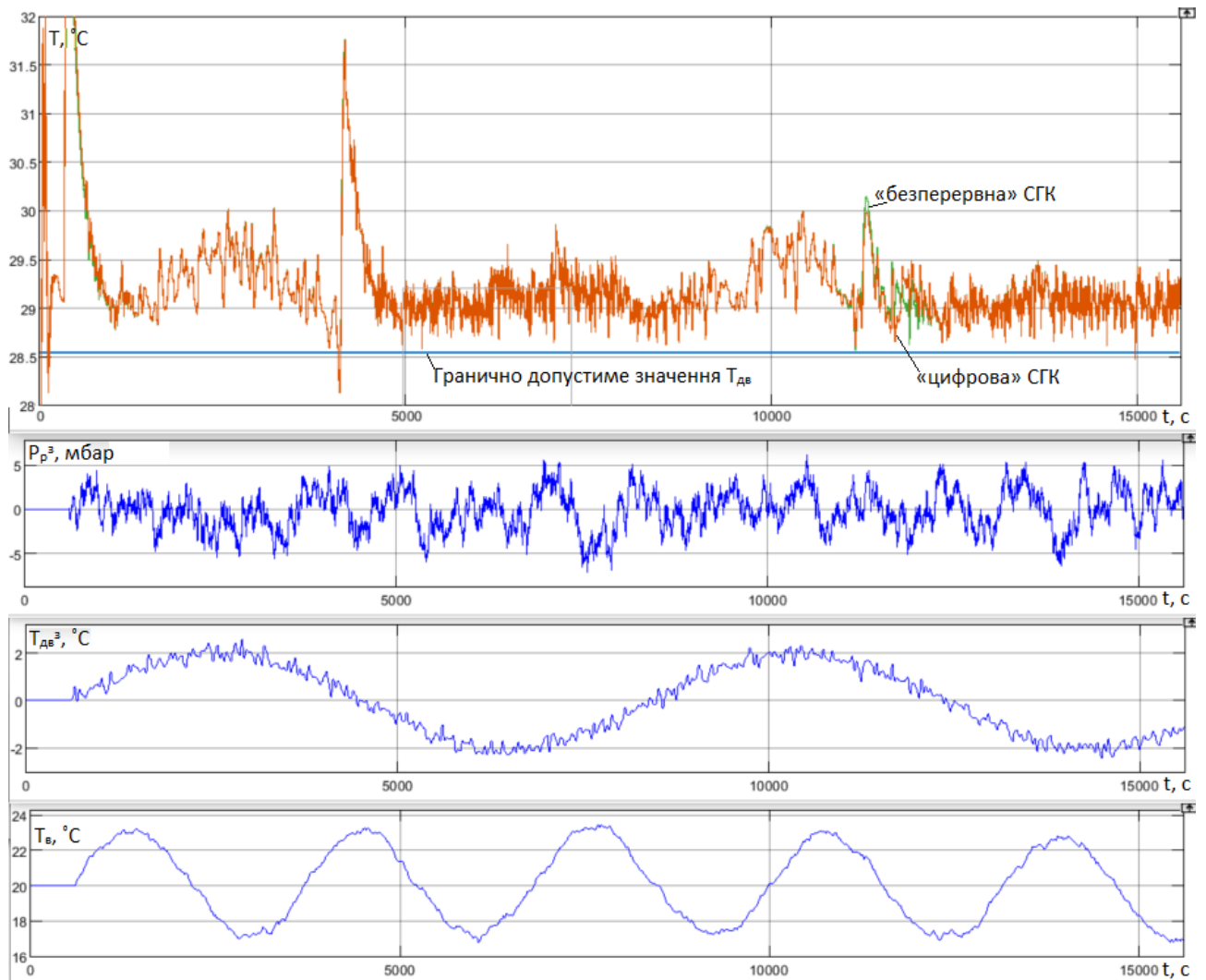


Рисунок 5.7 – Результати порівняльного моделювання цифрової та «безперервної» моделей системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці в середовищі Simulink

Як видно з рис. 5.7 різниця між якістю роботи цифрової та «безперервної» моделей системи гарантуючого керування мінімальна, а значить можна зробити висновок про доцільність конвертації розробленої цифрової моделі Simulink, що реалізує алгоритм системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці, у програмний код.

5.2.3. Конвертація моделі цифрового алгоритму системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці в програмний код для середовища програмування ПЛК – CodeSys V3.5, за допомогою пакета Simulink PLC Coder.

Перед генерацією програмного коду необхідно обрати цільове інтегроване середовище розробки. Для цього натискаємо правою кнопкою миші по підсистемі та переходимо у «PLC Code => Options...», де у рядку «Target IDE» обираємо, в нашому випадку, «3S CoDeSys 3.5». Щоб згенерувати код натискаємо правою кнопкою миші по підсистемі => «PLC Code => Generate Code for Subsystem». Після чого автоматично створюються файл ST та XML Document що мають таку ж назву як і файл Simulink.

Для імпорту файлів та оновлення компонентів з Simulink PLC Coder необхідно встановити плагін CODESYS «Simulink PLC Coder Import». Далі відкриваємо проект CODESYS, переходимо в меню «Проект => Simulink PLC Coder Import...» та обираємо «Add and import PLC Coder files...» після чого відкриваємо згенерований XML Document. Для використання згенерованої частини програмного коду необхідно додати блок «Елемент» та підписати його назвою підсистеми в Simulink. На рисунку 5.8 показане вікно «Simulink PLC Coder Import», на рисунку 5.9 показані функціональні блоки ПД-регулятора, коригуючого зв'язку, БРСО та БРГЗД у виконавчому середовищі CoDeSys V3.5. На рисунках 5.10 – 5.13 відображено фрагменти програм функціональних блоків.

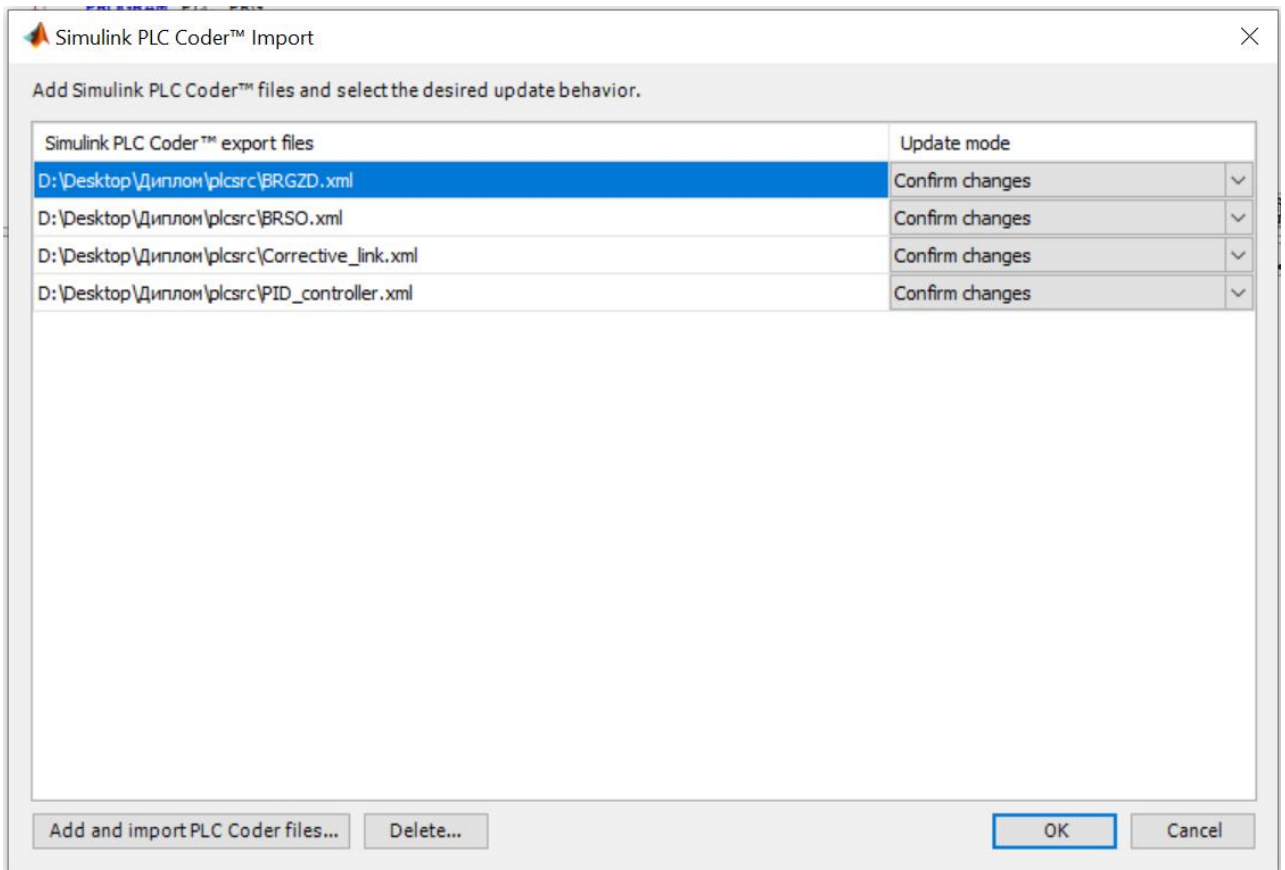


Рисунок 5.8 - Вікно «Simulink PLC Coder Import»

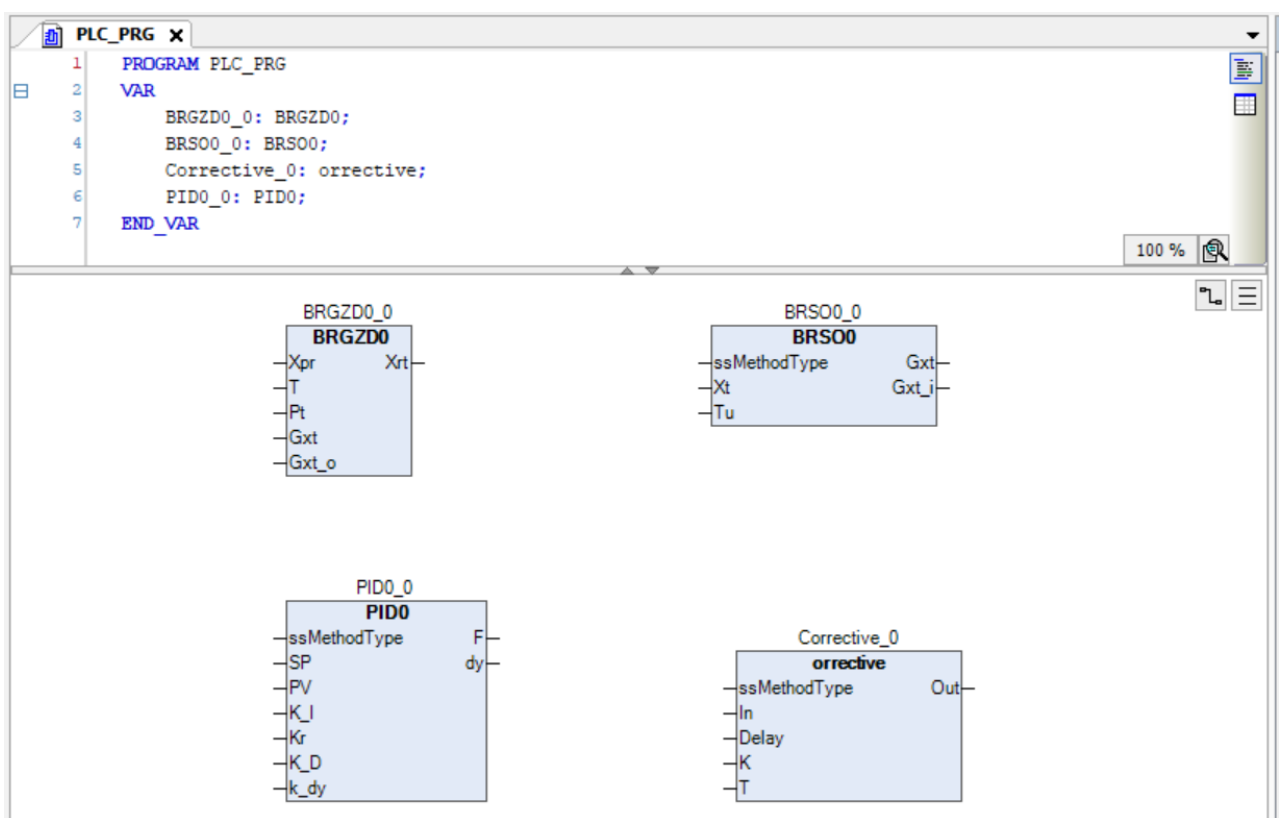


Рисунок 5.9 - Функціональні блоки ПІД-регулятора, коригуючого зв'язку, БРСО та БРГЗД у виконавчому середовищі CoDeSys V3.5

```

1  FUNCTION_BLOCK PID0
2  VAR_INPUT
3      ssMethodType: SINT;
4      SP: LREAL;
5      PV: LREAL;
6      K_I: LREAL;
7      K_r: LREAL;
8      K_D: LREAL;
9      k_dy: LREAL;
10 END_VAR
11 VAR_OUTPUT
12     F: LREAL;
13     dy: LREAL;
14 END_VAR

22     rtb_Gain3 := 5.0 * rtb_Sum4;
23
24     IF plc_ts_counter1 = 0 THEN
25         (* DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator3' *)
26         DiscreteTimeIntegrator3 := c_DiscreteTimeIntegrator3_D;
27     END_IF;
28
29     (* Sum: '<S1>/Sum4' incorporates:
30      * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator'
31      * Sum: '<S1>/Sum10' *)
32     F := (c_DiscreteTimeIntegrator_DS + rtb_Sum4) + (rtb_Gain3 - DiscreteTimeIntegrator3);
33     (* Saturate: '<S1>/Saturation' *)
34
35     IF F > 100.0 THEN
36         (* Output: '<Root>/F' *)
37         F := 100.0;
38     ELSIF F < 0.0 THEN
39         (* Output: '<Root>/F' *)

```

Рис. 5.10 - Фрагмент згенерованого коду у вигляді структурованого тексту в середовищі CodeSys V3.5 для блоку ПІД-регулятора

```

1  FUNCTION_BLOCK orrective
2  VAR_INPUT
3      ssMethodType: SINT;
4      In: LREAL;
5      Delay: UDINT;
6      K: LREAL;
7      T: LREAL;
8  END_VAR
9  VAR_OUTPUT
10     Out: LREAL;
11 END_VAR

52     Product5 := ((rtb_IntegerDelay * K) - DiscreteTimeIntegrator4) / T;
53     (* Sum: '<S1>/Sum2' incorporates:
54      * Product: '<S1>/Product3'
55      * Product: '<S1>/Product4' *)
56     Sum2 := (DiscreteTimeIntegrator4 / T) - (DiscreteTimeIntegrator1 / T);
57
58     IF plc_ts_counter1 = 0 THEN
59         (* Sum: '<S1>/Sum8' *)
60         rtb_Sum8 := DiscreteTimeIntegrator4 - DiscreteTimeIntegrator1;
61         (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator1' *)
62         c_DiscreteTimeIntegrator1_D := c_DiscreteTimeIntegrator1_D + Sum2;
63         (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator4' *)
64         c_DiscreteTimeIntegrator4_D := c_DiscreteTimeIntegrator4_D + Product5;
65     END_IF;
66
67     (* Update for Delay: '<S1>/Integer Delay' *)
68
69     FOR i := 0 TO 98 DO
70         IntegerDelay_DSTATE[i] := IntegerDelay_DSTATE[i + 1];
71     END_FOR;

```

Рис. 5.11 - Фрагмент згенерованого коду у вигляді структурованого тексту в середовищі CodeSys V3.5 для блоку коригуючого зв'язку

```
1 FUNCTION_BLOCK BR500
2 VAR_INPUT
3   ssMethodType: SINT;
4   Xt: LREAL;
5   Tu: LREAL;
6 END_VAR
7 VAR_OUTPUT
8   Gxt: LREAL;
9   Gxt_i: LREAL;
10 END_VAR
11 VAR
12   c_DiscreteTimeIntegrator1_D: LREAL;
13   c_DiscreteTimeIntegrator2_D: LREAL;
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53   rtb_Sqrt := SQRT(temp1);
54   (* Sqrt: '<S1>/Sqrt1' incorporates:
55    * Abs: '<S1>/Abs3'
56    * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator2' *)
57   temp2 := ABS(c_DiscreteTimeIntegrator2_D);
58   rtb_Sqrt1 := SQRT(temp2);
59   (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator1' incorporates:
60    * Math: '<S1>/Math Function4'
61    * Product: '<S1>/Product1'
62    * Sum: '<S1>/Sum7' *)
63   c_DiscreteTimeIntegrator1_D := (((rtb_Diff * rtb_Diff) - c_DiscreteTimeIntegrator1_D) / Tu) +
64   (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator2' incorporates:
65    * Math: '<S1>/Math Function5'
66    * Product: '<S1>/Product2'
67    * Sum: '<S1>/Sum6'
68    * Sum: '<S1>/Sum8' *)
69   c_DiscreteTimeIntegrator2_D := (((rtb_Sum6_tmp * rtb_Sum6_tmp) - c_DiscreteTimeInteg:
70   (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator2' incorporates:
```

Рис. 5.12 - Фрагмент згенерованого коду у вигляді структурованого тексту в середовищі CodeSys V3.5 для блоку BR500

```

1  FUNCTION_BLOCK BRGZD0
2  VAR_INPUT
3      Xpr: LREAL;
4      T: LREAL;
5      Pt: LREAL;
6      Gxt: LREAL;
7      Gxt_o: LREAL;
8  END_VAR
9  VAR_OUTPUT
10     Xrt: LREAL;
11 END_VAR
12 VAR
13     temp1: LREAL;
14     temp2: LREAL;
15 END_VAR
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36

```

```

5      * Constant: '<S1>/Constant7'
6      * Gain: '<S1>/Gain1'
7      * Math: '<S1>/Math Function2'
8      * Math: '<S1>/Math Function7'
9      * Product: '<S1>/Product2'
10     * Product: '<S1>/Product4'
11     * Product: '<S1>/Product5'
12     * Product: '<S1>/Product6'
13     * Product: '<S1>/Product7'
14     * Sqrt: '<S1>/Sqrt'
15     *
16     * About '<S1>/Math Function2':
17     * Operator: log
18     *
19     * About '<S1>/Math Function7':
20     * Operator: log *)
21     temp1 := LN(1.0 / Pt);
22     temp2 := LN(((Gxt * T) / Gxt_o) / 3.1415926535897931) * (1.0 / temp1));
23     Xrt := Xpr + (SQRT(temp2 * 2.0) * Gxt_o);
24     (* Saturate: '<S1>/Saturation' *)
25
26     IF Xrt > 50.0 THEN
27         (* Outport: '<Root>/Xr(t)' *)
28         Xrt := 50.0;
29     ELSIF Xrt < 10.0 THEN
30         (* Outport: '<Root>/Xr(t)' *)
31         Xrt := 10.0;
32     END_IF;
33
34     (* End of Saturate: '<S1>/Saturation' *)
35     (* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/BRGZD' *)
36

```

Рис. 5.13 - Фрагмент згенерованого коду у вигляді структурованого тексту в середовищі CodeSys V3.5 для блоку БРГЗД

5.3. Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом dealкоголізації вина в потоці та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога.

5.3.1 Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці

На підставі згенерованих функціональних блоків, програмні коди яких представлені вище, розроблено програму алгоритм керування на мові CFC в середовищі CoDeSys V3.5 (рис. 5.14 – 5.16).

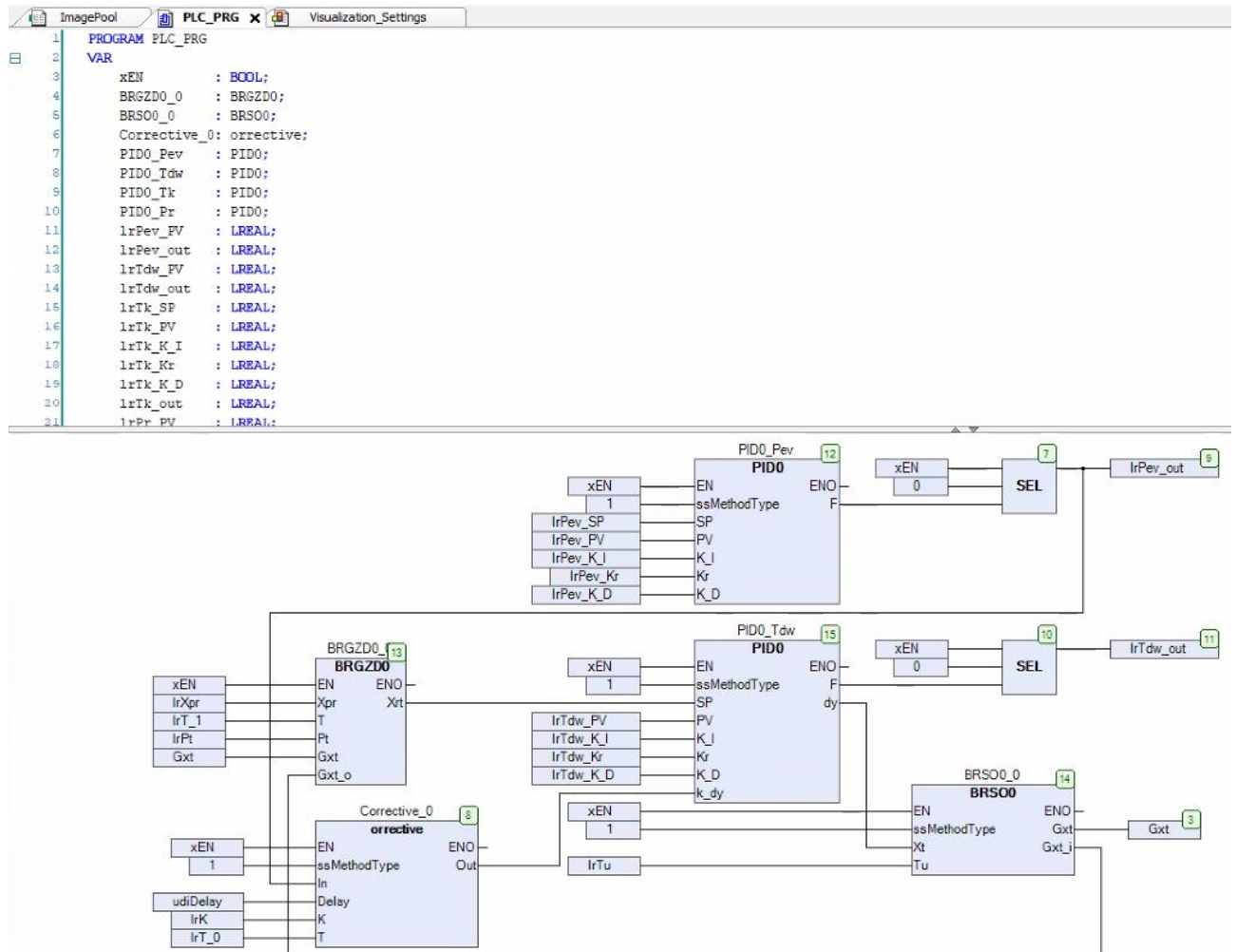


Рисунок 5.14 – Фрагменти списку змінних та програми алгоритму керування на мові CFC в середовищі CoDeSys V3.5

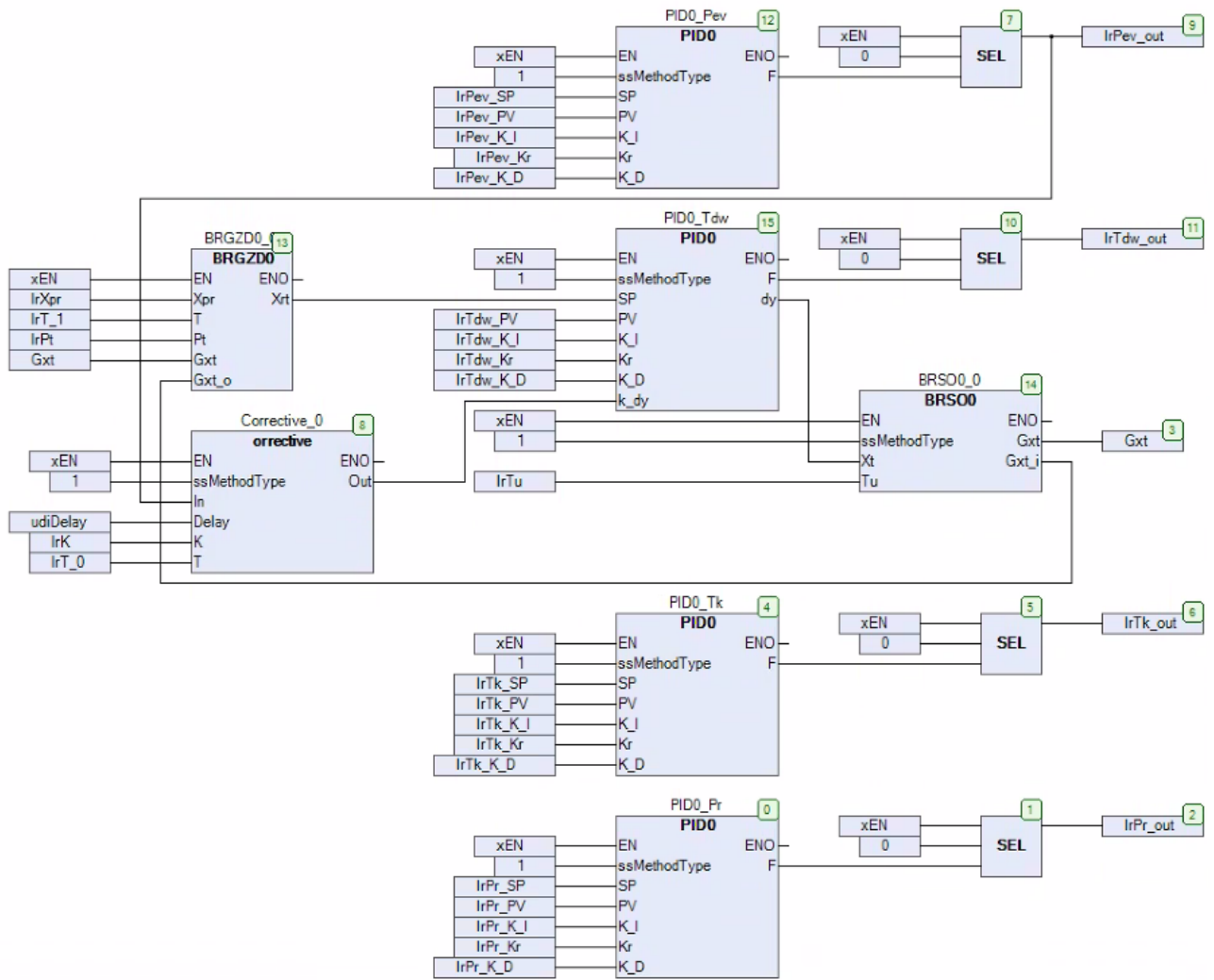


Рисунок 5.15 – Програма системи гарантуючого керування процесом
 dealкоголізації вина в потоці реалізована мовою CFC в середовищі CoDeSys

V3.5

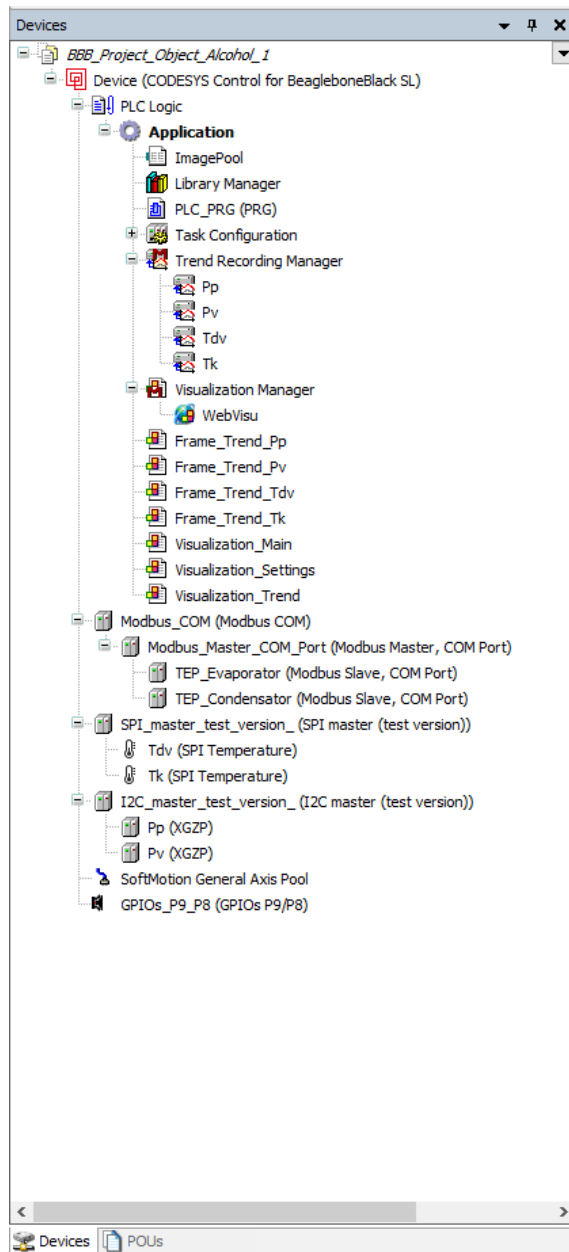


Рисунок 5.16 – Дерево програми в середовищі CoDeSys V3.5

5.3.2 Розробка програмного забезпечення людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога

Виконавче середовище CoDeSys V3.5 дозволяє реалізацію людино-машинного інтерфейсу у вигляді веб-візуалізації. Завдяки цьому оператор технолог має можливість контролю основних параметрів процесу, керування процесом та налаштування системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці. Відповідні вікна веб-візуалізації представлені на рисунках 5.17 – 5.19.

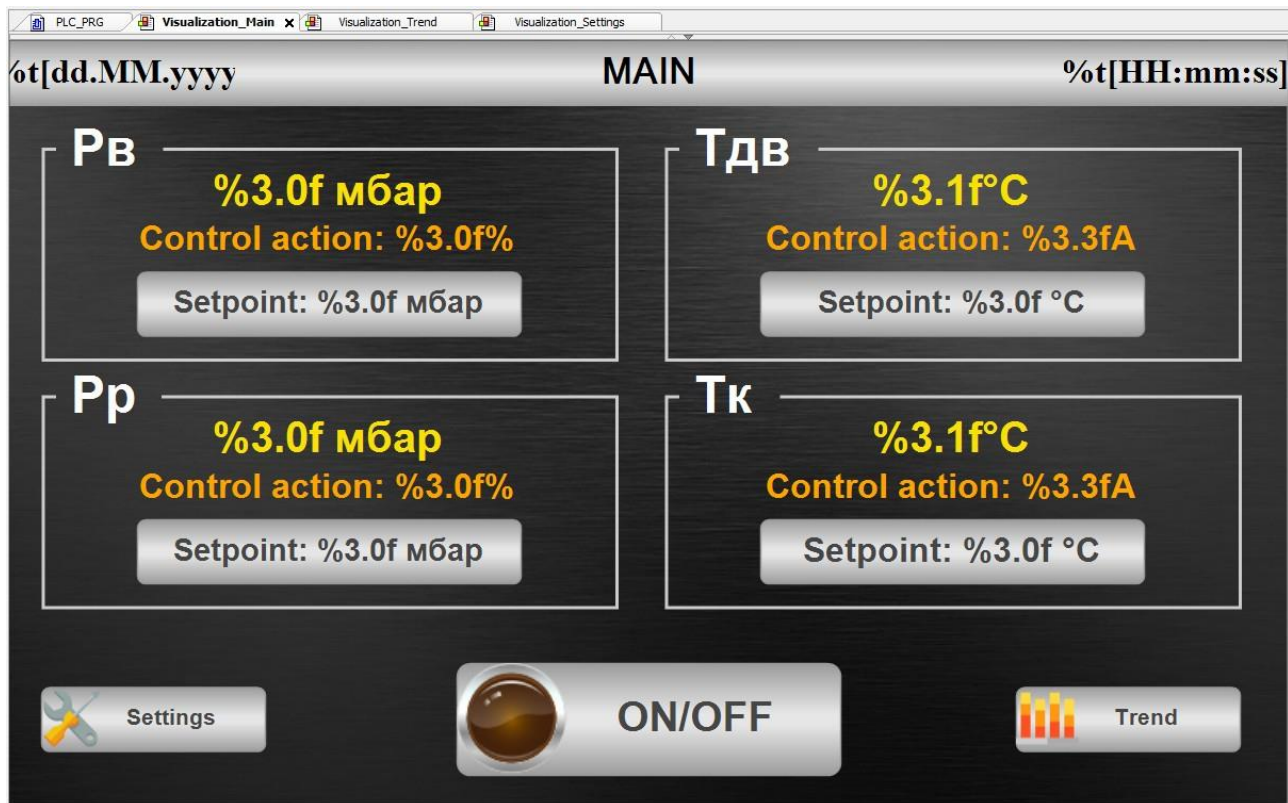


Рисунок 5.17 – Створення веб-візуалізації головного вікна, що надає можливість контролю основних параметрів процесу, запуску процесу та переходу на інші вікна

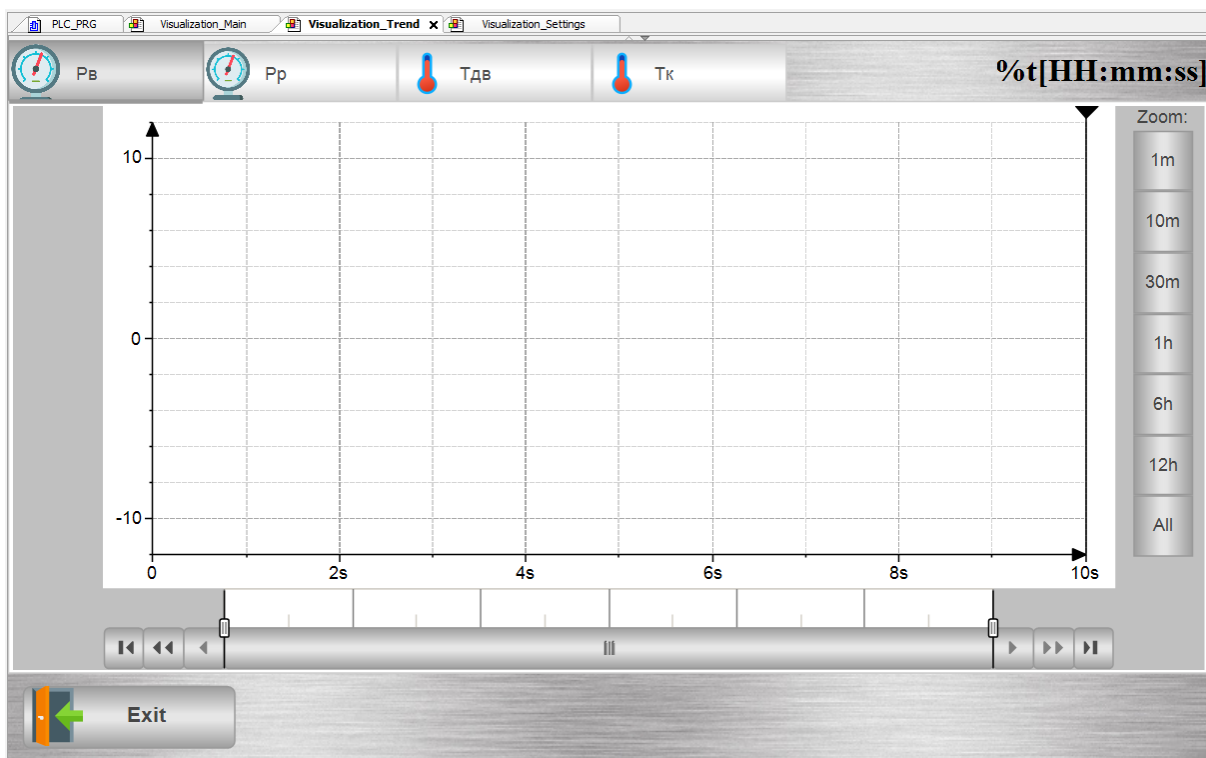


Рисунок 5.18 – Створення веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіків зміни основних параметрів процесу

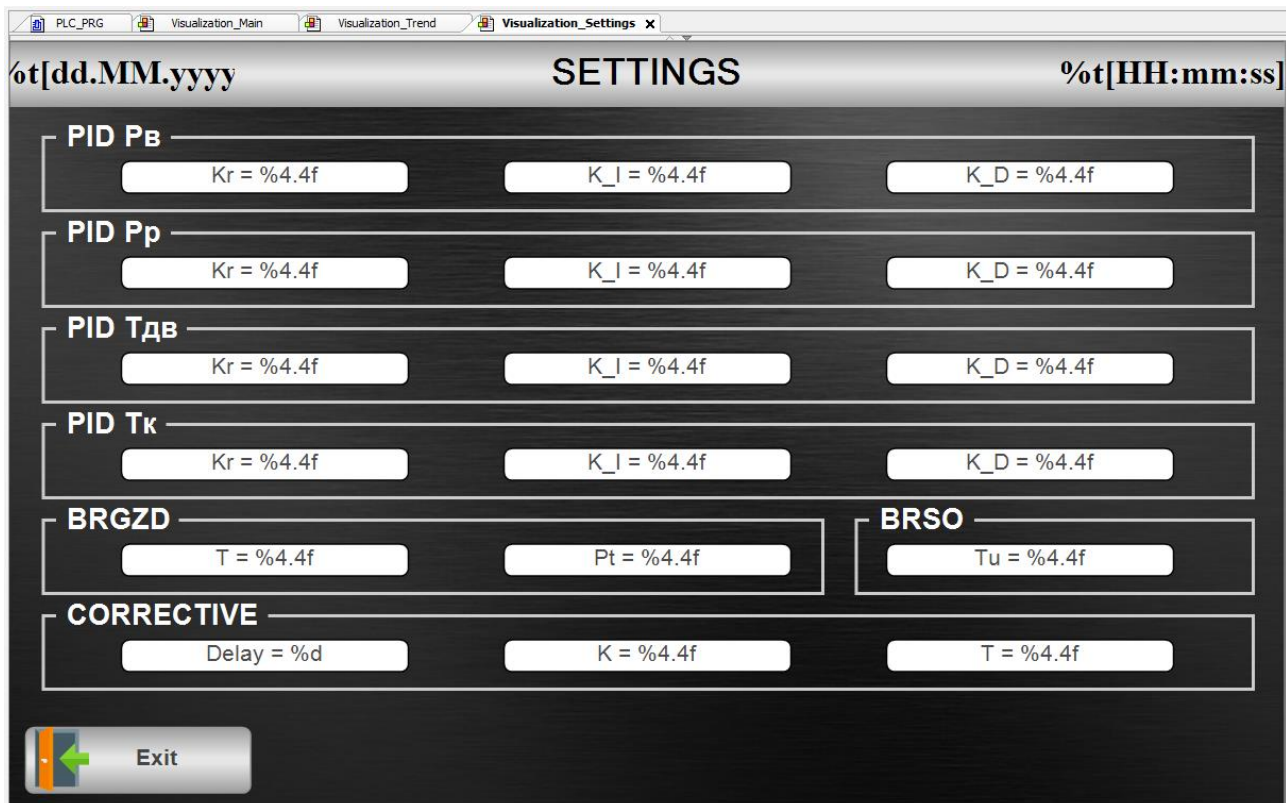


Рисунок 5.19 – Створення веб-візуалізації вікна, що надає можливість налаштування системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці

5.3.3 Тестування розробленого програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога.

Отримане розробленого програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога завантажено на одноплатний комп'ютер BeagleBone Black з виконавчим середовищем CoDeSys V3.5. Результати тестування роботи програмного забезпечення наведено на рисунках 5.20 - 5.23.

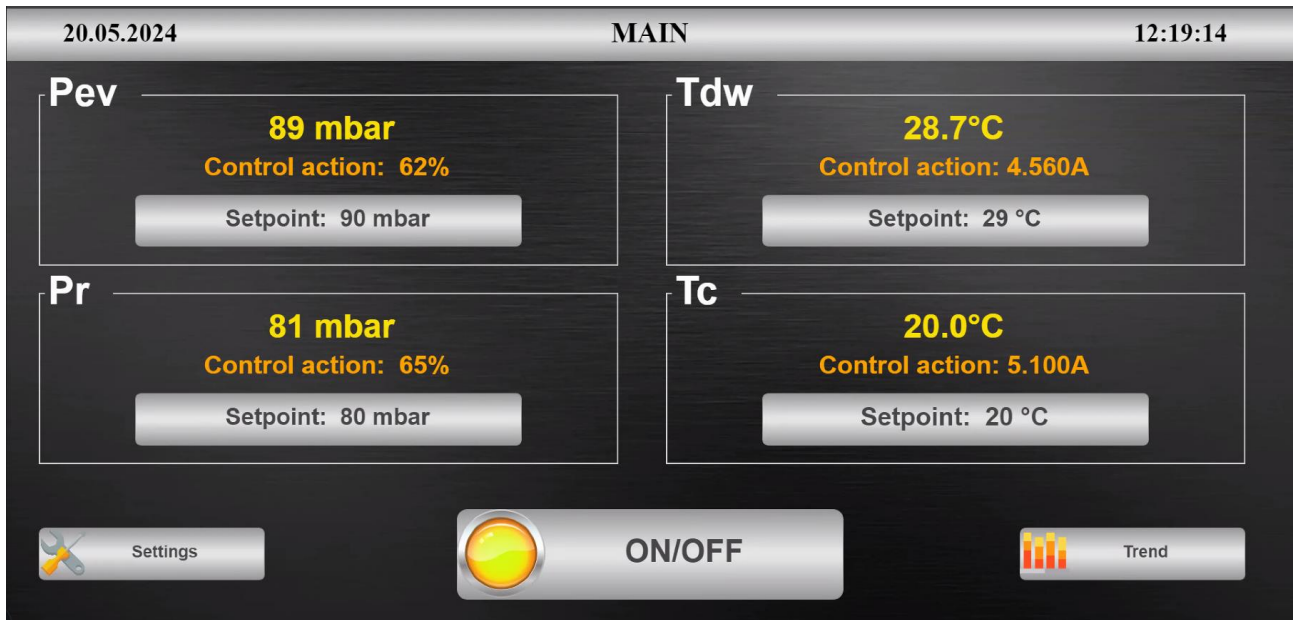


Рисунок 5.20 – Тестування веб-візуалізації головного вікна, що надає можливість контролю основних параметрів процесу, запуску процесу та переходу на інші вікна

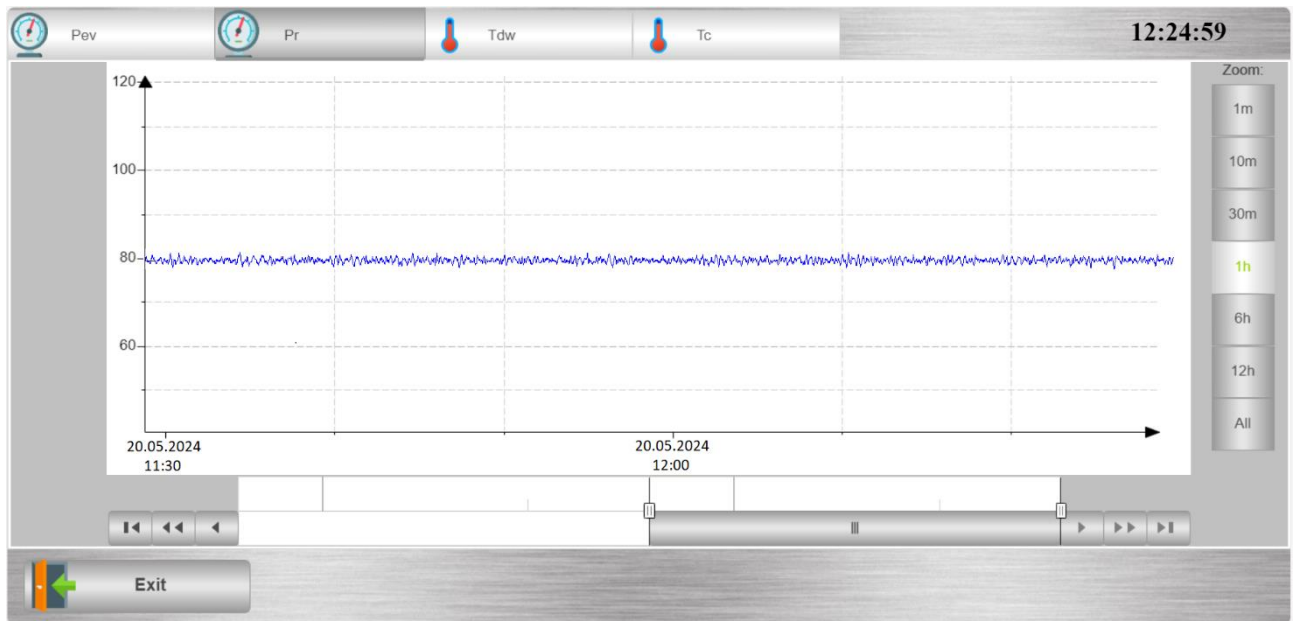


Рисунок 5.21 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіку зміни тиску в ресивері

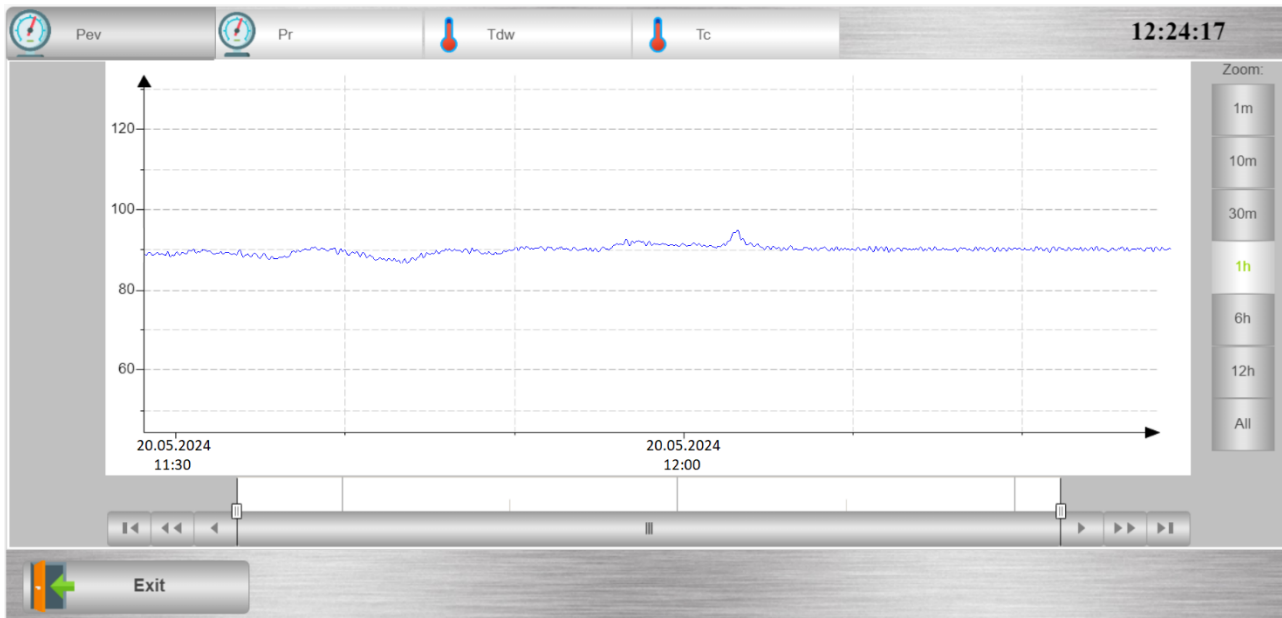


Рисунок 5.22 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіку зміни тиску на виході випарника



Рисунок 5.23 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіку зміни температури на виході випарника

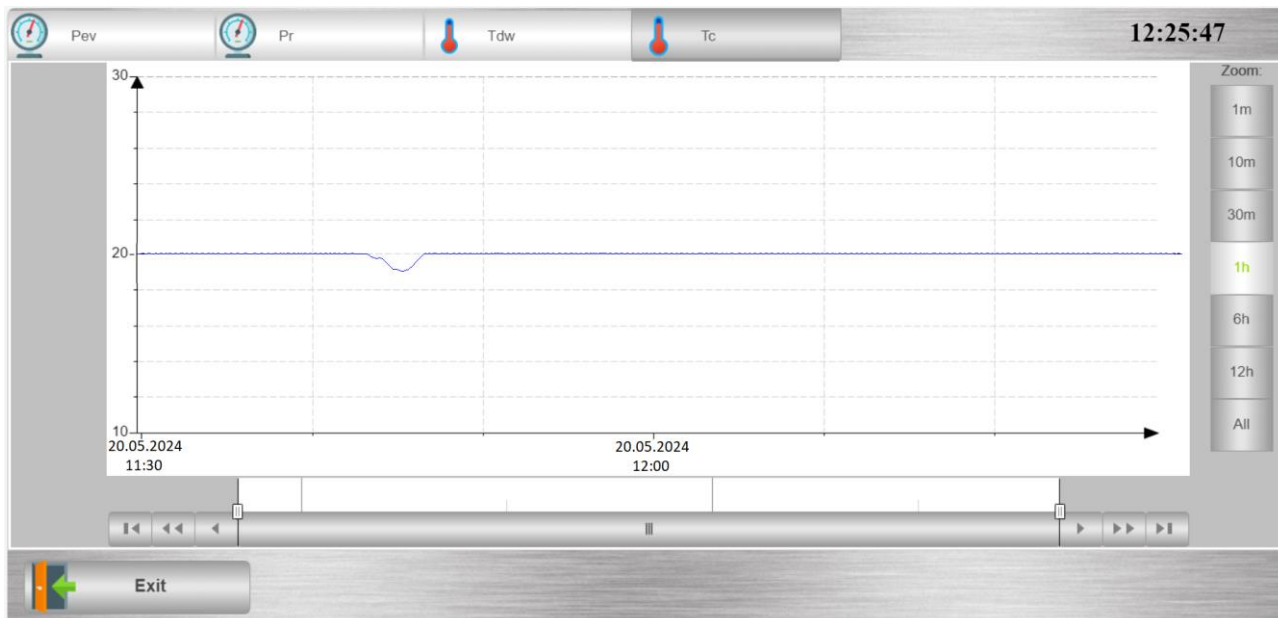


Рисунок 5.24 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіку зміни температури конденсатора

Parameter	Value
PID Pev	Kr = 0.6250, K_I = 0.0610, K_D = 6.9000
PID Pr	Kr = -3.8700, K_I = 0.0660, K_D = 1.2000
PID Tdw	Kr = 1.3100, K_I = 0.0630, K_D = 8.6000
PID Tc	Kr = -117.8000, K_I = 0.8300, K_D = 3.0000
BRGZD	T = 300.0000, Pt = 0.9500
BRSO	Tu = 90.0000
CORRECTIVE	Delay = 9, K = 0.7000, T = 10.5000

Рисунок 5.25 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість налаштування системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці

5.4. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.

Зміст і методика формування робочої гіпотези наукових досліджень.

Обґрунтування актуальності дослідження.

Автоматизація процесу забезпечує підвищення якості готової продукції, підвищення енергоефективності процесу та розширення асортименту за рахунок забезпечення точного дотримання технологічних регламентів.

Мета дослідження

Дослідження способів збільшення прибутку за рахунок зменшення енерговитрат, розширення асортименту продукції, охоплення додаткових споживачів.

Об'єкт дослідження

Процес деалкоголізації вина в потоці

Предмет дослідження

Засоби автоматизації процесу деалкоголізації вина в потоці

Інформаційні джерела

Внутрішня звітність підприємства, інформація про поділ зовнішнього середовища, статистика про споживання продукції, демографічні процеси

Стадія інноваційного проекту

- формулювання концепції досліджень;
 - техніко-економічне обґрунтування проекту;
 - проведення прикладних самостійних робіт;
 - виконання проектно-конструкторської розробки пробного зразка;
-
- патентування новації (нової технології, нового засобу тощо).

Опис інноваційної ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження автоматичного керування процесом деалкоголізації вина	Вакуумна деалкоголізація вин та інших напоїв	Отримання високоякісних деалкоголізованих напоїв

Прогнозування очікуваних економічних результатів

- збільшення обсягів виробництва та реалізації продукції у регіоні, завдяки впровадженню нового продукту функціонального призначення і охоплення додаткових споживачів;
- зменшення витрат електроенергії на 25 %

Зміст і методика визначення конкурентної позиції підприємства

Зважена рейтингова оцінка підприємств галузі

Характеристика	Вагомий коефіцієнт	Підприємство					
		Шустов		Шабо		Винзавод Князя Трубецького	
		рейтинг	Зважений оейтинг	рейтинг	Зважений оейтинг	рейтинг	Зважений оейтинг
Висока якість продукції;	0.3	2	0.6	1	0.3	3	0.9
Низькі витрати, пов'язані з виробництвом товарів;	0.15	3	0.45	2	0.3	1	0.15
Широкий асортимент і можливість вибору продукції;	0.1	1	0.1	2	0.2	3	0.3
Присутність доступу до кваліфікованих трудових ресурсів;	0.1	1	0.1	3	0.3	2	0.2
Хороша репутація у покупців (імідж);	0.2	2	0.4	1	0.2	3	0.6
Наявність управлінської команди, добре збалансованою і має досвід роботи у цій галузі діяльності	0.15	1	0.15	2	0.3	3	0.45
	1.0		1.8		1.6		2.6

Матриця SWOT- аналізу

Сильні сторони	Слабкі сторони
<p>Хороша репутація на ринку; Кваліфіковані трудові ресурси; Наявність управлінської команди, добре збалансованою і має досвід роботи у цій галузі діяльності; Налагоджена збутова мережа; Наявність фінансових ресурсів.</p>	<p>Проектно-конструкторська база; Науково-дослідна база; Високі витрати пов'язані з виробництвом товарів; Бренд не активний в соціальних мережах</p>
Можливості	Загрози
<p>Анонс новинок на сайті, в соцмережах та рекламі; Вихід на міжнародний ринок; Нові споживачі;</p>	<p>Складна економічна ситуація; Подорожчання сировини; Подорожчання енергоносіїв; Велика конкуренція;</p>

Зміст і методика оцінки інноваційного потенціалу підприємства

Оцінка інноваційного потенціалу

Складові	Параметри	Коефіцієнт вагомості	Оцінка	
			бали	зважена оцінка
1. Виробничі можливості	1.1 Ступінь використання виробничої потужності		2	
	1.2. Рівень прогресивності застосованих технологій		3	
	1.3. Ступінь гнучкості виробництва		1	
	Підсумкова оцінка	0.2	6	1.2
2. Кадрові можливості	2.1. Рівень кваліфікації персоналу		3	
	2.2. Ступінь готовності персоналу до змін на підприємстві		2	
	2.3. Розвиненість системи мотивації персоналу		2	
	2.4. Ступінь творчої ініціативності персоналу		1	
	Підсумкова оцінка	0.1	8	0.8
3. Науково-технічні можливості	3.1. Рівень витрат на наукові розробки в собівартості товарної продукції		1	
	3.2. Рівень витрат на використання науково-технічних досягнень в собівартості товарної продукції		1	
	3.3. Рівень використання розробок		3	
	3.4. Частка персоналу, яка займається науковими розробками у загальній чисельності персоналу		2	
	Підсумкова оцінка	0.1	7	0.7
4.Маркетингові можливості	4.1. Раціональність використання каналів розподілу товарів		3	
	4.2. Гнучкість цінової політики		1	
	4.3. Рівень використання реклами		2	
	4.4. Ефективність системи збуту		3	
	Підсумкова оцінка	0.15	9	1.35
5.Організаційні можливості	5.1.Ступінь інноваційної спрямованості організаційної структури		1	
	5.2Рівень відповідності організаційної культури інноваційному розвитку підприємства		2	
	5.3 Рівень компетенції керівників		2	
	5.4. Розвиненість системи інформаційного забезпечення		2	
	Підсумкова оцінка	0.2	7	1.4
6. Фінансові можливості	6.1. Коефіцієнт абсолютної ліквідності		12.7	
	6.2. Коефіцієнт швидкої ліквідності		362.5	
	6.3. Коефіцієнт загальної ліквідності		838.8	
	6.4.Фінансова стійкість підприємства		120848	
	Підсумкова оцінка	0.25	122062	30515,5

Висновки

Виробничі, маркетингові, організаційні можливості підприємства на достатньому рівні, трішки гірші кадрові, науково-технічні можливості. Але це обумовлює перспективи для їх розвитку. В цілому, підприємство має достатній інноваційний потенціал.

Зміст і методика формування маркетингової програми підприємства

1. Визначаємо перелік вирішуваних завдань та їх вплив на показники економічної ефективності.

рахунок зменшення енерговитрат, розширення асортименту продукції, охоплення додаткових споживачів.

Перелік вирішуваних завдань та їх вплив на показники економічної ефективності

Статті змін	Очікуване джерело економії	Кількісна оцінка
Витрати електроенергії	Стабілізація струму термоелектричного теплового насосу	Умовно постійна добова норма витрати електроенергії: до автоматизації – 96 кВт год/т після автоматизації – 24 кВт год/т
Асортимент продукції		Умовно постійна добова норма кількість найменувань продукції: до впровадження інновації – 1 ум. од. /т після впровадження інновації – 3 ум. од. /т

2. Визначаємо додатковий обсяг виробництва продукції після впровадження модернізації системи управління, враховуючі дані таблиці 4.5

$$\Delta \text{ОВ} = (\text{Побм} - \text{Побб}) \times T \times K_{\text{завант}} \times K_{\text{виходу}}$$

де Побм - продуктивність після модернізації, т/добу

Побб - продуктивність до модернізації, т/добу

T - час роботи, діб/рік

Kзавант – коефіцієнт завантаження обладнання, приймаємо рівним 0,9.

Kвиходу – коефіцієнт виходу - 0,6.

$$\Delta \text{ОВ} = (1.48 - 1) \times 268 \times 0.9 \times 0.6 = 69.5 \text{ т/рік}$$

3. Розраховуємо додатковий прибуток за рахунок збільшення продуктивності:

$$\Delta\P = \Delta\text{OB} \times \text{Ц} \times \text{P}$$

де ΔOB – додатковий обсяг реалізованої продукції, т

Ц - ціна реалізації продукції, грн./т

P – рентабельність продукції (при умові заданого прийняттого рівня).

$$\Delta\P = 69.5 \times 150000 \times 0.3 = 3\,127\,500 \text{ грн}$$

Розраховуємо зміну річних поточних витрат при експлуатації базової та нової моделі системи управління. Розрахунок виконують тільки по статтям і витратам, які змінюються при переході від базового варіанту до нового.

Зміна річних поточних витрат

№ п/п	Статті витрат	Позначення	Величина, грн		Відхилення. + збільшення - зменшення
			до модерніз.	після модерніз.	
1	Витрати на електроенергію, тис.грн	Вe	158.2	58.5	-99.7
2	Витрати на поточний і капітальний ремонт, тис.грн	Вр	2	38.5	+36.5
3	Витрати пов'язані з амортизацією, тис.грн	Ва	4.8	76.9	+72.1
	Всього поточних витрат, тис.грн	Вп	165	173.9	$\Delta\text{Вп} = +8.9$

5. Розраховуємо повну собівартість виробленої продукції C^b до модернізації, грн.

$$C^b = \text{OB}^b \times \text{Ц}^b \times 100 / (100 + \text{P})$$

де: P – рентабельність виробленої продукції

Повна собівартість виробленої продукції після модернізації розраховуємо за формулою:

$$C^h = C^b + \Delta\text{OB} \times \text{Ц} \times 100 / 130 + \Delta\text{Вп}$$

де: $\Delta\text{Вп}$ – зміна поточних витрат від модернізації обладнання, тис. грн.

$$C^b = 144.7 \times 150 \times 100 / (100 + 30) = 16696.2 \text{ тис. грн}$$

$$C^h = 16696.2 + 69.5 \times 150 \times 100 / 130 + 8.9 = 24726.6 \text{ грн}$$

6. Розраховуємо показники виробничої діяльності підприємства

Таблиця 4.7

№ п\п	Показник	Позначення	АСУТП		Зміна статей витрат (+) зростання; (-) зниження
			Базова	Модернізована	
1	Обсяг виробництва продукції, нат. од.	ОВ	144.7	214.2	+69.5
2	Дохід від реалізації, тис. грн.	ТП	21705	32130	+53835
3	Повна собівартість продукції, тис. грн.	С	16696.2	24726.6	+8028.1
4	Прибуток, тис. грн.	П	6511.5	9639	+3127.5
5	Податок на прибуток	Ппр	1172	1735	+563
6	Чистий прибуток, тис. грн.	ЧП	5339.5	7904	+2564.5
7	Рентабельність %	Рп	32	32	0

Зміст і методика визначення інноваційного бюджету та інвестицій у виробництво

Кошторис витрат на проведення прикладних НДР

Найменування статей витрат	Сума витрат, тис. грн
1. Матеріали	14.98
2. Паливо та енергія	2.5
3. Заробітна плата (основна і додаткова)	29.96
4. Відрахування на соціальні заходи	11.235
5. Амортизаційні відрахування	5.2
6. Інші витрати	6.4
7. Накладні витрати	35.16
Разом	105.485

Розмір інноваційного бюджету

Стаття витрат	Сума, грн.	Питома вага статті, %
Вартість проведення прикладних науково-дослідних робіт (Вндр)	105485	15.9
Прибуток (П)	21097	3.1
ПДВ	21097	3.1
Договірна ціна НДР (Цндр)	147679	22.3
Повна вартість роботи, виконаної власними силами	369200	55.6
Розмір інноваційного бюджету	664558	100

Інвестиційні витрати на модернізацію системи управління
технологічним процесом

№	Статті витрат	Сума, тис.грн.
1	Витрати для виконання робіт з проектування	664.5
2	Бюджет маркетингових заходів по просуванню	0
3	Вартість комплексів засобів автоматизації (ІСкап)	22.3
4	Витрати для модернізації діючої системи управління (ІС мод)	4
5	Всього інвестиційні (ІС)	691.5

Зміст і методика оцінки інвестиційної привабливості інноваційного проекту

Величина щорічних виплат відсотків за кредитом, тис. грн.

Роки	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Сума кредиту, тис. грн.	670	53.6	402	268	134
Величина відсотків за кредитом, тис. грн.	167.5	134	100.5	67	33.5
Щорічна сума виплат за кредитом	301.5	268	234.5	201	167.5
Залишок кредиту на кінець року	536	402	26	134	0

Розрахунок прибутку, податків і вільних грошових коштів, тис. грн.

Показники	Роки				
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Виручка від реалізації	32130	32130	32130	32130	32130
Поточні витрати	173.9	173.9	173.9	173.9	173.9
Амортизаційні відрахування	76.9	76.9	76.9	76.9	76.9
Відсотки за кредит	167.5	134	100.5	67	33.5
Оподаткований прибуток	9639	9639	9639	9639	9639
Податок на прибуток	1735	1735	1735	1735	1735
Чистий прибуток	7904	7904	7904	7904	7904
Чистий прибуток після виплат за кредит	7602.5	7636	7669.5	7703	7736.5
Чисті грошові надходження	7980.9	7980.9	7980.9	7980.9	7980.9
Коефіцієнт дисконтування	0,567426	0,635518	0,71178	0,797193	0,892857
Чистий приведений дохід накопичуваним підсумком	7289.4	15270.3	23251.2	31232.1	39213

Чистий приведений дохід

ЧПД=7980.9*5-691.5=39213 тис. грн

Індекс доходності

ІД=7980.9/691.5=11.5

Термін окупності

ТОІ=691.5/7980.9=0.08 років

Висновки

Реалізація проекту є доцільною, строк окупності інвестицій буде у межах прийнятого терміну фінансової оцінки проекту ТОІ складає 0,08 періоду(року), ІД=11.5.

5.5 Висновки за розділом

В ході виконання розділу на базі доступного апаратного та програмного забезпечення (BeagleBone Black + CodeSys V3.5) отримали ПЛК з відкритою архітектурою та підтримкою інтерфейсів UART, I2C, SPI, USB2.0, mini-USB, Ethernet, 7AI, 45DI/DO, PWM.

Попередньо алгоритм системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів був розроблений, оптимізований та протестований в середовищі Matlab Simulink, а після переведений з «безперервного» часу в «цифровий». Переконавшись в працездатності отриманого «цифрового» алгоритму конвертували у програмний код у вигляді структурованого тексту для подальшої його реалізації у середовищі програмування CodeSys V3.5.

З використанням підготовленого коду розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці, а також людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога у вигляді веб-візуалізації.

Також, в ході виконання розділу проведено оцінку економічної

ефективності впровадження розробок. Основні результати:

Чистий приведений дохід

$$\text{ЧПД} = 7980.9 * 5 - 691.5 = 39213 \text{ тис. грн}$$

Індекс доходності

$$\text{ІД} = 7980.9 / 691.5 = 11.5$$

Термін окупності

$$\text{ТОІ} = 691.5 / 7980.9 = 0.08 \text{ років}$$

Виробничі, кадрові, науково-технічні, маркетингові можливості підприємства на достатньому рівні, трішки гірші організаційні можливості. Але це обумовлює перспективи для їх розвитку. В цілому, підприємство має достатній інноваційний потенціал.

Реалізація проекту є доцільною, строк окупності інвестицій буде у межах прийнятого терміну фінансової оцінки проекту.

ВИСНОВОК

Кваліфікаційна робота магістра на тему “ Підвищення ефективності автоматичного керування деалкоголізацією вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу ” присвячена підвищенню продуктивності, енергоефективності та економічної доцільності проведення технологічного процесу. В бродильних виробництвах при виготовленні алкогольних напоїв постає проблема нормалізації вмісту алкоголю в готовому продукті. Процес деалкоголізації застосовується для зменшення вмісту алкоголю в одних продуктах та отримання спирту для зміцнення інших. Для підвищення енергоефективності процесу видалення алкоголю та поліпшення якості отриманих продуктів зазвичай використовується вакуумна дистиляція у плівкових випарниках. Використання термоелектричних перетворювачів (ТЕП) є одним з шляхів зниження енергетичних витрат та зменшення рівня теплових «енергетичних відходів» при реалізації таких процесів. ТЕП підігрівають виноматеріал і випаровують спирти та охолоджують і конденсують пари спирту. Але їх введення збільшує кількість взаємозв'язків в ОК, що безумовно ускладнює керування ТП. Тому розробка ефективних алгоритмів керування таким процесом є актуальною задачею.

В першому розділі було розглянуто суть технологічного процесу деалкоголізації вина в потоці, його схема та конструкцію агрегату, що реалізує даний процес. Визначено регламенти ведення ТП та виділено регульовані координати, в якості яких доцільно обрати температури ДВ на виході випарника $T_{дв}$ і в конденсаторі $T_{к}$, тиск на виході випарника $P_{в}$ та тиск у ресивері $P_{р}$. Необхідною умовою вирішення задач керування є наявність керуючих дій, що повинні бути входними змінними (координатами) ОК і їх кількість повинна бути рівною кількості регульованих змінних. Для процесу деалкоголізації вина в потоці до керуючих дій доцільно віднести струми живлення ТЕП випарника $I_{пв}$ і конденсатора $I_{пк}$, витрата виноматеріалу $F_{в}$ та частото обертання вакуумного насосу $u_{н4}$. Всі інші входні дії, окрім керуючих, класифікуємо як некеровані збурення.

У ході виконання розділу була розроблена структурна схема процесу деалкоголізації вина в потоці та структурна схема його математичної моделі. Також в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink була відтворена математична модель об'єкту керування. В результаті моделювання математичної моделі ОК були отримані його динамічні та квазістатичні характеристики, а також доведена адекватність аналітичної математичної моделі процесу деалкоголізації вина в потоці як ОК. За всіма каналами ОК має статичні властивості, параметрична ідентифікація моделей каналів керування проводилася за методикою двох спільних точок першого порядку.

У другому розділі сформульовані задачі керування, вимоги до їх розв'язку і обрані основні принципи побудови автоматичних систем

САР базової структури синтезована на базі ПД регуляторів. Синтез САР проведено в два етапи. На першому етапі розрахунок налаштувань ПД регуляторів проводився за інженерними методиками Капеловича, на другому етапі було застосовано оптимальний параметричний синтез.

Хоча із налаштуваннями регуляторів, отриманими за інженерними методиками САР дає стійкі перехідні процеси, після оптимізації інтегральні показники якості суттєво зменшилися що свідчить про підвищення динамічної якості системи. Також варто зазначити, що попри вжиті заходи існує запас підвищення динамічної точності САР.

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є дія перехресного зв'язку витрати виноматеріалу на температуру ДВ на виході випарника. Основним шляхом підвищення динамічної точності в даному випадку обрано побудову автономної САР.

В основу підвищення динамічної точності САР було покладено принцип інваріантності Петрова, сутність якого у введенні додаткових каналів впливу через коригувальний зв'язок.

Було виведено передатну функцію коригуючого зв'язку, приведено її до фізично реалізуємого виду та представлено у виді типових динамічних ланок. Оскільки передатна функція містить ланку чистого запізнення вона є фізично

реалізуємою.

Після спрощення коригуючого зв'язку вибрано початкові наближення його параметрів з їх подальшою оптимізацією. Розроблено схему моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку.

Було проведено порівняльний аналіз САР базової структури та САР ПДТ в умовах ступінчатої зміни завдання контуру регулювання тиску в ресивері та в умовах різної концентрації спирту у виноматеріалі. Суттєве зменшення інтегральних показників якості, максимального динамічного відхилення та часу регулювання свідчить про те що САР ПДТ є більш якісною в порівнянні з САР базової структури.

В процесі виконання третього розділу розглянуто не лінійність об'єкту, розроблено модель САК з традиційним та САК з нечітким регулятором, синтез, тестування та налагодження САК проводилися на спрощеній моделі ОК. Нечіткий регулятор розроблений у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Визначено функції приналежності до нечітких множин, сформовано бази правил функціонування регуляторів у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначено алгоритми нечіткого виводу – Сугено 0-порядку.

Встановлено, що за якістю регулювання такі САК функціонують приблизно однаково, а можливо трохи краще, ніж САК з традиційним ПД-регулятором при об'єкті керування з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої реалізації параметричної оптимізації САК за характеристиками нечіткого регулятора виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може, виконувати роль нейрорегулятора. Тренування штучної нейронної мережі виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink. Розроблена модель САК з регулятором, що представляється штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САК з нейрорегулятором проведена при тих же умовах, що і САК з традиційним ПД

регулятором.

У результаті моделювання різних САК було встановлено, що за якістю регулювання САК з нейрорегулятором функціонує незначно краще, ніж інші САК, це за інтегральним показником якості регулювання відповідно 250,1 у САК з нейрорегулятором і 253,2 у САК з традиційним ПД-регулятором. Середнє квадратичне відхилення регульованої зміни від заданого значення, при випадкових впливах, що збурюють, практично однаково як у САК з традиційним ПД-регулятором 1,3, так і у САК з нейрорегулятором 1,3.

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

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

Найчастіше на змінні об'єкта керування регламентами накладаються обмеження, порушення яких може мати дуже несприятливі наслідки. Вони можуть призводити до аварійних зупинок обладнання, втрат сировини та енергоносіїв, зниження якості продукції, необхідність мати великий штаб персоналу та ремонтних служб. Ситуація посилюється, якщо найбільш ефективні режими роботи ОК близькі до гранично-допустимих, ОК є суттєво нестационарним, схильний до інтенсивних неконтрольованих збурень, має запізнення в каналах управління, а наслідки порушень тяжкі.

Для процесу деалкоголізації вина в потоці функція ефективності знаходиться за межами регламенту і задача підвищення продуктивності та ефективності вимагає від нас наближення до верхнього обмеження без його порушення. Для реалізації функції максимізації продуктивності та енергоефективності роботи ОК з гарантованою відсутністю викидів за нижню межу було розроблено СГК з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту. Після порівняльного аналізу роботи САК базової структури, САК ПДТ та САК СГК

можна зробити наступні висновки:

Хоч серед трьох запропонованих систем СГК є найменш енергоефективною і продуктивною, вона дозволяє досягти найбільш глибокої деалкоголізації виноматеріалу.

В ході виконання п'ятого розділу на базі доступного апаратного та програмного забезпечення (BeagleBone Black + CodeSys V3.5) отримали ПЛК з відкритою архітектурою та підтримкою інтерфейсів UART, I2C, SPI, USB2.0, mini-USB, Ethernet, HDMI, 7AI, 45DI/DO, PWM.

Попередньо алгоритм системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів був розроблений, оптимізований та протестований в середовищі Matlab Simulink, а після переведений з «безперервного» часу в «цифровий». Переконавшись в працездатності отриманого «цифрового» алгоритму конвертували у програмний код у вигляді структурованого тексту для подальшої його реалізації у середовищі програмування CodeSys V3.5.

З використанням підготовленого коду розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом деалкоголізації вина в потоці, а також людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога у вигляді веб-візуалізації.

Також, в ході виконання розділу проведено оцінку економічної ефективності впровадження розробок. Основні результати:

Чистий приведений дохід

$$\text{ЧПД} = 7980.9 * 5 - 691.5 = 39213 \text{ тис. грн}$$

Індекс доходності

$$\text{ІД} = 7980.9 / 691.5 = 11.5$$

Термін окупності

$$\text{ТОІ} = 691.5 / 7980.9 = 0.08 \text{ років}$$

Виробничі, кадрові, науково-технічні, маркетингові можливості підприємства на достатньому рівні, трішки гірші організаційні можливості. Але це обумовлює перспективи для їх розвитку. В цілому, підприємство має

достатній інноваційний потенціал.

Реалізація проекту є доцільною, строк окупності інвестицій буде у межах прийнятого терміну фінансової оцінки проекту.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хобін В. А. Конспект курсу лекцій по дисципліні «Ідентифікація і моделювання об'єктів автоматизації». Одеса-2008 р.
2. Хобін В. А. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з курсу «Ідентифікація і моделювання технологічних об'єктів», Одеса-2000 р.
3. Ужанський В. С. Автоматизація холодильних машин и установок, 1982р. – 304 с.
4. Конспект курсу лекцій з дисципліни “ Теорія автоматичного управління ” (частина I)– Хобін В.А. ОНАХТ. Одеса – 2012 р.
5. Конспект курсу лекцій з дисципліни “ Теорія автоматичного управління ” (частина II)– Хобін В.А. ОНАХТ. Одеса – 2012 р.
6. Методичні вказівки до виконання та оформлення курсової роботи з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів спеціальностей 2105 денної та заочної форм навчання / Укл. В.А. Хобін, - Одеса: ОТІПП, 1992 р. – 15 с.
7. Конспект лекцій з курсу «Автоматизація технологічних процесів та виробництв» для студентів напряму підготовки бакалаврів 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» всіх форм навчання / Укл. Л.М.Сичук, І.М.Світий. – Одеса: ОНАХТ, 2013р. – 88 с.
8. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з курсу «Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації» для бакалаврів 6.050202 денної та заочної форм навчання / Укл.: В. М. Левінський, А.І. Павлов, М.Т. Степанов. – Одеса: ОНАХТ, 2011р. – 13.с
9. Кваліфікаційна робота бакалавра «Автоматизація керування деалкоголізацією вина в потоці з викори-станням термоелектричного теплового насосу» / Пашков С.О. – Одеса: ОНТУ, 2022р. – 221с.
10. Хобін В. А., Левінський М.В. Монографія «Адаптивне керування об'єктами технологічного типу: алгоритми пасивного самоналагодження коефіцієнта передачі регуляторів». Одеса, 2019р. – 227 с.
11. Нечіткі множини та нейронні мережі в системах керування: конспект лекцій /за редакцією О.О. Гурського / Одеська національна академія харчових технологій, 2019. – 92 с.
12. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з курсу «Нечіткі множини та нейронні мережі в системах автоматизації» / Гурський О.О. – Одеса – 2020. – 48с.
13. Системи штучного інтелекту / Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. – Львів: «Магнолія» – 2010. – 279с.
14. Інтелектуальні системи / Литвин В.В., Пасічник В.В., Яцишин Ю.В. – Львів: «Новий Світ» - 2008. - 406с.

15. Штучні нейронні мережі / Руденко О.Г., Бодянський Є.В. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.
16. CODESYS Control for BeagleBone SL | CODESYS Store International - <https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html>
17. Терморегулятори BeagleBone Black, конфігурація штифтів, особливості та застосування (microcontrollerslab.com) - <https://microcontrollerslab.com/beaglebone-black-pinout-pin-configuration-features-applications/>
18. BeagleBone Black — BeagleBoard Documentation - <https://docs.beagleboard.org/latest/boards/beaglebone/black/index.html>
19. Beagleboard:BeagleBoneBlack Debian - eLinux.org - https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays
20. Setting Up the BeagleBone Black's GPIO Pins (vadl.github.io) - <https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio>
21. Модельно-орієнтоване проектування програмного забезпечення для вбудовуваних систем в середовищі Matlab/Simulink. Топораш Г.К., Мазур А.В, Ковальчук Д. А., Пушкін А.А. Одеська Національна Академія Харчових Технологій, м. Одеса, 2014. Available: https://www.researchgate.net/publication/307758793_Modelno-orientirovannoe
22. proektirovanie_programmnogo_obespecenia_dla_vstraivaemyh_sistem_v_srede_MatlabSimulink.
23. Кодер ПЛК Simulink - MATLAB (mathworks.com) <https://www.mathworks.com/products/simulink-plc-coder.html>
24. Simulink PLC Coder(TM) Import (codesys.com) <https://us.store.codesys.com/simulink-plc-coder-import.html>
25. Simulink PLC Coder Import — Product Data Sheet V0.0.0.1 (codesys.com) https://us.store.codesys.com/media/n98_media_assets/files/000062-F/2/Simulink%20PLC%20Coder%20Import_en.pdf
26. Генерація коду - MATLAB і Simulink (mathworks.com) https://www.mathworks.com/help/overview/code-generation.html?s_tid=hc_product_group_bc
27. Кодер ПЛК Simulink Документації (mathworks.com) https://www.mathworks.com/help/plccoder/index.html?s_tid=hc_product_card
28. Обмеження на генерацію структурованого текстового коду - MATLAB і Simulink (mathworks.com) <https://www.mathworks.com/help/plccoder/ug/structured-text-code-generation-limitations.html>
29. Підручник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю «Технологія бродильних виробництв і виноробство» Київ,

2003р-592 с

30. Белоконь Н. И. Основні принципи термодинаміки. — М. : Недра, 1968. — 111 с.
31. Ликов А. В., Михайлов Ю. А. Теорія передачі енергії і речовин. — Мінськ, АН БССР, 1959. — 330 с.
32. Інноваційні технології продуктів бродіння і виноробства: Підруч. / Іванов С.В., Домарецький В.А., Прибильський В.Л. та ін. // За загальною редакцією Іванова С.В. – К.: НУХТ, 2012. – 487с.
33. БОЙКО, Валентин Семенович, et al. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: підручник, книга 3.
34. DISALVO, Francis J. Thermoelectric cooling and power generation. *Science*, 1999, 285.5428: 703-706.
35. Kovalchuk, D., Mazur, A., & Hudz, S. (2017). The model for power efficiency assessment of condensation heating installations. *Automation of Technological and Business Processes*, 9(3). <https://doi.org/10.15673/atbp.v9i3.715>
36. Ковальчук Д., Мазур О., Гудзь, С. (2018). Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: лабораторна установка, вимірювані змінні, автоматизація експериментів. *Automation of Technological and Business Processes*, 10(2). <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i2.981>
37. Ковальчук, Д., & Мазур, О. (2020). Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: імітаційне моделювання. *Automation of Technological and Business Processes*, 11(4), 68-82. <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i4.1601>
38. Малогабаритний термоелектричний вакуумний деалкоголізатор: пат. на винахід 117540 Україна, МПК С12Н 3/02, В01D 3/10. № а201704635; заявл. 13.05.2017 ; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15.
39. Мазур О. В., Грабанова К. Є., Гудзь С. С. Розробка та дослідження імітаційної моделі процесу термовакuumної обробки харчових продуктів як об'єкту керування. *Automation of technological and business processes*. – 2020. – Т. 12. – №. 1. – С. 75-88.
40. Hudz S., Mazur A., Kovalchuk D. The thermoelectric vacuum crock-pot and the automated workplace for its research as a control object. *Automation of technological and business processes*. – 2017. – Т. 9. – №. 2.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЄЮ ВИНА В ПОТОЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСУ DEALCOHOLIZATION OF WINE IN THE FLOW USING A THERMOELECTRIC HEAT PUMP AUTOMATION

Пашков С. О., магістрант,

Pashkov S. O.

Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

ORCID 0000-0003-0202-7015;

e-mail sergypashkov2001@gmail.com

Анотація. Виноробство, в Україні має багатовікову історію. У галузі гостро стоїть питання зменшення вмісту алкоголю в готовій продукції. Також високим є попит на цілком безалкогольне вино. Процес деалкоголізації здійснюється за допомогою різних методів, таких як дистиляція, зворотний осмос або вакуумна деалкоголізація. Останній метод дозволяє як найглибше видалити алкоголь з сировини та при цьому як найкраще зберегти смак і аромат вина. Для виконання технологічного регламенту процесу деалкоголізації вина за допомогою термоелектричних теплових насосів ним необхідно керувати. Для забезпечення високої ефективності та якості процесу керування необхідно автоматизувати цей процес, тому побудова системи автоматичного керування (САК) деалкоголізацією вина є актуальною. Розроблено САК процесу деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу. Для підвищення економічності процесу впроваджено глибоку рекуперацію використанням термоелектричного теплового насосу на елементах Пельтьє. Визначено режими ведення технологічного процесу. Проведено ідентифікацію каналів регулювання моделями першого та другого порядків. Розроблено математичну модель об'єкта керування, яка виявилася адекватною реальному об'єкту. Виконаний оптимальний параметричний синтез САК і розроблені алгоритми автоматичного керування та САК базової структури. Для реалізації алгоритмів логічного керування і регулювання розроблена контролерно-комп'ютерна система і відповідне програмне забезпечення. Створено графічний інтерфейс для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК та фрагменти документації проекту системи автоматизації. Було проведено економічне обґрунтування щодо впровадження розробленої комплексної САК.

Abstract. Winemaking in Ukraine has a centuries-old history. The issue of reducing the alcohol content in finished products is acute in the industry. The demand for completely alcohol-free wine is also high. The dealcoholization process is carried out using various methods, such as distillation, reverse osmosis or vacuum dealcoholization. The last method allows you to remove alcohol from the raw materials as deeply as possible and at the same time preserve the taste and aroma of the wine as best as possible. In order to fulfill the technological regulation of the wine dealcoholization process with the help of thermoelectric heat pumps, it must be controlled. To ensure high efficiency and quality of the management process, it is necessary to automate this process, therefore, the construction of an automatic control system (ACS) for wine dealcoholization is relevant. The ACS of the process of in-flow dealcoholization of wine using a thermoelectric heat pump has been developed. Deep recuperation using a thermoelectric heat pump on Peltier elements was introduced to increase the efficiency of the process. Modes of conducting the technological process are defined. Identification of regulation channels by first- and second-order models was carried out. A control object mathematical model was developed, which turned out to be adequate for the real object. The optimal parametric synthesis of the ARS was performed and the algorithms of automatic control and ARS of the basic structure were developed. A controller-computer system and corresponding software were developed to implement logic control and regulation algorithms. The graphic interface for the automated workplace of the technologist and the ACS adjuster and fragments of the automation system project documentation have been created. An economic justification for the implementation of the developed comprehensive ACS was conducted.

Ключові слова: вино, деалкоголізація, вакуумний дистилятор, тепловий насос, термоелектричний перетворювач, автоматизація, система автоматичного керування.

Keywords: wine, dealcoholization, vacuum distiller, heat pump, thermoelectric converter, automation, automatic control system.

Вступ. Виноградарство, зокрема виноробство, в Україні має багатовікову історію. Сприятливі ґрунтово-

кліматичні умови, відмінні сорти винограду, знання та багаторічний досвід надавали українському вину унікальні смакові та якісні показники. З давніх-давен люди застосовували вино для зміцнення сил і здоров'я, з його допомогою тримали організм в тонусі.

Виноробна промисловість України сьогодні представлена підприємствами первинної та вторинної обробки.

Крім смакових, кольорових та інших властивостей сорти вина відрізняються вмістом спирту. Так у готовому сучасному сухому вині за рахунок підвищення цукровості внаслідок глобального потепління останніми десятиріччями вміст спирту досягає 14%об., при найбільш затребуваному на ринку вині з вмістом спирту 11,5...12%об.. У зв'язку з цим у галузі гостро стоїть питання зменшення вмісту алкоголю в готовій продукції. Також останнім часом підвищується попит на цілком безалкогольне вино.

Процес деалкоголізації здійснюється за допомогою різних методів, таких як дистиляція, зворотний осмос або вакуумна деалкоголізація. Останній метод дозволяє як найглибше видалити алкоголь з сировини та при цьому як найкраще зберегти смак і аромат вина. З урахуванням цього доцільно проводити повну вакуумну деалкоголізацію вина в потоці та змішувати безалкогольне вино з алкогольним, тим самим нормалізувати в необхідних межах вміст алкоголю в готовій продукції.

Процес вакуумної деалкоголізації вина є складним тепломасообмінним процесом випаровування спиртів з виноматеріалу. Для зменшення температури кипіння, з метою зниження деградації смакових та поживних властивостей вина, а також зменшення енерговитрат, випаровування спиртів проводять при низькому тиску. При зниженні тиску до 80 мбар температура кипіння спирту складає 27°C. Цей режим кипіння водно-спиртового розчину називається «точкою азеотропа», нижче якої з вина не випаровується вода, а випаровуються лише спирти та ефіри.

Основним методом підвищення конкурентоспроможності продукції є зниження її собівартості при збереженні якості продукції. Одною з основних складових собівартості продукції при переробці харчової сировини є високі енергетичні витрати. Тому впровадження технологічних процесів з глибокою рекуперацією енергетичних потоків за рахунок використання термоелектричних теплових насосів є актуальною задачею. В умовах використання термоелектричних теплових насосів можна домогтися підвищення якості продукції ще за рахунок використання всіх їх переваг перед традиційними джерелами теплоти.

Для виконання технологічного регламенту процесу деалкоголізації вина за допомогою термоелектричних теплових насосів ним необхідно керувати. Для забезпечення високої ефективності та якості процесу керування необхідно автоматизувати цей процес, тому побудова системи автоматичного керування деалкоголізацією вина є актуальною.

Аналіз літературних даних і постановка проблем

Багато дослідників вивчали питання керування деалкоголізацією вина.

Так Бурдо О. Г. та Семков С. В. запропонували спосіб керування деалкоголізацією вина, в якому поділ вина на рідку і пароподібну фракції, ректифікацію, дефлегмацію і дистиляцію здійснюють в умовах вакууму при тиску 6-16 кПа і температурі нагрівання в нижній зоні відгінної колони 35-50 °С, а підведення теплоти для поділу вина здійснюють за допомогою автономного випарно-конденсаційного циклу [1]. Недоліком даного способу є великі енерговитрати в результаті використання ручного управління та традиційного джерела енергії. Дослідники лабораторії вакуумного винокуріння Pole розробили систему автоматичного управління деалкоголізацією вина, яка містить регулювання температури нагріву куба за допомогою регулятора електрики і електронагрівача та управління вакуумом (насосом) в установці впливом на водоструменевий насос [2]. Недоліком даного способу є великі енерговитрати в результаті використання електронагрівача. Ковалевський К. А. та Скороход В. О. запропонували спосіб автоматичного управління деалкоголізацією вина, в якому після відбору головної фракції спирту вмикають систему регулювання температури в дефлегматорі на відбір основної фракції спирту, забезпечуючи підвід спирту до збірника [3]. Недоліком даного способу є великі енерговитрати в результаті використання електронагрівача. Віршубський І. М. розробив систему автоматичного управління деалкоголізацією вина, в якій регулюють температуру розчину за допомогою електронагрівача і при досягненні робочої температури запускають електрокомпересор, а також регулюють якість очистки зміною витрат рідини, яка надходить в ректифікаційну колону [4]. Недоліком даного способу є великі енерговитрати в результаті використання електронагрівача. Judd B. Lynn, Kelli Lynn Fuller (США) запропонували спосіб автоматичного керування процесом видалення спирту з питної рідини за допомогою вакуумної екстракції, що включає вимірювання та регулювання витрати вина, що контактує з розподільною поверхнею, вимірювання та регулювання внутрішнього тиску посудини та вимірювання та регулювання температури вина [5]. Недоліком цього способу автоматичного керування є великі енерговитрати на нагрів сировини, через високу температуру кипіння, та на фазовий перехід рідина-пара, через випаровування не тільки спиртів та ефірів, а й води. Salazar-Ordóñez M., Ramirez-Gonzalez G., Rodriguez-Gonzalez V., Cruz-Villarreal C. розробили систему автоматичного управління на основі нечіткої логіки і нейронних мереж для управління процесом вакуумної дистиляції при деалкоголізації вина, для оцінки залишкового вмісту спирту в вині, на який впливають температура, час, рівень вакууму та початковий вміст алкоголю, та на його основі регулювання температури процесу дистиляції в режимі реального часу [6]. Aksoy A., Calisir M., Tokatli F. Запропонували алгоритм управління процесом дистиляції, який використовує його динамічну модель для прогнозування поведінки системи і оптимізації параметрів в режимі реального часу, яка враховує тепломасообмін в ректифікаційній колоні, вплив вакууму, а також зміни властивостей вина в міру видалення спирту. Система включає аварійне відключення і сигналізацію, яка спрацьовує, якщо параметри перевищують заданий діапазон або за аварійної ситуації. Система контролює

температуру, тиск і витрати вина і пари, та керує вакуумом і системами нагріву та охолодження [7]. Sambuceti V., Dodero F., Torchio L., Giacosa S., Gerbi V. Розробили систему автоматичного управління регулювання температури і тиску дистиляції шляхом зміни вхідного і вихідного потоків вина та систему оптимізації продуктивності та забезпечення безпечного і ефективного видалення алкоголю з вина [8]. James F. Harbertson, Nadia V. Ayala, Thomas A. Henick-Kling запропонували спосіб автоматичного керування процесом вакуумної дистиляції вина що передбачає вимірювання та регулювання температури та тиску в процесі перегонки. Система може бути запрограмована для досягнення цільового рівня зменшення алкоголю і автоматично відключається після досягнення цього рівня [9]. Fernandez-Ruiz R., Rodriguez-Molina L., Carmona-Garcia A., and Francisco Rodriguez-Blanco J. розробили систему автоматичного управління регулювання температури, тиску і часу перебування процесу на основі заданих значень [10]. Останні п'ять рішень мають загальний недолік – низьку надійність функціонування та низьку ефективність керування.

В одеському національному технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів та робототехнічних систем в рамках випускної роботи магістранта запропоновано ефективну систему керування деалкоголізацією вина в потоці, яка забезпечує високу надійність функціонування.

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності керування деалкоголізацією вина в потоці шляхом розробки ефективної системи автоматичного керування процесом, яка б забезпечувала високу надійність роботи обладнання для деалкоголізації за рахунок підтримки регульованих змінних на регламентному рівні та забезпечення безвідмовності устаткування.

Для забезпечення цієї мети досліджень необхідно виконати наступні завдання:

- Вивчення процесу деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу;
- Конкретизація та розробка регламентів регулювання основних параметрів процесу;
- Декомпозиція процесу на структурні елементи, розробка математичних моделей цих елементів та реалізація імітаційної моделі в середовищі Matlab Simulink;
- Розробка та параметрична оптимізація алгоритмів регулювання, порівняння різних САР тема;
- Складання алгоритмів керування устаткуванням, що забезпечують безвідмовність його роботи;
- Вибір технічних засобів автоматизації;
- Розробка контролерно-комп'ютерної мережі, програмування ал-горитмів регулювання та логічного керування САК деалкоголізацією вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу;
- Розробка SCADA для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК
- Розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК, включаючи питання охорони праці
- Попереднє обґрунтування економічної доцільності реалізації роботи

Методи і матеріали досліджень

Основним методом проведеного дослідження був метод системного аналізу. Для ідентифікації моделей об'єкта було використано такі методи: аналітичного моделювання, активного експерименту, пасивного експерименту, типової статистичної ідентифікації та інженерні методики ідентифікації моделей об'єкта керування [11]. При синтезі системи автоматичного регулювання було використано методи теорії автоматичного керування, а саме інженерні методики параметричного синтезу систем регулювання, оптимального параметричного синтезу [12], методи нечітких множин та нейронних мереж, методи теорії. Основним експериментальним методом обрано метод імітаційного моделювання.

Результати досліджень

Спочатку було проаналізовано технологічний процес вакуумної деалкоголізації вина (виділення спиртів з вина) з використанням термоелектричних теплових насосів, який здійснюється наступним чином.

Вакуумний насос Н4 підтримує тиск в системі (ресивері) на рівні 50-70 мБар. З приймальної ємності 1, що знаходиться під атмосферним тиском, насосом Н1 через рекуперативний підігрівач 13 виноматеріал подається у випарник 5. В ньому тепловий потік від «гарячої сторони» термоелектричного перетворювача (ТЕП) (теплового насосу) 15 нагріває вино до температури +28°C та випаровує спирти. Деалкоголізований виноматеріал надходить у попередній збірник ДВ 11, звідки відкачується насосом Н2 через рекуперативний підігрівач 13 в ємність 2 під атмосферним тиском. Суміш парів з випарника 5 під дією перепаду тиску в паропроводі через попередній охолоджувач 14 надходять у конденсатор. В конденсаторі тепловий потік від «холодної сторони» ТЕП 16 охолоджує, конденсує пари та переохолоджує конденсат до температури +15...19°C. Спиртовий конденсат збирається у збірнику 12 звідки насосом Н3 відкачується у ємність 3 з атмосферним тиском. Пари головної фракції відкачуються вакуумним насосом Н4 в ємність 4, де під дією атмосферного тиску конденсуються. Залишкове повітря видаляється в атмосферу. Тепловий потік з "гарячої сторони" ТЕП 16 відводиться за допомогою теплових труб 9 до радіатора 10, що охолоджується вентилятором В5. В якості ТЕП 15 та 16 використовуються декілька термоелектричні модулі на елементах Пельтьє. Було здійснено параметризацію технологічної схеми (рис. 1).

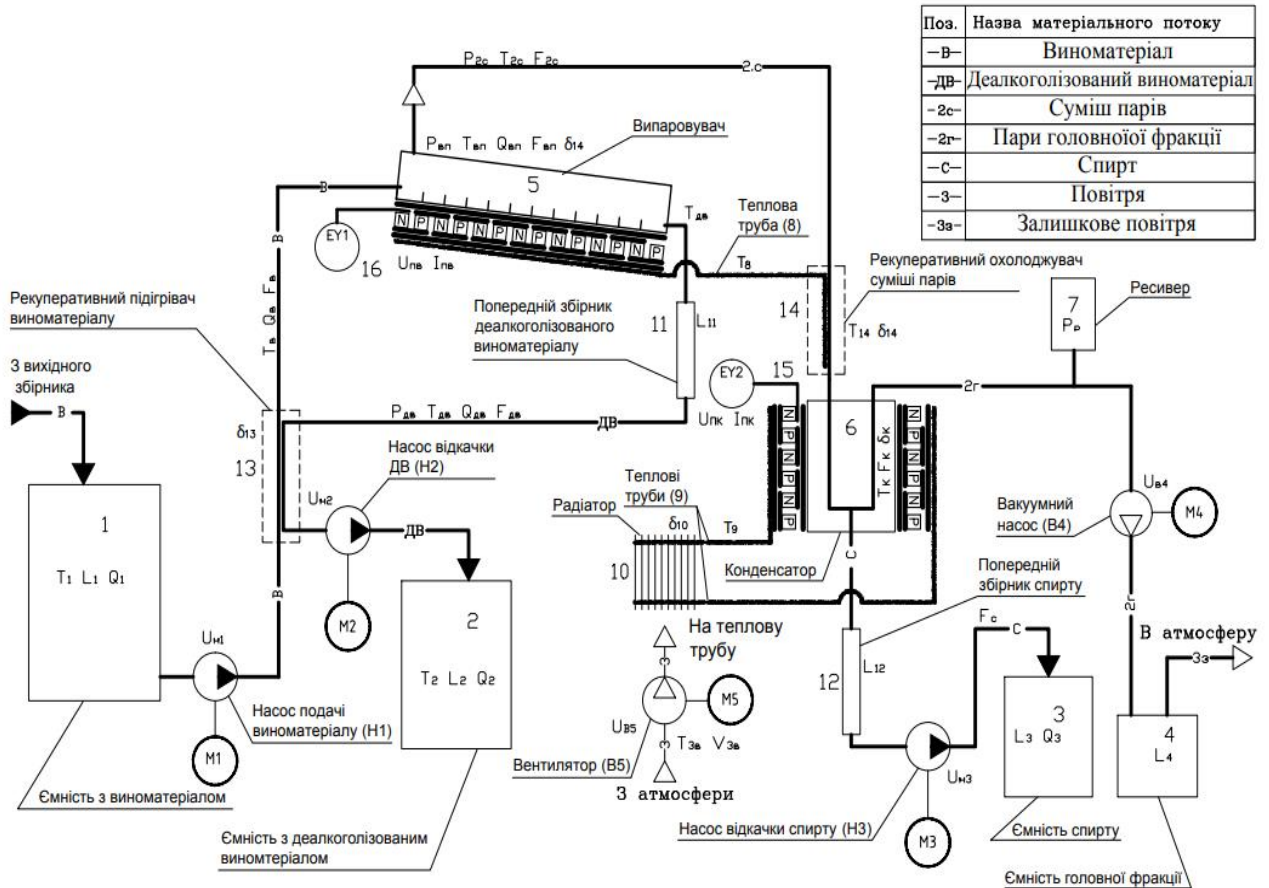
Проведено аналіз нормативів ведення технологічного процесу та експлуатації обладнання, визначено регламенти та умови ведення процесу. Складено параметричну схему технологічного процесу (рис. 2).

Для здійснення процесу вакуумної деалкоголізації вина необхідно підтримувати на заданому рівні такі технологічні параметри:

- тиск в ресивері P_r шляхом зміни частоти обертання вакуумного насосу n_{H4} ;
- температуру деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника Тдв, шляхом зміни струму ТЕП

випарника U_{lv} ;

- температуру в конденсаторі T_k шляхом зміни струму ТЕП конденсатора U_{pk} .



T_1 – температура у ємності з виноматеріалом, °C;

T_k – температура в конденсаторі, °C;

L_1 – рівень у ємності з виноматеріалом, м;

F_k – витрата (конденсація) спирту в конденсаторі, кг/с;

Q_1 – концентрація спирту у ємності з виноматеріалом, %;

F_c – витрата спирту після насоса відкачки спирту, кг/с;

T_2 – температура у ємності з деалкоголізованим виноматеріалом, °C;

P_p - тиск у ресивері, мБар;

L_2 – рівень у ємності з деалкоголізованим виноматеріалом, м;

T_8 – температура теплових трубок 8, °C;

T_9 – температура теплових трубок 9, °C;

Q_2 – концентрація спирту у ємності з деалкоголізованим виноматеріалом, %;

T_{3v} – температура навколишнього середовища, °C;

L_3 – рівень у ємності спирту, м;

V_{3v} – об’єм прокачуємого повітря повітряним вентилятором, м³;

Q_3 – концентрація спирту у ємності спирту, %;

δ_{13} – конструктивні особливості рекуперативного підігрівача виноматеріалу;

L_4 – рівень у ємності головної фракції, м;

T_v – температура виноматеріалу після рекуперативного підігрівача виноматеріалу, °C;

T_{14} – температура в рекуперативному охолоджувачі суміші парів, °C;

F_v – витрата виноматеріалу після рекуперативного підігрівача виноматеріалу, кг/с;

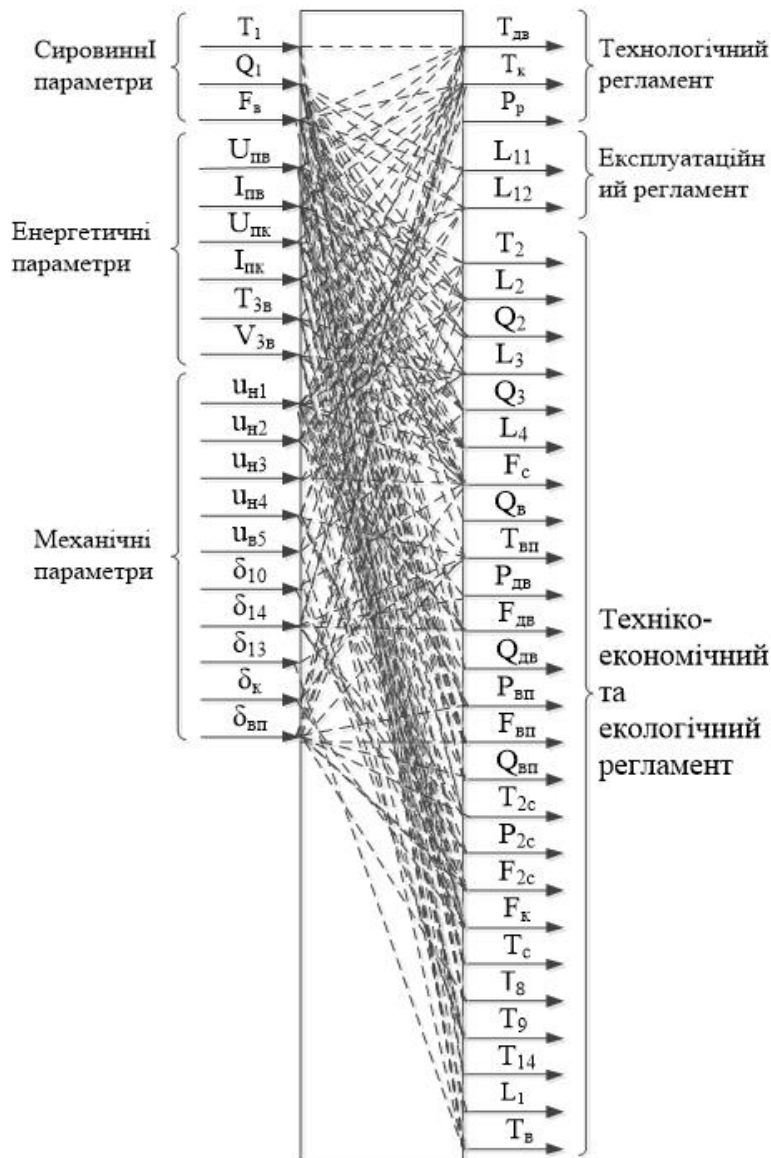
δ_{14} – конструктивні особливості рекуперативного охолоджувача суміші парів;

Q_v – концентрація спирту в виноматеріалі після рекуперативного підігрівача виноматеріалу, %;

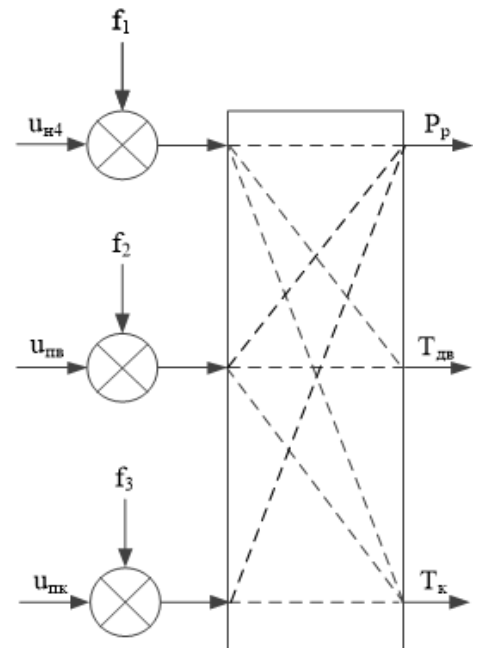
L_{11} – рівень в попередньому збірнику

$T_{дв}$ – температура ДВ на виході з випарника, °С;	виноматеріалу, м;
$P_{дв}$ – тиск деалкоголізованого виноматеріалу, мБар;	L_{12} – рівень в попередньому збірнику спирту, м;
$F_{дв}$ – витрата деалкоголізованого виноматеріалу, кг/с;	$\delta_{вп}$ – конструктивні особливості випарника;
$Q_{дв}$ – концентрація спирту у деалкоголізованого виноматеріалі, %;	$\delta_{к}$ – конструктивні особливості конденсатора;
$T_{вп}$ – температура у випарнику, °С;	δ_{10} – конструктивні особливості радіатора;
$P_{вп}$ – тиск у випарнику, мБар;	$u_{н1}$ – робота насосу подачі виноматеріалу Н1;
$F_{вп}$ – витрата у випарнику, кг/с;	$u_{н2}$ – робота насосу відкачки ДВ Н2;
$Q_{вп}$ – концентрація спирту у випарнику, %;	$u_{н3}$ – робота насосу відкачки спирту Н3;
$T_{2с}$ – температура суміші парів, °С;	$u_{н4}$ – робота вакуумного насосу Н4;
$P_{2с}$ – тиск суміші парів, мБар;	$u_{в5}$ – робота повітряного вентилятора В5;
$F_{2с}$ – витрата суміші парів, кг/с;	$U_{пв}$ – напруга живлення термоелектричних елементів Пельтьє випарника, В;
	$I_{пв}$ – струм живлення ТЕП випарника, А;
	$U_{пк}$ – напруга живлення ТЕП конденсатора, В;
	$I_{пк}$ – струм живлення ТЕП конденсатора, А.

Рисунок 1. – Параметризована технологічна схема процесу деалкоголізації вина



Тобто поставлено такі задачі регулювання: стабілізація $P_p, T_{дв}, T_k$ та побудовано структурну схему об'єкта керування (рис. 3).



f_1, f_2, f_3 – неконтрольовані збурення.
Рисунок 3. - Структурна схема об'єкта керування

Далі було розроблено математичну модель процесу деалкоголізації вина, та побудовано структурну схему імітаційної моделі (рис. 4).

Рисунок 2. – Параметрична схема процесу деалкоголізації

Розроблено математичні моделі ТЕП, випарника, конденсатора, теплопередачі через плоску стінку, паропроводу, відкачки газів та вентилятора та здійснено їх реалізацію у середовищі Matlab Simulink.

Наступним кроком було об'єднання імітаційної моделі в єдину загальну підсистему та проведення на ній активного експерименту з отриманням перехідних та квазістатичних характеристик моделі та обґрунтуванням їх адекватності об'єкту.

Проведено параметричну ідентифікацію моделей першого та другого порядків за каналами $u_{пв} - T_{дв}, u_{пк} - T_k, u_{н4} - P_p$.

Наступним етапом була побудова САР базової структури за замкненим принципом керування (рис. 5).

Далі було проведено параметричний синтез САР та оптимальний синтез САР ПІ- та ПІД-алгоритмами регулювання за модульним інтегральним критерієм.

Зроблено порівняльний аналіз перехідних процесів в параметрично оптимальних системах за значенням критерію оптимальності та показниками, для яких встановлені гранично-допустимі значення.

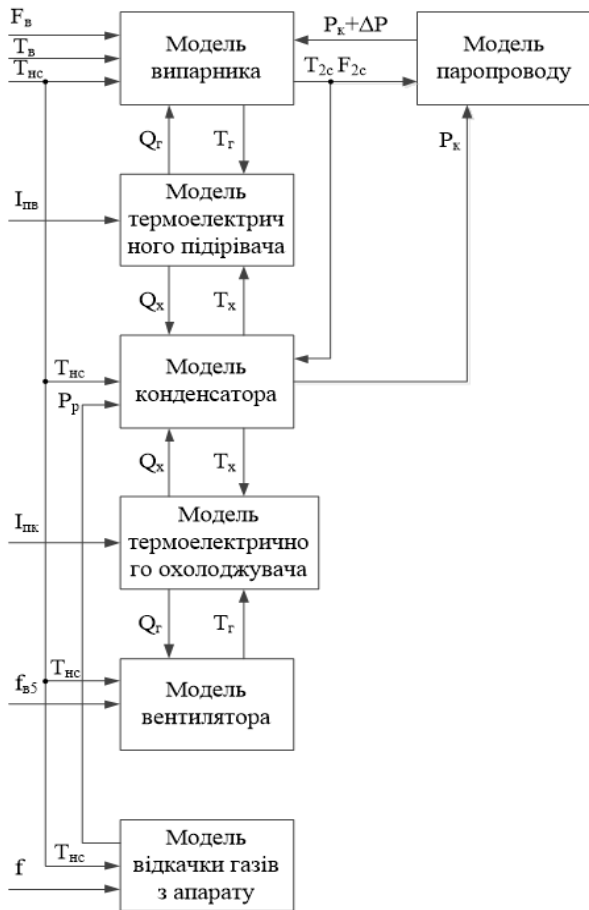
Перевірка САР за всіма каналами на грубість показала, що система з ПІ та ПІД регуляторами є грубими.

Наступним етапом було складання регламенту функціонування та алгоритмів пуску-зупинки лінії з деалкоголізації вина в штатному та аварійному режимах, розробка функціональної логічної схеми, її реалізація в середовищі Matlab Simulink.

Далі було здійснено вивчення характеристик середовища, з яким взаємодіють засоби автоматизації та обслуговуючий персонал, які повинні бути враховані при виборі технічних засобів та місць їх розміщення.

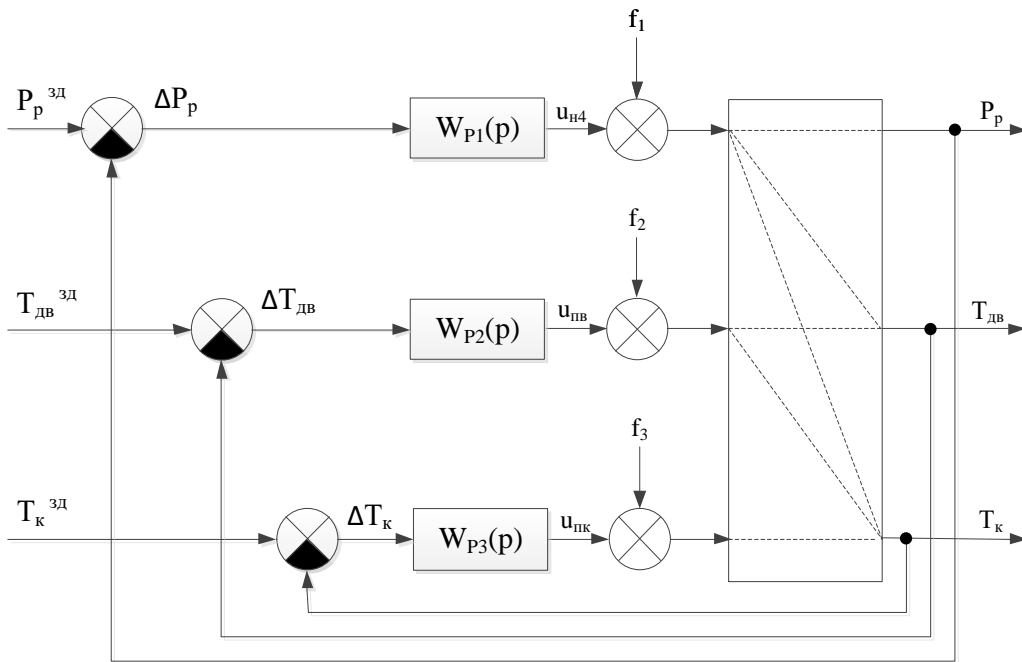
У ході технологічного процесу деалкоголізації вина обов'язково виникають горючі гази та рідини, тому виробниче приміщення можна віднести до вибухо- та пожежонебезпечного середовища. З урахуванням цього було обрано технічні засоби автоматизації.

Датчики та виконавці механізми розміщуються безпосередньо на технологічному устаткуванні та трубопроводах лінії. Інше технічне обладнання системи керування та АРМ оператора-технолога знаходиться в окремому приміщенні.



F_v – витрата виноматеріалу після рекуперативного підігрівача виноматеріалу;
 T_v – температура виноматеріалу після рекуперативного підігрівача виноматеріалу;
 T_{2c} – температура суміші парів;
 F_{2c} – витрата суміші парів;
 P_p – тиск у ресивері;
 P_k – тиск у конденсаторі;
 $I_{пв}$ – струм ТЕП випарника;
 $I_{пк}$ – струм ТЕП конденсатора;
 $T_{нс}$ – температура навколишнього середовища;
 $T_{гв}$ – температура гарячої сторони ТЕП випарника;
 $Q_{гв}$ – тепловий потік від гарячої сторони ТЕП випарника;
 $T_{хв}$ – температура холодної сторони ТЕП випарника;
 $Q_{хв}$ – тепловий потік від холодної сторони ТЕП випарника;
 $T_{гк}$ – температура гарячої сторони ТЕП конденсатора;
 $Q_{гк}$ – тепловий потік від гарячої сторони ТЕП конденсатора;
 $T_{хк}$ – температура холодної сторони ТЕП конденсатора;
 $Q_{хк}$ – тепловий потік від холодної сторони ТЕП конденсатора;
 f – частота обертання насоса;
 $f_{в.5}$ – частота обертання вентилятора.

Рисунок 4. – Структурна схема імітаційної моделі



$P_p^{зд}$ – задане значення тиску у ресивері;
 ΔP_p – помилка регулювання тиску у ресивері;
 $W_{P1}(p)$ – передаточна функція регулятора тиску у ресивері;
 $T_{дв}^{зд}$ – задане значення температури ДВ на виході з випарника;
 $\Delta T_{дв}$ – помилка регулювання температури ДВ на виході з випарника;
 $W_{P2}(p)$ – передаточна функція регулятора температури ДВ на виході з випарника;
 $T_{к}^{зд}$ – задане значення температури в конденсаторі;
 $\Delta T_{к}$ – помилка регулювання температури в конденсаторі;
 $W_{P3}(p)$ – передаточна функція регулятора температури в конденсаторі.

Рисунок 5 – Структурна схема САР базової структури

Далі було розроблено технічну структуру мікропроцесорного ядра контролерно-комп'ютерної мережі системи керування на базі контролера S7-300 фірми Siemens.

Програмування алгоритмів регулювання та логічного керування САК технологічним процесом було здійснено в пакеті CodeSys на базі контролера ОВЕН ПЛК 160-24Х.А з необхідним набором модулів ПЗО.

Проведене в режимі емуляції тестування програми підтвердило коректність її роботи, відповідно до алгоритму керування.

Було розроблено SCADA-систему в середовищі WinCCFlexible для автоматизованого робочого місця оператора-технолога і наладчика САК, для чого передбачено наступні екрани: «Технологічна схема», «Графіки», «Повідомлення» «Допомога», «Налаштування регуляторів» (рис. 6).

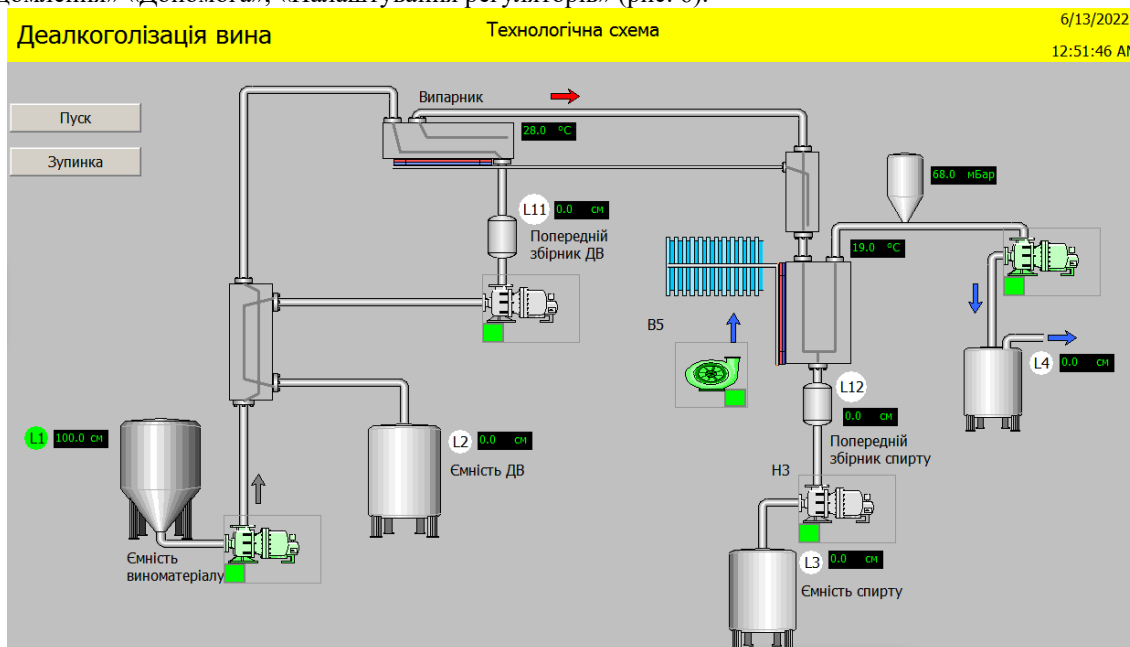


Рисунок 6 - Екранна форма «Технологічна схема».

Розроблене АРМ дозволяє контролювати хід технологічного процесу деалкоголізації вина, задавати режими роботи установки, здійснювати перемикання режимів керування обладнанням (АВТ / РУЧ) і керувати в ручному режимі окремим обладнанням, проводити настроювання і налагодження САК, відображати динаміку зміни технологічних параметрів, вести журнали подій, проводити адміністрування користувачів програми.

В ході виконання розділу було розроблено варіант комплексу технічної документації для САК на базі контролера фірми Siemens – SIMATIC S7-300, а саме схема автоматизації, принципові електричні схеми, принципова електрична схема живлення, загальний вид щита оператора.

Розглянуто основні питання, пов'язані з охороною праці при експлуатації системи автоматичного керування процесом деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричних теплових насосів, а також економічної ефективності впровадження розробленої системи. Виходячи з розрахунків, проект модернізації САК є інвестиційно вигідним, тому що приріст чистого прибутку більше нуля та складає – 47779,45 грн, також при цьому чистий грошовий потік за період реалізації проекту більше нуля і дорівнює 239045,63 грн.

Обговорення результатів

В якості підігрівача та охолоджувача застосовано термоелектричні теплові насоси. Для оснащення теплообмінника високоякісною САР температури ДВ на виході випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері побудовано математичну модель технологічного процесу. Оскільки нині під час аналізу та синтезу складних систем широке розповсюдження отримав аналітичний метод моделювання він був використаний в даному дослідженні при розробці математичних моделей процесу деалкоголізації вина в потоці як об'єкту керування. Було отримано комплекс математичних моделей процесу деалкоголізації вина в потоці, що включає математичні моделі термоелектричного підігрівача (охолоджувача), випарника, моделі теплопередачі через плоску стінку, паропроводу, конденсатора, вакуумної системи, вентилятора, отримані моделі було відтворено у середовищі імітаційного моделювання.

На імітаційній моделі процесу деалкоголізації вина в потоці були отримані квазістатичні залежності тиску в ресивері від частоти обертання вакуумного насоса при різних температурах в конденсаторі. В результаті чого було визначено, що при малих розрідженнях проникання (підсос) повітря малий, та система виде себе як астатична, але при збільшенні розрідження підсос збільшується та система стає статичною, тобто витрати проникнутого повітря в апарат лінійно залежить від різниці тисків(атмосферного та розрідженням в апараті). Це пояснює зменшення коефіцієнта передачі насоса.

Також отримані квазістатичні залежності температури ДВ на виході з випарника від струму ТЕП випарника при різних температурах в конденсаторі та при різних тисках в ресивері. З них видно, що температура ДВ визначається здебільшого розрідженням у випарнику, який в свою чергу залежить від розрідження в конденсаторі

та перепаду тиску в паропроводі який з'єднує випарник з конденсатором. Цей перепад розрідження залежить від його гідравлічного опору та витрат пару з випарника. В свою чергу розрідження в конденсаторі залежить від температури в ньому та тиску в ресивері. В зоні до 33% максимального струму ТЕП випарника при $T_k=19^\circ\text{C}$ $P_p=68\text{мБар}$ та спостерігається випаровування спиртів.

Також отримані квазістатичні залежності температури в конденсаторі від струму ТЕП конденсатора при різних витратах виноматеріалу та при різних тисках в ресивері. Визначено, що температура в конденсаторі визначається кількістю парів, яка в свою чергу залежить від витрати виноматеріалу, та температурою конденсації алкоголю, яка в свою чергу залежить від тиску в ресивері.

За результатами проведеного активного експерименту виявлено, що за усіма каналами об'єкт має статичні властивості

Зроблено порівняльний аналіз перехідних процесів в параметрично оптимальних системах за значенням критерію оптимальності та показниками, для яких встановлені гранично-допустимі значення (рис. 7).

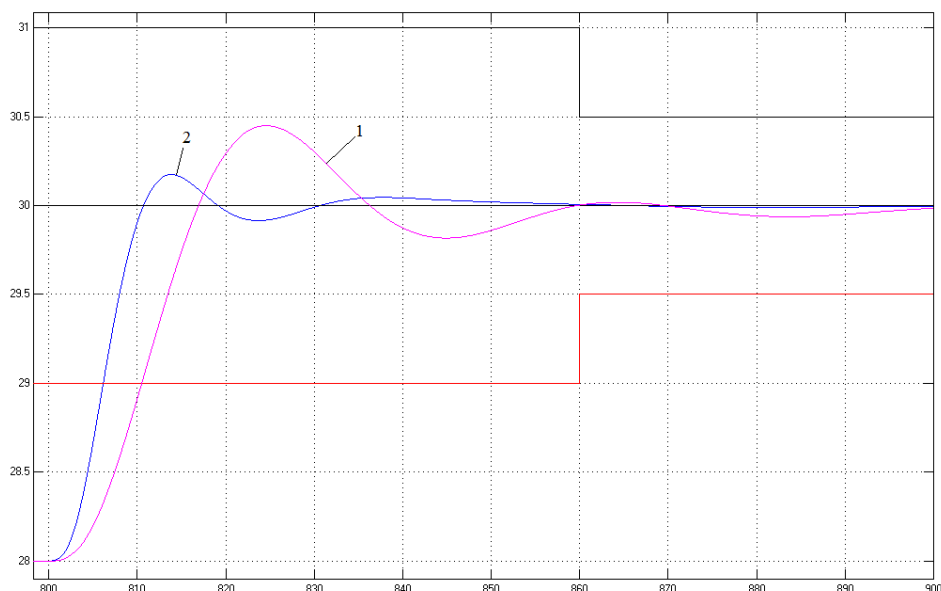


Рис. 7 – Результати порівняння варіантів САР температури ДВ на виході з випарника: 1 – САР з ПІ-регулятором; 2 – САР з ПІД-регулятором.

Таблиця 1 – Результати порівняння варіантів САР

Алгоритм регулювання	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta T_{\text{ДВ}}^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{ПІ}}, ^\circ\text{C}$	
ПІ	0,4	10.1	29.95
ПІД	0,2	8	14.89

Як видно з результатів порівняння перехідних процесів, САР з ПІД-регулятором є кращою за усіма показниками. Тому ПІД-закон регулювання будемо використовувати і надалі.

Спираючись на попередній досвід роботи з дослідження САР з різними регуляторами, був зроблений висновок про доцільність розгляду структурних схем САР тільки з ПІ - і ПІД-регуляторами, так як вони дають найкращі прямі та інтегральні показники якості і в достатній мірі забезпечують працездатність системи.

Для регулювання тиску в ресивері та температури вина у випарнику краще застосовувати ПІД-регулятор. Тому, що за більшістю показників якості САР з ПІД-регуляторами є кращою, ніж САР з ПІ-регуляторами. Для регулювання температури конденсації алкоголю краще застосовувати ПІ-регулятор. Тому, що за більшістю показників якості САР температури конденсації алкоголю з ПІ-регулятором є кращою, ніж САР з ПІД-регулятором.

Висновки

Розроблено САК процесу деалкоголізації вина в потоці з використанням термоелектричного теплового насосу.

Для підвищення економічності процесу впроваджено глибоку рекуперацію використанням термоелектричного теплового насосу на елементах Пельтьє.

Визначено режими ведення ТП.

Проведено ідентифікацію каналів регулювання моделями першого та другого порядків.

Розроблено математичну модель ОК, яка виявилася адекватною реальному об'єкту.

Виконаний оптимальний параметричний синтез САР і розроблені алгоритми автоматичного керування та САР базової структури.

Для реалізації алгоритмів логічного керування і регулювання розроблена контролерно-комп'ютерна система і відповідне програмне забезпечення.

Створено графічний інтерфейс для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК та фрагменти документації проекту системи автоматизації.

Було проведено економічне обґрунтування щодо впровадження розробленої комплексної САК.

Список використаних джерел

1. Патент України на винахід 116075 «Спосіб dealкоголізації вина і установка для його здійснення (варіанти)» / Бурдо О. Г., Семков С. В. МПК C12G 3/08, C12H 3/00, C12F 3/00. Заявл. 10.04.2017 № а 2017 03470. Опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2.

2. Устройства автоматики / Лаборатория вакуумного винокурения Pole. – URL: <https://svhdlab.co/устройства-автоматики/>.

3. Патент України на винахід 24423 А «Вакуум-перегонна установка для коньячного і плодового спирту» / Ковалевський К. А., Скороход В. О. МПК C12G 3/12, B01D 3/10. Заявл. 18.04.1997 № 97041855. Опубл. 30.10.1998, бюл. № 5.

4. Патент України на винахід 15812 «Установка для розділення двокомпонентного розчину» / Віршубський І. М. МПК B01D 3/10. Заявл. 28.05.1993 № 94041009. Опубл. 30.06.1997, бюл. № 3.

5. Заявка на винахід, США №: 20130243922 A1. Removal of alcohol from potable liquid using 50 vacuum extraction / Judd B. Lynn, Kelli Lynn Fuller. Опубл. 19.09.2013.

6. Salazar-Ordóñez M., Ramirez-Gonzalez G., Rodriguez-Gonzalez V., Cruz-Villarreal C. Automatic Control of Vacuum Distillation in Wine Dealcoholization Process Using Fuzzy Logic and Neural Networks, журнал номер год.

7. Aksoy A., Calisir M., Tokatli F. Dynamic Modeling and Automatic Control of Vacuum Distillation for Dealcoholization of Wine, журнал номер год.

8. Sambuceti V., Doderio F., Torchio L., Giacosa S., Gerbi V. Real-time Monitoring and Automatic Control of Vacuum Distillation in the Dealcoholization of Wine, журнал номер год.

9. James F. Harbertson, Nadia V. Ayala, Thomas A. Henick-Kling Automated Control Strategies for the Vacuum Distillation of Wine to Remove Alcohol, Journal of Food Science 2008

10. Fernandez-Ruiz R., Rodriguez-Molina L., Carmona-Garcia A., and Francisco Rodriguez-Blanco J. Optimization of the Vacuum Distillation Process for Wine Dealcoholization: The Role of Automatic Control

11. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форми навчання. – Одеса: ОНАХТ, 2016. – 96с.

12. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форми навчання. – Одеса: ОНАХТ, 2012. – Ч1 – 112с.

References

1. Patent Ukraine na vynakhid 116075 «Sposib dealkoholizatsii vyna i ustanovka dlia yoho zdiisnennia (varianty)» / Burdo O. H., Semkov S. V. MPK C12G 3/08, C12H 3/00, C12F 3/00. Zaiavl. 10.04.2017 № a 2017 03470. Opubl. 25.01.2018, Biul. № 2.

2. Ustroistva avtomatyky / Laboratoriya vakuumnogo vynokurennya Pole. – URL: <https://svhdlab.co/ustroistva-avtomatyky/>.

3. Patent Ukraine na vynakhid 24423 A «Vakuum-perehonna ustanovka dlia koniachnogo i plodovogo spyrtu» / Kovalevskiy K. A., Skorokhod V. O. MPK C12G 3/12, B01D 3/10. Zaiavl. 18.04.1997 № 97041855. Opubl. 30.10.1998, biul. № 5.

4. Patent Ukraine na vynakhid 15812 «Ustanovka dlia rozdilennia dvokomponentnogo rozchynu» / Virshubskiy I. M. MPK B01D 3/10. Zaiavl. 28.05.1993 № 94041009. Opubl. 30.06.1997, biul. № 3.

5. Zaiavka na vynakhid, SShA №: 20130243922 A1. Removal of alcohol from potable liquid using 50 vacuum extraction / Judd B. Lynn, Kelli Lynn Fuller. Opubl. 19.09.2013.

6. Salazar-Ordóñez M., Ramirez-Gonzalez G., Rodriguez-Gonzalez V., Cruz-Villarreal C. Automatic Control of Vacuum Distillation in Wine Dealcoholization Process Using Fuzzy Logic and Neural Networks, zhurnal nomer hod.

7. Aksoy A., Calisir M., Tokatli F. Dynamic Modeling and Automatic Control of Vacuum Distillation for Dealcoholization of Wine, zhurnal nomer hod.

8. Sambuceti V., Doderio F., Torchio L., Giacosa S., Gerbi V. Real-time Monitoring and Automatic Control of Vacuum Distillation in the Dealcoholization of Wine, zhurnal nomer hod.

9. James F. Harbertson, Nadia V. Ayala, Thomas A. Henick-Kling Automated Control Strategies for the Vacuum Distillation of Wine to Remove Alcohol, Journal of Food Science 2008

10. Fernandez-Ruiz R., Rodriguez-Molina L., Carmona-Garcia A., and Francisco Rodriguez-Blanco J. Optimization of the Vacuum Distillation Process for Wine Dealcoholization: The Role of Automatic Control

11. Khobin V. A. Konspekt lektzii z kursu «Identyfikatsiia ta modeliuvannia tekhnolohichnykh ob'iektiv» dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 151 «Avtomatyzatsiia ta komp'uterno-intehrovani tekhnolohii» dennoi ta zaochnoi formy navchannia. – Odesa: ONAKhT, 2016. – 96s.

12. Khobin V. A. Konspekt lektzii z kursu «Teoriia avtomatychnogo keruvannia» dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 151 «Avtomatyzatsiia ta komp'uterno-intehrovani tekhnolohii» dennoi ta zaochnoi formy navchannia. – Odesa: ONAKhT, 2012. – Ch1 – 112s.

УДК 681.5.01 : 663.2 : 621.577

**АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БЕЗПЕРЕРВНОЇ
ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЇ ВИНА В ВАКУУМНОМУ
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОМУ ДИСТИЛЯТОРІ****С. О. Пашков, магістрант кафедри автоматизації технологічних
процесів і робототехнічних систем****Д. С. Петренко, магістрант кафедри автоматизації технологічних
процесів і робототехнічних систем****О. В. Мазур, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації
технологічних процесів і робототехнічних систем**

Одеський Національний Технологічний Університет

E-mail: mazur.a.v.ua@gmail.com

Анотація. Робота присвячена розробці системи автоматичного керування процесом безперервної деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі. Складено параметризовану технологічну схему процесу як об'єкту керування, виділено основні параметри, що підлягають регулюванню, а саме: тиск у ресивері, температура деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника, температура в конденсаторі, визначено їх технологічні регламенти. Визначені відповідні керуючі дії: частота обертання вакуумного насоса, струм термоелектричного перетворювача випарника, струм термоелектричного перетворювача конденсатора. Розроблено структурну схему технологічного процесу деалкоголізації вина як об'єкту керування. На імітаційній моделі вакуумного дистилятора в середовищі Matlab Simulink проведені експерименти з дослідження динамічних властивостей основних каналів перетворень. З отриманих перехідних характеристик визначено передатні функції каналів регулювання. Проведено синтез тримірної системи автоматичного керування температури деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері. Розраховані початкові налаштування регуляторів, проведена параметрична оптимізація їх налаштувань та отримані перехідні характеристики регульованих змінних при східчастих вхідних впливах. Отримані системи автоматичного керування температури деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері перевірені на грубість при дії параметричних збурень.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач, вакуумний дистилятор, деалкоголізація, система автоматичного керування.

Актуальність. В бродильних виробництвах при виготовленні алкогольних напоїв постає проблема нормалізації вмісту алкоголю в готовому продукті. Процес деалкоголізації застосовується для зменшення вмісту алкоголю в одних продуктах та отримання спирту для зміцнення інших. Для підвищення

енергоефективності процесу видалення алкоголю та поліпшення якості отриманих продуктів зазвичай використовується вакуумна дистиляція у плівкових випарниках. Використання термоелектричних перетворювачів (ТЕП) є одним з шляхів зниження енергетичних витрат та зменшення рівня теплових «енергетичних відходів» при реалізації таких процесів. ТЕП підігрівають виноматеріал і випаровують спирти та охолоджують і конденсують пари спирту. Але їх введення збільшує кількість взаємозв'язків в ОК, що безумовно ускладнює керування ТП. Тому розробка ефективних алгоритмів керування таким процесом є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Процес деалкоголізації вина досить енергоємний і може відбуватися в апаратах як періодичної, так і безперервної дії. Нагрів продукту та охолодження дистиляту виконують різними методами, але використання теплових насосів є одним з шляхів суттєвого зниження енергетичних витрат та відповідно зменшення рівня теплових «енергетичних відходів» в технологічних процесах харчової промисловості [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Аналіз літературних джерел вказує, що використання термоелектричних перетворювачів в якості теплових насосів дозволяє створювати компактні установки з низькою матеріалоємністю та високою енергетичною ефективністю [4, 5, 6]. В [5] розроблено та досліджено імітаційну модель процесу термовакuumної обробки харчових продуктів як об'єкту керування. В винаході [4] термоелектричні перетворювачі використовувались для забезпечення теплових параметрів процесу та рекуперації тепла у малогабаритному термоелектричному вакуумному деалкоголізаторі періодичної дії. В [6] розглянута термоелектрична вакуумна мультиварка та автоматизоване робоче місце для її дослідження як об'єкту керування.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка багатомірної САК процесом деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі безперервної дії.

Матеріали і методи дослідження. Основним методом проведеного дослідження є метод системного аналізу. Ідентифікація моделей об'єкта

виконувалась за інженерною методикою ідентифікації моделей об'єктів керування [7]. При синтезі системи автоматичного керування використані методи параметричного синтезу систем керування та оптимального параметричного синтезу [8]. Основним експериментальним методом обрано метод імітаційного моделювання.

Результати дослідження та їх обговорення. Параметризована технологічна схема процесу безперервної dealкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі наведена на рис. 1.

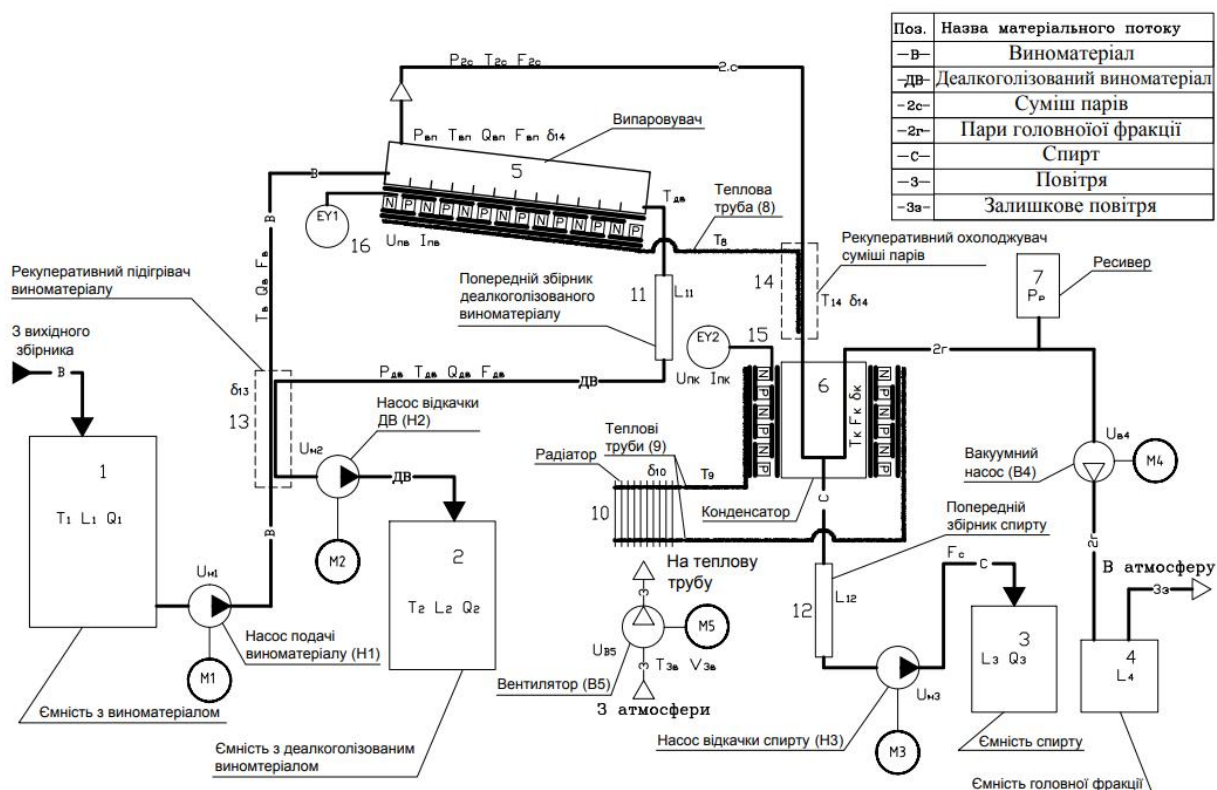


Рис. 1 – Параметризована технологічна схема процесу безперервної dealкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі

Технологічне обладнання вакуумної системи, в якій реалізується процес безперервної dealкоголізації вина, складається з випарника 5, конденсатора 6, ресивера 7, попереднього збірника dealкоголізованого виноматеріалу 11, попереднього збірника спирту 12, рекуперативного підігрівача виноматеріалу 13, попереднього охолоджувача суміші парів 14 та трубопроводів між ними. Вакуумний насос Н4 підтримує тиск в системі (ресивері) на рівні 50-70 мБар. З приймальної ємності 1, що знаходиться під атмосферним тиском, насосом Н1 через рекуперативний підігрівач 13 виноматеріал подається у випарник 5. В

ньому тепловий потік від «гарячої сторони» термоелектричного перетворювача 15 нагріває вино до температури $+28^{\circ}\text{C}$ та випаровує спирти. Деалкоголізований виноматеріал надходить у попередній збірник ДВ 11, звідки відкачується насосом Н2 через рекуперативний підігрівач 13 в ємність 2 з атмосферним тиском. Суміш парів з випарника 5 під дією перепаду тиску в паропроводі через попередній охолоджувач 14 надходять у конденсатор. В конденсаторі тепловий потік від «холодної сторони» термоелектричного перетворювача 16 охолоджує, конденсує пари та переохолоджує конденсат до температури $+15...19^{\circ}\text{C}$. Спиртовий конденсат збирається у збірнику 12 звідки насосом Н3 відкачується у ємність 3 з атмосферним тиском. Пари головної фракції відкачуються вакуумним насосом Н4 в ємність 4, де під дією атмосферного тиску конденсуються. Залишкове повітря видаляється в атмосферу.

Тепловий потік з "гарячої сторони" термоелектричного перетворювача 16 відводиться за допомогою теплових труб 9 до радіатора 10, що охолоджується вентилятором В5.

Для здійснення процесу вакуумної деалкоголізації вина необхідно підтримувати: 1) заданий рівень тиску в ресивері P_p ; 2) задану температуру деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника $T_{дв}$, здійснюючи підвід тепла до випарника 5; 3) задану температуру в конденсаторі T_k , здійснюючи відвід надлишкового тепла з конденсатора 6.

Регламенти ведення технологічного процесу вакуумної деалкоголізації вина наведені в таблиці 1.

1. Таблиця регламентів ведення технологічного процесу безперервної деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номинальне значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі ($t \geq \square$)		Короткочасні ($0 < t << \square$)
				величина	величина	
1	2	3	4	5	6	7
Температура ДВ на виході з випарника	$T_{дв}$	$^{\circ}\text{C}$	28	± 0.5	± 1	60

Температура в конденсаторі	T_k	$^{\circ}\text{C}$	18	± 0.5	± 1	60
Тиск у ресивері	P_p	мБар	68	± 2	± 5	60

Структурна схема технологічного процесу деалкоголізації вина як ОК зображена на рисунку 2.

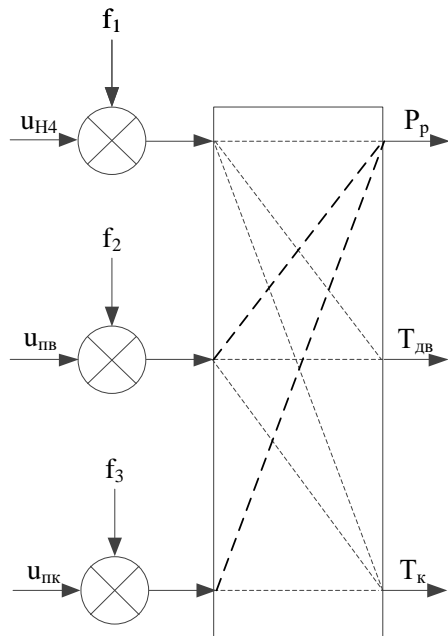


Рис. 2 – Структурна схема технологічного процесу деалкоголізації вина як ОК

На рис. 2 наведені наступні позначення:

Регульовані змінні: P_p – тиск у ресивері; $T_{дв}$ – температура ДВ на виході з випарника; T_k – температура в конденсаторі;

Керуючі впливи: $U_{н4}$ – частота обертання двигуна вакуум-наосу; $U_{пв}$ – струм живлення ТЕП випарника; $U_{пк}$ – струм живлення ТЕП конденсатора.

Всі вхідні дії, крім керуючих дій, віднесено до неконтрольованих збурень f_1 , f_2 , f_3 . Детерміновану складову цих збурень прикладено до керуючих дій.

Для попередньої оцінки енергетичних та конструктивних параметрів вакуумного термоелектричного дистилятора та дослідження динамічних властивостей основних каналів перетворень процесу проведено ряд експериментів з використанням імітаційної моделі процесу. В середовищі Matlab Simulink були організовані експерименти, в яких стабілізувались всі параметри процесу, крім досліджуваного, значення керуючого впливу якого (струм живлення ТЕП випарника, струм живлення ТЕП конденсатора або частота

обертання вакуумного насосу) ступінчасто змінювалася. При цьому реєструвалася зміна параметрів в контрольних точках об'єкту ($T_{дв}$ - температура ДВ на виході з випарника, $T_{к}$ - температура в конденсаторі, P_p – тиск у ресивері). Отримані перехідні характеристики зображені на рисунках 3, 4, 5.

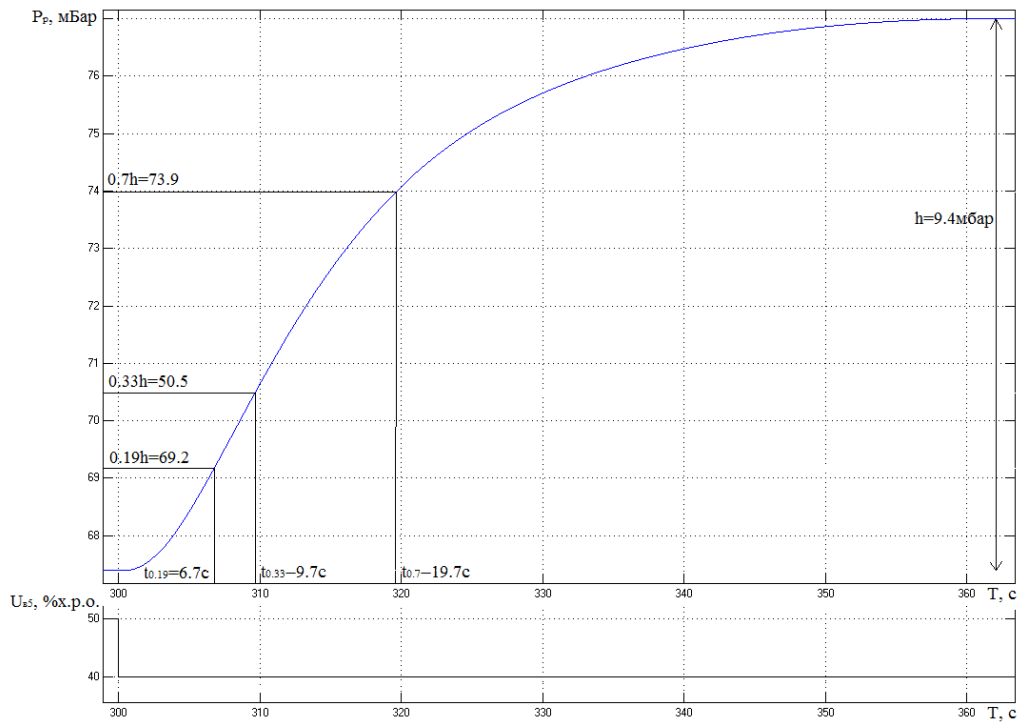


Рис. 3 – Реакція тиску в ресивері на ступінчасту зміну частоти обертання вакуумного насосу

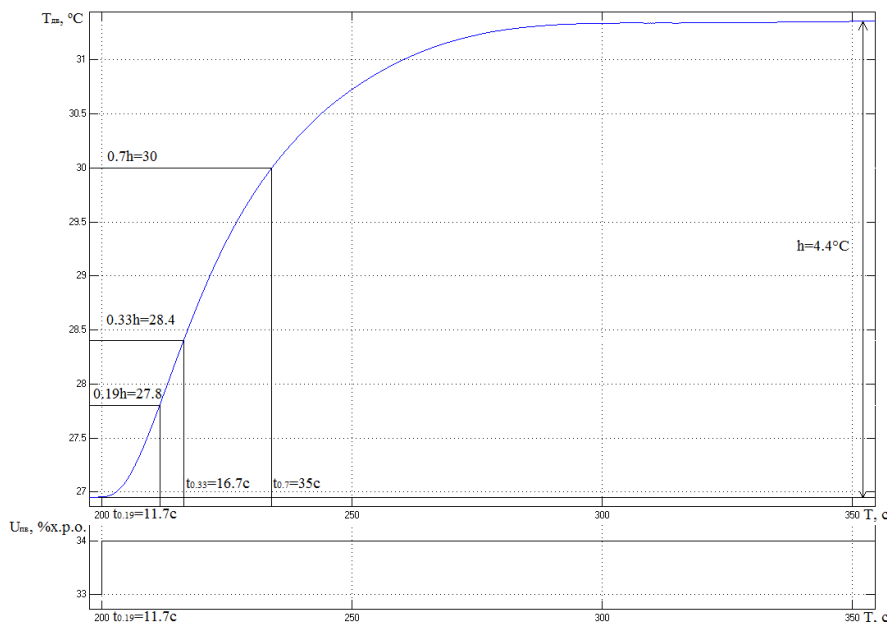


Рис. 4 – Реакція температури ДВ на виході з випарника на ступінчасту зміну струму живлення ТЕП випарника

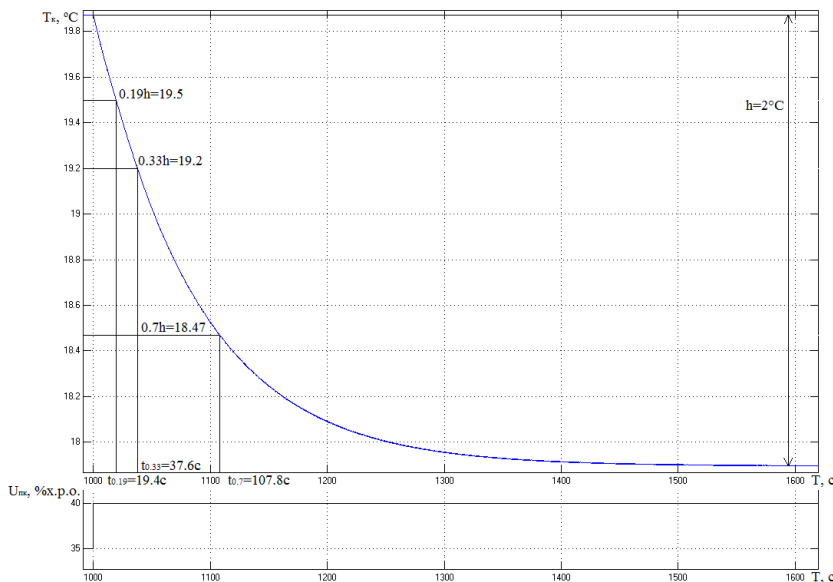


Рис. 5 – Реакція температури в конденсаторі на ступінчасту зміну струму живлення ТЕП конденсатора

Ідентифікація моделей динаміки процесу безперервної деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі проведена методом Мініної першого порядку, результати наведені у таблиці 2.

2. Результати ідентифікації моделей динаміки процесу безперервної деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі.

Канал ОК	Модель динаміки першого порядку
« $u_{пв} - T_{дв}$ »	$W_0(p) = \frac{4,4 \cdot e^{-7,4p}}{23p + 1}$
« $u_{пк} - T_k$ »	$W_0(p) = \frac{-0,4 \cdot e^{-2,5p}}{87,8p + 1}$
« $u_{н4} - P_p$ »	$W_0(p) = \frac{-0,94 \cdot e^{-4,7p}}{12,5p + 1}$

Структурна схема тримірної САР процесу деалкоголізації вина наведена на рис. 6.

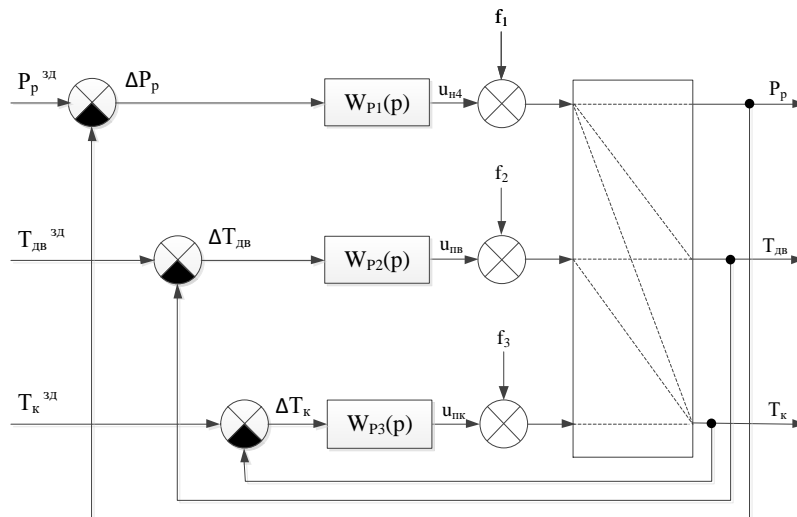


Рис. 6 – Структурна схема тримірної САР процесу деалкоголізації вина

На рисунку: $u_{н4}$ – частота обертання вакуумного насоса; P_p – тиск у ресивері; P_p^{zd} – задане значення тиску у ресивері; ΔP_p – помилка регулювання тиску у ресивері; f_1 – вектор неконтрольованих збурень; $W_{p1}(p)$ – передаточна функція регулятора тиску у ресивері; $u_{пв}$ – струм ТЕП випарника; $T_{дв}$ – температура ДВ на виході з випарника; $T_{дв}^{zd}$ – задане значення температури ДВ на виході з випарника; $\Delta T_{дв}$ – помилка регулювання температури ДВ на виході з випарника; f_2 – вектор неконтрольованих збурень; $W_{p2}(p)$ – передаточна функція регулятора температури вина у випарнику; $u_{пк}$ – струм ТЕП конденсатора; T_k – температура в конденсаторі; T_k^{zd} – задане значення температури в конденсаторі; ΔT_k – помилка регулювання температури в конденсаторі; f_3 – вектор неконтрольованих збурень; $W_{p3}(p)$ – передаточна функція регулятора температури в конденсаторі.

За методикою Копеловича А. П. розраховано початкові наближення параметрів налаштування ПІД-регуляторів температури ДВ на виході з випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері для 20% коливального перехідного процесу. Проведено їх параметричну оптимізацію при східчастих вхідних впливах за модульним інтегральним критерієм у середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регуляторів наведено у таблицях 3, 4.

3. Результати параметричної оптимізації налаштувань регуляторів температури

Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності: до – 50.819 після – 20.4796 оптимізації.
Налаштування регулятора температури ДВ на виході з випарника					
Kr1	0.81256	0	0.7	10	
Tiz1	12.9226	0	14.8	30	
Tpr1	7.1168	0	7.4	20	
Налаштування регулятора температури в конденсаторі					
Kr2	-94.114	-100	-87.8	0	Кількість шагів процедури оптимізації: максимальне – 500 фактичне - 21
Tiz2	4.5818	0	5	20	
Tpr2	2.4853	0	2.5	10	

4. Результати параметричної оптимізації налаштувань регуляторів тиску в ресивері.

Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності: до – 38.1607 після – 27.5817 оптимізації.
Kr	-3.3133	-15	-2.8	0	
Tiz	6.8933	0	9.4	20	
Tpr	4.7	0	4.7	30	
					Кількість шагів процедури оптимізації: максимальне – 100 фактичне - 12

Отримана САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регуляторів перевірена на грубість при дії параметричних збурень у середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink. Результати перевірки САР на грубість наведено на рис. 8.

Значення параметрів об'єкта керування і значення критерію оптимальності		
1. k1=1.24 k2=1.2 J=31.1932 k3=1 k4=0.8	2. k1=1 k2=1.2 J=31.2096 k3=1.2 k4=0.8	3. k1=0.8 k2=1.2 J=31.2106 k3=1.2 k4=0.8
4. k1=0.8 k2=1.2 J=31.2117 k3=1 k4=0.8	5. k1=1 k2=1.2 J=31.2131 k3=1 k4=0.8	6. k1=1 k2=0.8 J=42.7359 k3=0.8 k4=1.2
7. k1=1.24 k2=1.2 J=42.9475 k3=0.8 k4=1.2	8. k1=1.24 k2=1 J=43.2294 k3=0.8 k4=1.2	9. k1=1.24 k2=0.8 J=43.6311 k3=0.8 k4=1.2

Рис. 8 – Результати перевірки САР на грубість

У середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink отримані перехідні характеристики САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регуляторів температури ДВ на виході з випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері при східчастих вхідних впливах. Перехідні характеристики

наведено на рисунках 9, 10.

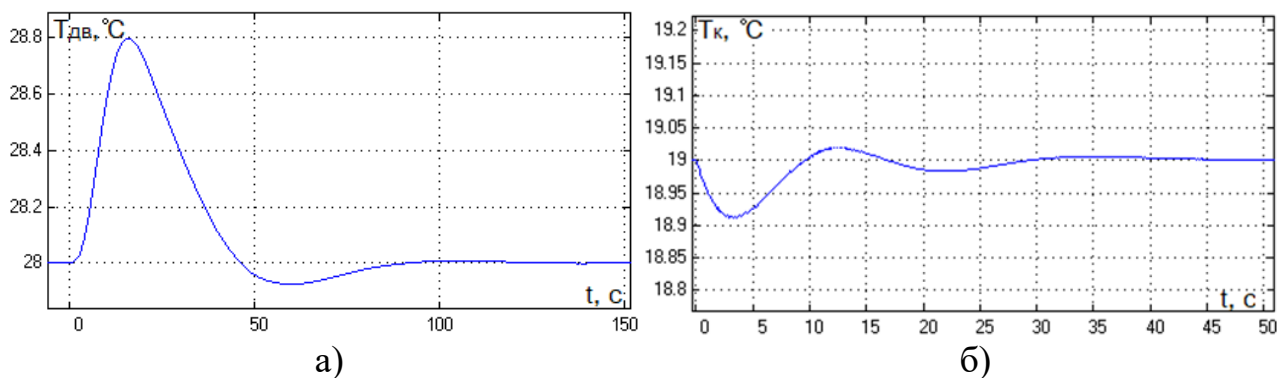


Рис. 9 – а) Перехідна характеристика САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регулятора температури ДВ на виході з випарника при східчастому входному впливі; б) Перехідна характеристика САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регулятора температури в конденсаторі при східчастому входному впливі

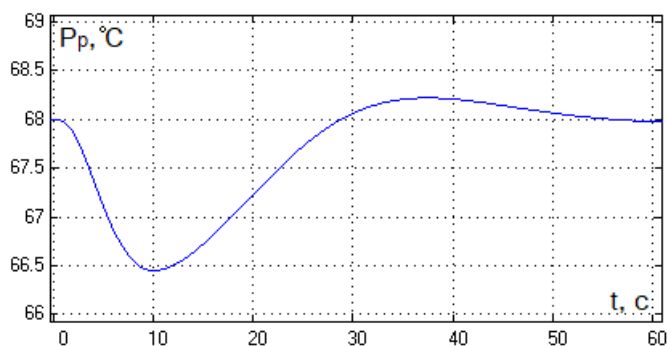


Рис. 10 - Перехідна характеристика САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регулятора тиску в ресивері при східчастому входному впливі

Висновки і перспективи. Наукова робота виконана з метою оцінки енергетичних та конструктивних параметрів для побудови фізичної моделі вакуумного термоелектричного дистилятора, а також дослідження можливостей автоматичного керування енергоефективним процесом безперервної деалкоголізації вина. Виконано аналіз, синтез та параметричну оптимізацію САК базової структури. Розроблену САК реалізовано в середовищі MATLAB Simulink. Синтезовані САК температури деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері перевірені на грубість при дії параметричних збурень, отримані перехідні характеристики при східчастих входних впливах. Отримані результати дозволять провести аналіз процесу деалкоголізації з метою пошуку найбільш енергоефективних режимів його ведення за рахунок вдосконалення алгоритмів керування.

Список використаних джерел

1. Kovalchuk, D., Mazur, A., & Hudz, S. (2017). The model for power efficiency assessment of condensation heating installations. *Automation of Technological and Business Processes*, 9(3). <https://doi.org/10.15673/atbp.v9i3.715>
2. Ковальчук Д., Мазур О., Гудзь, С. (2018). Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: лабораторна установка, вимірювані змінні, автоматизація експериментів. *Automation of Technological and Business Processes*, 10(2). <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i2.981>
3. Ковальчук, Д., & Мазур, О. (2020). Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: імітаційне моделювання. *Automation of Technological and Business Processes*, 11(4), 68-82. <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i4.1601>
4. Малогабаритний термоелектричний вакуумний деалкоголізатор: пат. на винахід 117540 Україна, МПК С12Н 3/02, В01D 3/10. № а201704635; заявл. 13.05.2017 ; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15.
5. Мазур О. В., Грабанова К. Є., Гудзь С. С. Розробка та дослідження імітаційної моделі процесу термовакуумної обробки харчових продуктів як об'єкту керування. *Automation of technological and business processes*. – 2020. – Т. 12. – №. 1. – С. 75-88.
6. Hudz S., Mazur A., Kovalchuk D. The thermoelectric vacuum crock-pot and the automated workplace for its research as a control object. *Automation of technological and business processes*. – 2017. – Т. 9. – №. 2.
7. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форми навчання. – Одеса: ОНАХТ, 2012. – Ч1 – 112с.
8. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форми навчання. – Одеса: ОНАХТ, 2016. – 96с.

References

1. Kovalchuk, D., Mazur, A., Hudz, S. (2017). The model for power efficiency assessment of condensation heating installations. *Automation of Technological and Business Processes*, 9(3). <https://doi.org/10.15673/atbp.v9i3.715>
2. Kovalchuk D., Mazur O., Hudz, S. (2018). Doslidzhennia protsesiv utylizatsii tepla paropovitrianykh sumishei: laboratorna ustanovka, vymiriuvani zminni, avtomatyzatsia eksperymentiv [Research of heat utilization processes of steam-air mixtures: laboratory model, measured variables, automation of experiments]. *Automation of Technological and Business Processes*, 10(2). <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i2.981>
3. Kovalchuk D., Mazur O. (2020). Doslidzhennia protsesiv utylizatsii tepla paropovitrianykh sumishei: imitatsiine modeliuвання [Study of processes of heat utilization of steam-air mixtures: simulation modeling]. *Automation of Technological and Business Processes*, 11(4), 68-82. <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i4.1601>
4. Hudz S. S., Mazur O. V. (2018). Small-sized thermoelectric vacuum

dealcoholizer. Patent of Ukraine for an invention. C12H 3/02, B01D 3/10. № a201704635; declared 13.05.2017; published 10.08.2018, № 15.

5. Mazur O. V., Hrabanova K. Ye., Hudz, S. (2020). Rozrobka ta doslidzhennia imitatsiinoi modeli protsesu termovakuumnoi obrobky kharchovykh produktiv yak ob'iektu keruvannia. [Development and research of a simulation model of the process of thermovacuum processing of food products as an object of control]. *Automation of Technological and Business Processes*, 12(1), 75-88. <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1708>

6. Hudz S., Mazur A., Kovalchuk D. (2017). The thermoelectric vacuum crock-pot and the automated workplace for its research as a control object. *Automation of Technological and Business Processes*, 9(2). <https://doi.org/10.15673/atbp.v9i2.562>

7. Khobin V. A. (2012) Konspekt lektsii z kursu «Teoriia avtomatychnoho keruvannia» dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 151 «Avtomatyziatsiia ta komp'uterno-intehrovani tekhnolohii» dennoi ta zaochnoi formy navchannia [Synopsis of lectures from the course "Theory of automatic control" for students studying in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies" of full-time and part-time education]. Odesa: ONAFT, 112.

8. Khobin V. A. (2016) Konspekt kursu lektsii z dystsypliny “Identyfikatsiia ta modeliuvannia tekhnolohichnykh ob'iektiv” dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 151 “Avtomatyziatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii” dennoi ta zaochnoi formy navchannia [Synopsis of lectures of the course "Identification and modeling of technological objects" for students studying in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies" of full-time and part-time study]. Odesa: ONAFT, 96.

AUTOMATIC CONTROL OF THE PROCESS OF CONTINUOUS DEALCOHOLIZATION OF WINE IN A VACUUM THERMOELECTRIC DISTILLER

S. O. Pashkov, D. S. Petrenko, O. V. Mazur

Abstract. *The work is devoted to the development of a system for automatic control of the process of continuous dealcoholization of wine in a vacuum thermoelectric distiller. A parameterized technological diagram of the process as a control object has been developed, the main parameters subject to regulation have been identified, namely the pressure in the receiver, the temperature of the dealcoholized wine material at the outlet of the evaporator, the temperature in the condenser, and their technological regulations have been determined. The corresponding control actions are defined: the rotation frequency of the vacuum pump, the current of the thermoelectric converter of the evaporator, the current of the thermoelectric converter of the condenser. A structural diagram of the technological process of wine dealcoholization as an object of management has been developed. On the simulation model of a vacuum distiller in the Matlab Simulink environment, experiments were conducted to study the dynamic properties of the main channels of transformations. From the received transient characteristics, the transfer functions of the control channels are determined. The synthesis of a three-dimensional system of automatic control of the temperature of the dealcoholized wine material at the outlet of the evaporator, the temperature in the condenser and the pressure in the receiver was carried out. The initial settings of the regulators were calculated, the parametric optimization of their settings was carried out, and the transient characteristics of the regulated variables under stepped input influences were obtained. The obtained systems of automatic control*

of the temperature of the dealcoholized wine material at the outlet of the evaporator, the temperature in the condenser and the pressure in the receiver are tested for roughness under the influence of parametric disturbances.

Key words: *thermoelectric converter, vacuum distiller, dealcoholization, automatic control system.*

**АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГАРЯЧОГО
КОПЧЕННЯ КОВБАС В ТЕРМОКАМЕРІ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ
РЕКУПЕРАТОРОМ ТЕПЛА**

Д. С. Петренко, магістрант кафедри автоматизації технологічних процесів
і робототехнічних систем

С. О. Пашков, магістрант кафедри автоматизації технологічних процесів і
робототехнічних систем

О. В. Мазур, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації
технологічних процесів і робототехнічних систем

Одеський Національний Технологічний Університет

E-mail: mazur.a.v.ua@gmail.com

***Анотація.** Робота присвячена розробці системи автоматичного керування гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла. Розроблено параметризовану технологічну схему процесу як об'єкту керування, виділено основні параметри що підлягають регулюванню та їх технологічні регламенти – температура переохолодження повітря $T_{гнв}$ та температура гарячого повітря $T_{гс}$ - та відповідні керуючі дії: струм живлення термоелектричного охолоджувача та струм живлення термоелектричного нагрівача. Розроблено структурну схему технологічного процесу гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла. Методом імітаційного моделювання отримано динамічні властивості основних каналів перетворень об'єкта. Зі знятих перехідних характеристик визначили передатні функції каналів регулювання. Проведено параметричний та оптимальний синтез САК температури переохолодження повітря $T_{гнв}$ та температури гарячого повітря $T_{гс}$. Отримані САК були перевірені на грубість при дії параметричних збурень.*

***Ключові слова:** термоелектричний перетворювач, рекуперація тепла, система автоматичного керування, гаряче копчення.*

***Актуальність.** Одним з основних технологічних процесів при виробництві ковбасних виробів є термічна обробка продукту, яка включає варку та гаряче копчення. Термічна обробка є досить енерговитратним процесом. Одним зі шляхів зниження енергетичних витрат у технологічних процесах термічної обробки ковбасних виробів є використання термоелектричних теплових насосів, за допомогою яких може бути реалізовано процес глибокої рекуперації тепла*

вхідних та вихідних пароповітряних сумішей, що формуються в процесі теплової обробки. Застосування режимів рекуперації тепла пароповітряних сумішей призводить до збільшення кількості перехресних взаємозв'язків, що, безумовно ускладнює умови функціонування систем керування такими процесами. Тому дослідження таких систем керування є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Використання теплових насосів (ТН) для глибокої рекуперації тепла пароповітряних сумішей є одним з найбільш перспективних шляхів підвищення енергетичної ефективності при реалізації теплових та тепло-масообмінних процесів[1, 2, 3, 4]. Організація замкненого циклу руху повітря з рекуперацією теплової енергії та нормалізації вологості повітря дозволяє суттєво знизити енергетичні втрати та таким чином підвищити енергетичну ефективність процесів варення та гарячого копчення ковбас. Використання термоелектричних ТН для рекуперації тепла пароповітряних сумішей при реалізації процесів варення та гарячого копчення ковбас має ряд переваг перед використанням парокомпресійних ТН. Перш за все це можливість ефективної рекуперації тепла високотемпературних пароповітряних сумішей[3]. Суттєвою перевагою використання термоелектричних ТН також є відсутність рухомих частин, холодоагентів, вібрацій та безшумність роботи[5]. Довгостроковість і надійність роботи та малі габарити та вага[4]. Збільшення інтересу до використання термоелектричних ТН при реалізації систем рекуперації тепла зумовлене розвитком силової електроніки, що дозволяє будувати керовані джерела живлення невеликої вартості та з ККД до 96%.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка двомірної системи автоматичного керування процесом гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла, яка забезпечую утримання в регламентних зонах значень температури та вологості гріючої пароповітряної суміші у всіх сталих та перехідних режимах.

Матеріали і методи дослідження. Основним методом дослідження є системний аналіз. Для ідентифікації моделей об'єкту було використано

інженерні методи ідентифікації моделей об'єкту керування та метод імітаційного моделювання [6]. При синтезі системи автоматичного керування (САК) використано методи параметричного та оптимального синтезу [7]. Основним експериментальним методом обрано імітаційне моделювання в середовищі Matlab Simulink.

Результати дослідження та їх обговорення. Параметризована схема технологічного процесу гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла представлена на рисунку 1.

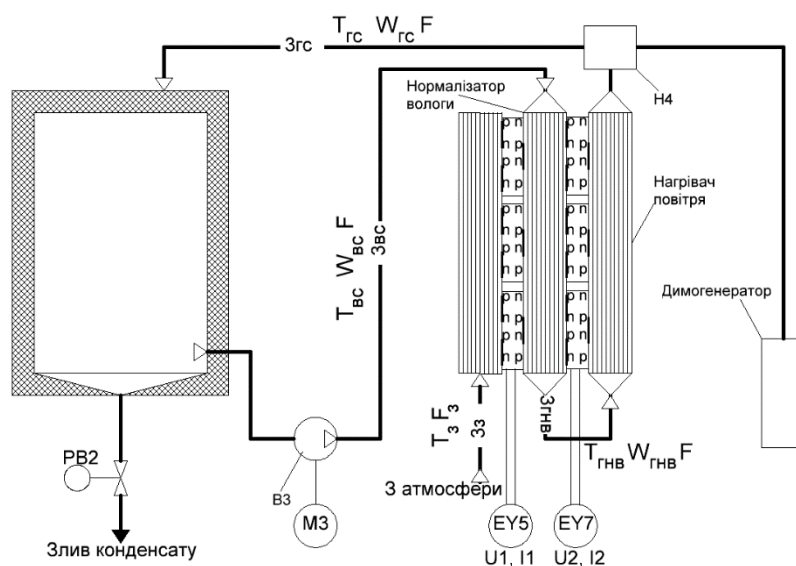


Рис. 1 – Параметризована схема технологічного процесу гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла.

На параметризованій схемі процесу гарячого копчення прийняті наступні позначення: $T_{Гс}$ – температура гарячого повітря, $W_{Гс}$ – вологість гарячого повітря, F – витрати повітря, $T_{вс}$ – температура відпрацьованого повітря, $W_{вс}$ – вологість відпрацьованого повітря, $T_{ГНв}$ – температура переохолодженого повітря, $W_{ГНв}$ – вологість переохолодженого повітря, $T_з$ – температура атмосферного повітря, $F_з$ – витрати атмосферного повітря, $u1$ – струм живлення термоелектричного охолоджувача, $u2$ – струм живлення термоелектричного нагрівача, $B3$ – циркуляційний вентилятор, $H4$ – ежектор.

Процес гарячого копчення ковбаси полягає в термічній обробці ковбасних напівфабрикатів (батони ковбаси) теплоносієм у вигляді пароповітряної суміші з температурою, що змінюється в процесі копчення від 60°C до 95°C та

відносною вологістю $W=5\%$. При досягненні в центрі ковбасного батону температури 75°C термічна обробка(копчення) вважається завершеною.

Розробка концептуальної моделі об'єкта регулювання

Виділимо дві задачі регулювання:

1. Стабілізація температури переохолодження повітря $T_{\text{ГНВ}}$ на виході з нормалізатора вологи зміною струму живлення $U1$ термоелектричного охолоджувача;
2. Стабілізація температури гарячого повітря $T_{\text{Гс}}$ зміною струму живлення $U2$ термоелектричного нагрівача;

1. Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі		Час, сек
				Величина	Величина	
1	2	3	4	5	6	7
Температура переохолодженого повітря	$T_{\text{ГНВ}}$	$^{\circ}\text{C}$	20	± 0.5	± 1	60
Температура гарячого повітря	$T_{\text{Гс}}$	$^{\circ}\text{C}$	90	± 0.5	± 5	60

Структурна схема об'єкта зображена на рисунку 2.

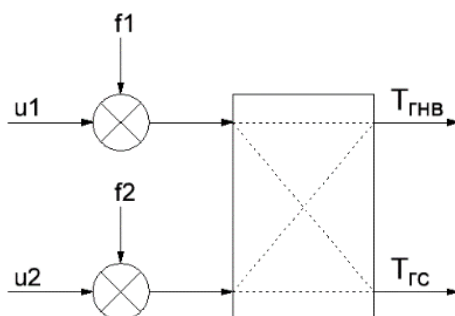


Рис. 2 - Структурна схема об'єкта.

Регульовані змінні: $T_{\text{ГНВ}}$ - Стабілізація температури переохолодження повітря; $T_{\text{Гс}}$ - Стабілізація температури гріючого повітря.

Керуючі впливи: U_1 - зміна струму живлення термоелектричного охолоджувача; U_2 - зміна струму живлення термоелектричного нагрівача.

Для вивчення динамічних властивостей основних каналів перетворень на імітаційній моделі рекуператора тепла в середовищі Matlab Simulink були організовані експерименти, в яких стабілізувались всі параметри процесу крім досліджуваного, який ступінчасто змінювався. На основі отриманих даних проведена параметрична ідентифікація моделей динаміки першого порядку каналів $U_1 - T_{ГНВ}$ та $U_2 - T_{Гс}$ за методикою Мініної, результати якої представлені на рисунках 3 та 4 відповідно та в таблиці 3.

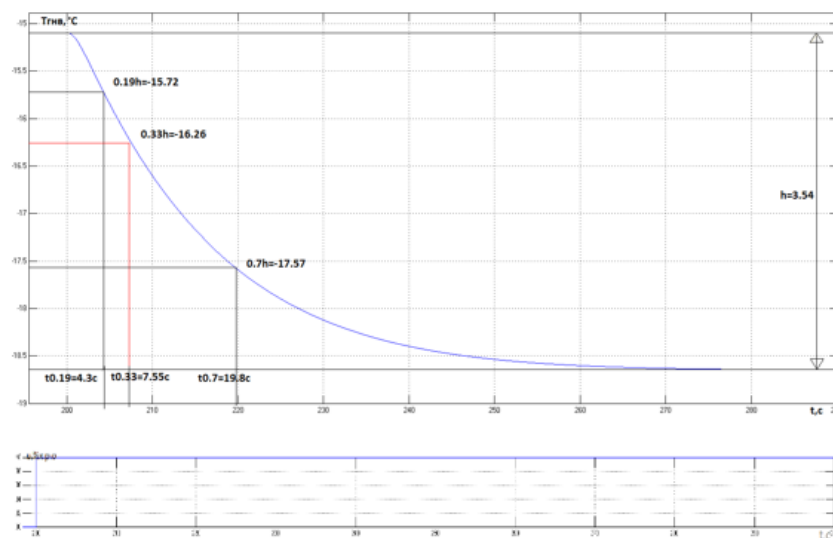


Рис.3 – Параметрична ідентифікація моделі ОК $U_1 - T_{ГНВ}$

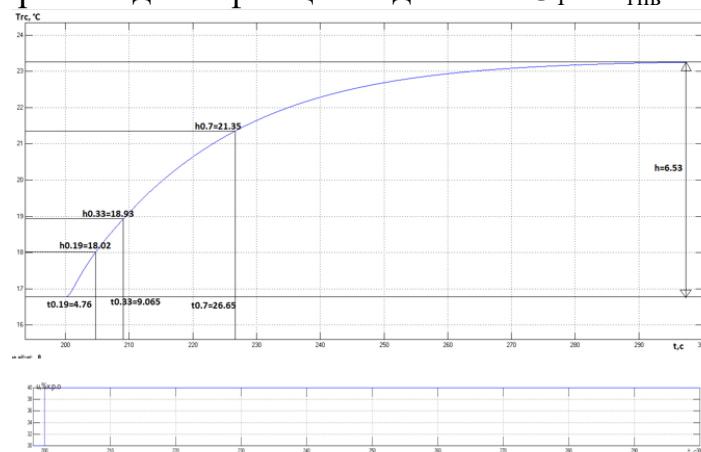


Рис.4 – Параметрична ідентифікація моделі ОК $U_2 - T_{Гс}$

3. Результати ідентифікації моделей динаміки процесу гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла

Канал ОК	Модель динаміки першого порядку
----------	---------------------------------

$U_1 - T_{\text{ГНВ}}$	$W_0(p) = \frac{-0,33 \cdot e^{-1,425p}}{15,3p + 1}$
$U_2 - T_{\text{Гс}}$	$W_0(p) = \frac{0,65 \cdot e^{-0,27p}}{21,9p + 1}$

Параметричний синтез САР з ПІД-алгоритмом регулювання і їх перевірка на грубість

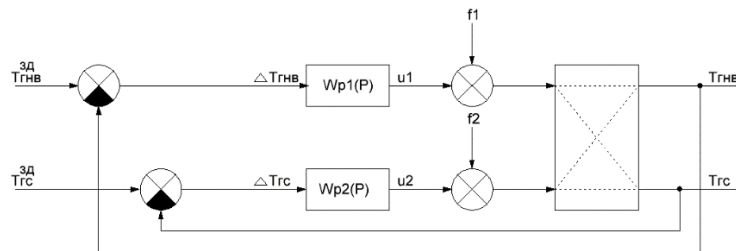


Рис.5 – Структурна схема системи керування лабораторною установкою базової структури

На рисунку представлено: $T_{\text{ГНВ}}^{\text{зд}}$ - задане значення переохолодженого повітря, $\Delta T_{\text{ГНВ}}$ - помилка регулювання температури переохолодженого повітря, $T_{\text{ГНВ}}$ – температура переохолодженого повітря, $T_{\text{Гс}}^{\text{зд}}$ - задане значення догрітого повітря, $\Delta T_{\text{Гс}}$ - помилка регулювання температури догрітого повітря, $T_{\text{Гс}}$ – температура догрітого повітря, U_1 – струм живлення термоелектричного охолоджувача, U_2 – струм живлення термоелектричного нагрівача, f_1 – вектор неконтрольованих збурень, f_2 - вектор неконтрольованих збурень, $Wp1(p)$ – передатна функція температури переохолодження повітря, $Wp2(p)$ – передатна функція температури догрівання повітря.

В якості алгоритму регулювання обираємо пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) алгоритми регулювання.

Параметри ПІД-регуляторів розраховані за методикою Капеловича наведені в таблиці 4.

4.Параметри ПІД-регуляторів розраховані за методикою Капеловича

Параметр	ПІД-регулятор температури $T_{\text{ГНВ}}$	ПІД-регулятор температури $T_{\text{Гс}}$
----------	--	---

Кр	-24.2	98.8
Tіз	3.42	0.654
Tпр	1.06	1.06

Параметричну оптимізацію параметрів налаштувань ПІД-регуляторів температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ та температури догрітого повітря $T_{гс}$ проведено за модульним інтегральним критерієм у середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регуляторів представлено у таблицях 5, 6.

5. Результати параметричної оптимізації налаштувань ПІД-регулятора температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$.

Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності:
Кр	-91.1215	-100	-24.2	-1	до – 24.2244 після – 13.4903 оптимізації.
Tіз	0.58126	0.01	3.42	15	Кількість шагів процедури оптимізації: максимальне – 1500 фактичне - 161
Tпр	0.82834	0.01	1.06	10	

6. Результати параметричної оптимізації налаштувань ПІД-регулятора температури догрітого повітря $T_{гс}$.

Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності:
Кр	250	1	98.8	350	до – 11.2288 після – 7.7828 оптимізації.
Tіз	0.1997	0.01	0.654	10	Кількість шагів процедури оптимізації: максимальне – 500 фактичне - 21
Tпр	0.38325	0.01	1.06	10	

Отримані САК з оптимізованими параметрами налаштувань ПІД-регуляторів перевірені на грубість при дії параметричних збурень у середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink. Результати перевірки на грубість

САК температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ та гарячого повітря $T_{гс}$ наведено на рисунках 6 та 7 відповідно.

Значення параметрів об'єкта управління і значення критерія оптимальності.		
1. $k_1=1.2$ $k_3=0.8$	2. $k_1=0.8$ $k_3=0.8$	3. $k_1=1$ $k_3=0.8$
4. $k_1=1.2$ $k_3=0.8$	5. $k_1=0.8$ $k_3=0.8$	6. $k_1=1$ $k_3=1.2$
7. $k_1=1.2$ $k_3=1.2$	8. $k_1=0.8$ $k_3=1.2$	9. $k_1=1$ $k_3=1.2$

Рис. 6 - Аналіз на грубість САР температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ з ПІД-регулятором

Значення параметрів об'єкта управління і значення критерія оптимальності.		
1. $k_1=1.2$ $k_3=0.8$	2. $k_1=0.8$ $k_3=0.8$	3. $k_1=1$ $k_3=0.8$
4. $k_1=1.2$ $k_3=0.8$	5. $k_1=0.8$ $k_3=0.8$	6. $k_1=1$ $k_3=1.2$
7. $k_1=1.2$ $k_3=1.2$	8. $k_1=0.8$ $k_3=1.2$	9. $k_1=1$ $k_3=1.2$

Рис. 7 - Аналіз на грубість САР температури догрітого повітря $T_{гс}$ з ПІД-регулятором

У середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink отримані перехідні характеристики САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регуляторів температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ та гарячого повітря $T_{гс}$. Перехідні характеристики наведено на рисунках 8 та 9.

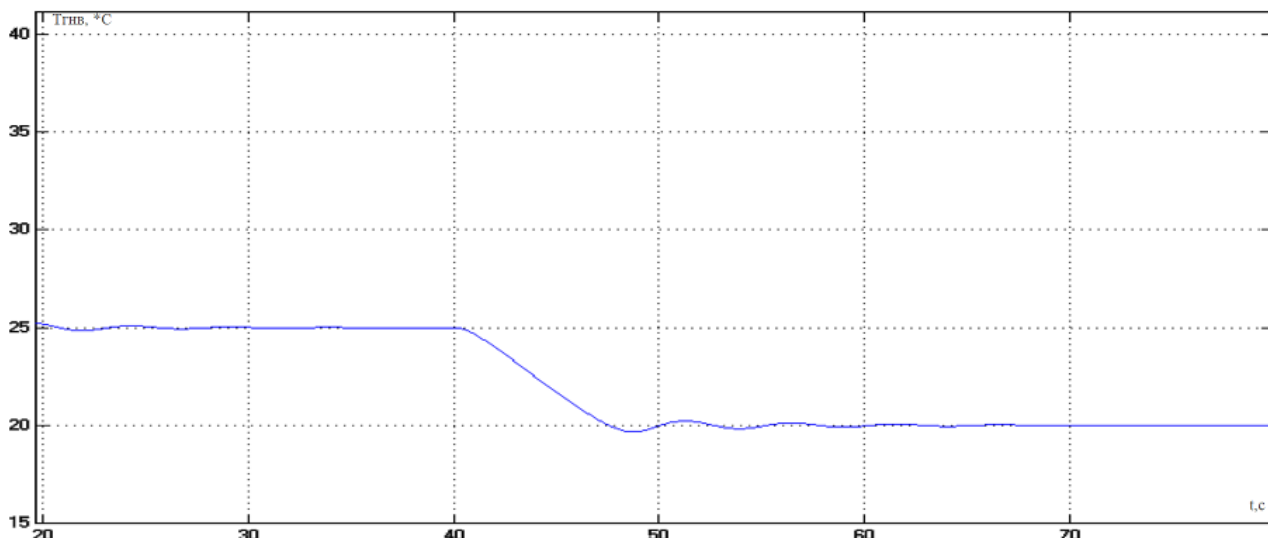


Рис. 8 - Перехідна характеристика САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регулятора температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ при східчастому входному впливі

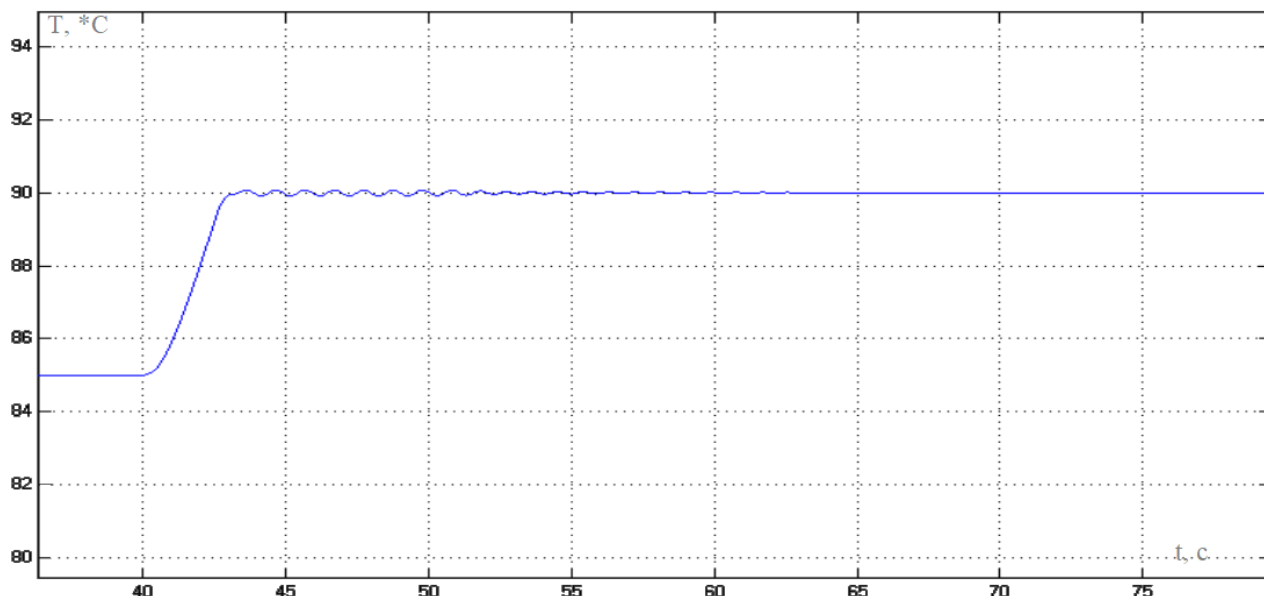


Рис. 9 - Перехідна характеристика САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регулятора температури догрітого повітря $T_{гс}$

Висновки і перспективи

Аналіз технологічного процесу термічної обробки ковбаси(жарки) показав, що концептуально процес можна представити двома регульованими координатами: температурою переохолодженого повітря $T_{гнв}$, температурою догрітого повітря $T_{гс}$; а також двома керуючими діями: струмом живлення термоелектричного нагрівача повітря та струмом живлення термоелектричного охолоджувача нормалізатора вологості. Усі збурення процесу доцільно віднести до неконтрольованих збурень.

Представлені в роботі дані будуть використовуватися для синтезу і аналізу САК підвищеної динамічної точності управління технологічним процесом гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла.

Синтез САР проведено в два етапи. На першому етапі розрахунок налаштувань регулятора проводився за інженерними методиками Копеловича, а на другому етапі було застосовано оптимальний параметричний синтез. В якості критерію використано інтегральний модульний критерій. В якості базового алгоритму регулювання температури охолодженого повітря $T_{гнв}$ та температури догрітого повітря $T_{гс}$ будемо використовувати ПІД-алгоритм.

Список використаних джерел

1. Gluesenkamp K. R., Patel V. K., Momen A. M. Efficiency limits of evaporative fabric drying methods // *Drying Technology*. – 2021. – Т. 39. – №. 1. – С. 104-124.
2. Ярошевич М. В. Ефективність використання термоелектричного теплового насосу у відцентровому дистиляторі : дис. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
3. Анатичук Л. І., Кузь Р. В., Прибила А. В. (2014) Підвищення ефективності секційних термоелектричних рекуператорів тепла [Improving the efficiency of sectional thermoelectric heat recuperators]// *Термоелектрика..* – №. 6. – С. 77-88.
4. Patel V. K. et al. Experimental evaluation and thermodynamic system modeling of thermoelectric heat pump clothes dryer // *Applied energy*. – 2018. – Т. 217. – С. 221-232.
5. Liu Z. et al. Experimental study and performance analysis of solar-driven exhaust air thermoelectric heat pump recovery system // *Energy and Buildings*. – 2019. – Т. 186. – С. 46-55.
6. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології» денної та заочної форми навчання.- Одеса: ОНАХТ, 2016 – 96с.
7. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології» денної та заочної форми навчання.- Одеса: ОНАХТ, 2012.- Ч1 – 112с.

Referense

1. Gluesenkamp, K. R., Patel, V. K., & Momen, A. M. (2021). Efficiency limits of evaporative fabric drying methods. *Drying Technology*, 39(1), 104-124.
2. Yaroshevych, M. V. (2022). Efektyvnist vykorystannia termoelektrychnoho teplovoho nasosu u vidtsentrovomu dystyliatori [Efficiency of Thermoelectric Heat Pump Use in Centrifugal Distiller] (Masters thesis, KPI im. Ihoria Sikorskoho).
3. Yaroshevych, M. V. (2022). Efektyvnist vykorystannia termoelektrychnoho teplovoho nasosu u vidtsentrovomu dystyliatori [Efficiency of Thermoelectric Heat Pump Use in Centrifugal Distiller] (Masters thesis, KPI im. Ihoria Sikorskoho).
4. Anatychuk, L. I., Kuz, R. V., & Prybyla, A. V. (2014). Pidvyshchennia efektyvnosti sektsiinykh termoelektrychnykh rekuperatoriv tepla [improving the efficiency of sectional thermoelectric heat recuperators]. *Termoelektryka*, (6), 77-88.
5. Liu, Z., Li, W., Zhang, L., Wu, Z., & Luo, Y. (2019). Experimental study and performance analysis of solar-driven exhaust air thermoelectric heat pump recovery system. *Energy and Buildings*, 186, 46-55.
6. Khobin V. A. (2016) Konspekt leksii z kursu «Identyfikatsiia ta modeliuvannia tekhnolohichnykh obiektiv» dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 151 «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno intehrovani tekhnolohii» dennoi

ta zaochnoi formy navchannia [Lecture notes on the course "Identification and modeling of technological objects" for students studying in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies" of full-time and part-time education]. Odesa: ONAFT. – 96p.

7. Khobin V. A. (2012) Konspekt leksii z kursu «Teoriia avtomatychnoho keruvannia» dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 151 «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno intehrovani tekhnolohii» dennoi ta zaochnoi formy navchannia [Lecture notes on the course "Theory of automatic control" for students studying in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies" of full-time and part-time education]. Odesa: ONAFT. - Part 1 - 112p.

***Abstract.** The work is devoted to the development of a system of automatic control of hot smoking of sausage in a thermal chamber with a thermoelectric heat recuperator. A parameterized technological diagram of the process as a control object has been developed, the main parameters subject to regulation and their technological regulations - air subcooling temperature T_{gnv} and hot air temperature T_{gs} - and corresponding control actions: power supply current of the thermoelectric cooler and power supply current of the thermoelectric heater have been developed. A structural scheme of the technological process of hot smoking of sausage in a thermal chamber with a thermoelectric heat recuperator has been developed. The method of simulation modeling of obtaining the dynamic latency of the main channels of the transformation of the object. From the recorded transient characteristics, the transfer functions of channel regulation were determined. A parametric and optimal synthesis of SAC of air subcooling temperature T_{gnv} and hot air temperature T_{gs} was carried out. The obtained SACs are checked for roughness under the action of parametric disturbances.*

***Key words:** thermoelectric converter, heat recovery, automatic control system, hot smoking.*

ДОДАТОК Б

Порядковий номер заявки, визначений заявником		Дата одержання		
(22) Дата подання заявки	Пріоритет	(51) МПК	(21) Номер заявки	
		C12H 3/02		
(86)	Реєстраційний номер та дата подання міжнародної заявки, установлені відомством-одержувачем			
(87)	Номер і дата міжнародної публікації міжнародної заявки			
ЗАЯВА про державну реєстрацію винаходу (корисної моделі)	НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ" (УКРПАТЕНТ) вул. Глазунова, 1, м. Київ-42, 01601			
Подаючи нижчезазначені документи, прошу (просимо) видати: <input type="checkbox"/> патент України на винахід <input type="checkbox"/> патент України на корисну модель				
(71) Заявник(и)		Код за ЄДРПОУ		
Пашков Сергій Олександрович				
(зазначається повне ім'я або найменування заявника(ів), його (їх) місце проживання або місцезнаходження та код держави згідно із стандартом VOIB ST.3. Дані про місце проживання винахідників-заявників наводяться за кодом (72)				
Прощу (просимо) встановити пріоритет заявки пунктів формули винаходу за заявою № _____ за датою: <input type="checkbox"/> подання попередньої заявки в державі - учасниці Паризької конвенції (навести дані за кодами (31), (32), (33)) <input type="checkbox"/> подання до Укрпатенту попередньої заявки, з якої виділено цю заявку (навести дані за кодом (62)) <input type="checkbox"/> подання до Укрпатенту попередньої заявки (навести дані за кодом (66))				
(31) Номер попередньої заявки	(32) Дата подання попередньої заявки	(33) Код держави подання попередньої заявки згідно із стандартом VOIB ST.3	(62) Номер та дата подання до Укрпатенту попередньої заявки, з якої виділено цю заявку	(66) Номер та дата подання до Укрпатенту попередньої заявки
(54) Назва винаходу (корисної моделі) Спосіб автоматичного управління деалкоголізацією вина				
(98) Адреса для листування Вул. Чкалова буд. 14, с. Степанівка, 67430, Роздільнянський район, Одеська область, Україна UA Телефон +380978813519 Електронна адреса (E-mail) sergypashkov2001@gmail.com				

(74) Повне ім'я та реєстраційний номер представника у справах інтелектуальної власності або повне ім'я іншої довіреної особи

Прошу (просимо) прискорити публікацію заявки

Перелік документів, що додаються	Кількість арк.	Кількість прим.	
<input checked="" type="checkbox"/> опис винаходу	3	3	Підстави щодо виникнення права на подання заявки й одержання патенту (без подання документів), якщо винахідник(и) не є заявником(ами): <input type="checkbox"/> є документ про передачу прав винахідником(ами) або роботодавцем(ями) правонаступнику(ам) <input type="checkbox"/> є документ про право спадкування
<input checked="" type="checkbox"/> формула винаходу	1	3	
<input checked="" type="checkbox"/> креслення та інші ілюстративні матеріали	1	3	
<input checked="" type="checkbox"/> реферат	1	3	
<input checked="" type="checkbox"/> документ про сплату збору за подання заявки	1	1	
<input type="checkbox"/> документ, який підтверджує наявність підстав для зменшення збору або звільнення від сплати збору			
<input type="checkbox"/> документ про депонування штаму			
<input type="checkbox"/> копія попередньої заявки, яка підтверджує право на пріоритет			
<input type="checkbox"/> переклад заявки українською мовою			
<input type="checkbox"/> документ, який підтверджує повноваження довіреної особи (довіреність)			
<input type="checkbox"/> інші документи:			
<input type="checkbox"/> міжнародний звіт про пошук			

(72) Винахідник(и) Винахідник(и)-заявник(и) (повне ім'я)	Місце проживання та код держави згідно із стандартом ВОІВ ST. 3 (для іноземних осіб - тільки код держави)	Підпис(и) винахідника(ів)- заявника(ів)
Пашков Сергій Олександрович	Вул. Чкалова буд. 14, с. Степанівка, 67430, Роздільнянський район, Одеська область, Україна UA	

Я (ми) _____ (повне ім'я)

прошу (просимо) не згадувати мене (нас) як винахідника(ів) при публікації відомостей стосовно заявки на видачу патенту

Підпис(и) винахідника(ів)

Підпис(и) заявника(ів) _____

Дата підпису

М. П.

Якщо заявником є юридична особа, то підпис особи, що має на це повноваження, із зазначенням посади скріплюється печаткою. Якщо всі винахідники виступають заявниками, то їх підписи наводяться за кодом (72).

СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЄЮ ВИНА

Корисна модель відноситься до автоматичного управління деалкоголізацією вина і може бути використана в технологічному процесі деалкоголізації у виноробній галузі харчової промисловості.

Відомий спосіб управління деалкоголізацією вина, в якому поділ вина на рідку і пароподібну фракції, ректифікацію, дефлегмацію і дистиляцію здійснюють в умовах вакууму при тиску 6-16 кПа і температурі нагрівання в нижній зоні відгінної колони 35-50 °С, а підведення теплоти для поділу вина на рідку і 55 пароподібну фракцію здійснюють за допомогою автономного випарно-конденсаційного циклу [Патент України на винахід 116075 «Спосіб деалкоголізації вина і установка для його здійснення (варіанти)» Бурдо Олег Григорович, Семков Сергій Васильович МПК C12G 3/08, C12H 3/00, C12F 3/00. Заявл. 10.04.2017 № а 2017 03470. Опубл. 25.01.2018, Бюл.№ 2].

Недоліком даного способу є великі енерговитрати в результаті використання ручного управління та традиційного джерела енергії.

Також відомий спосіб автоматичного управління деалкоголізацією вина, який містить регулювання температури *нагріву куба за допомогою* регулятора електроенергії і електронагрівача та управління вакуумом (насосом) в установці впливом на водоструменевий насос [Устройства автоматизи /Лаборатория вакуумного винокурения Pole. – URL: <https://svhdlab.co/устройства-автоматики/>].

Недоліком даного способу є великі енерговитрати в результаті використання електронагрівача.

Також відомий спосіб автоматичного управління деалкоголізацією вина, в якому після відбору головної фракції спирту вмикають систему регулювання температури в дефлегматорі на відбір основної фракції спирту переключаючи підвід спирту до збірника [Патент України на винахід 24423 А «Вакуум-перегонна установка для коньячного і плодового спирту»/Ковалевський К. А., Скороход В. О. МПК C12G 3/12, B01D 3/10. Заявл. 18.04.1997 № 97041855. Опубл. 30.10.1998, бюл. № 5].

Недоліком даного способу є великі енерговитрати в результаті використання електронагрівача.

Також відомий спосіб автоматичного управління деалкоголізацією вина, в якому регулюють температуру розчину за допомогою електронагрівача і при досягненні робочої температури запускають електрокомпересор, а також регулюють якість очистки зміною витрат рідини, яка надходить в ректифікаційну колону [Патент України на винахід 15812 «Установка для розділення двокомпонентного розчину» Віршубський І. М. МПК B01D 3/10. Заявл. 28.05.1993 № 94041009. Опубл. 30.06.1997, бюл. № 3].

Недоліком даного способу є великі енерговитрати в результаті використання електронагрівача.

Найбільш близьким до заявленого є відомий спосіб автоматичного управління деалкоголізацією вина, який містить регулювання температури деалкоголізованого виноматеріалу у випарнику [Устройства автоматики /Лаборатория вакуумного винокурения Pole. – URL: <https://svhdlab.co/устройства-автоматики/>].

Недоліком даного способу є великі енерговитрати в результаті використання електронагрівача.

В основу корисної моделі поставлено задачу зменшення енерговитрат шляхом використання термоелектричних елементів Пельтьє (ТЕП).

Задачу вирішено в способі автоматичного управління деалкоголізацією вина, який містить регулювання температури деалкоголізованого виноматеріалу у випарнику.

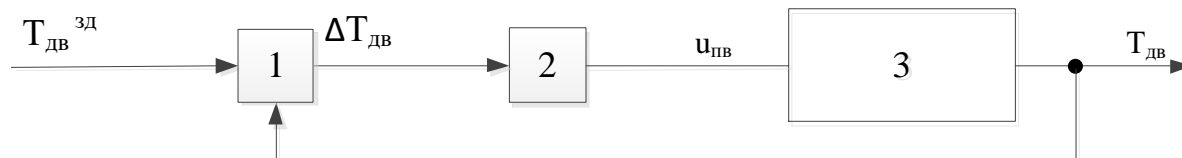
Згідно корисної моделі додатково керуюча дія з виходу регулятора температури надходить на ТЕП на виході яких формується поточне значення температури деалкоголізованого виноматеріалу.

Приклад реалізації запропонованого способу показаний на фігурі.

Корисна модель реалізує такий алгоритм роботи.

Поточне значення температури деалкоголізованого виноматеріалу $T_{дв}$ у випарнику дистилятора 3 поступає на суматор 1, де порівнюється з її заданим значенням $T_{двзд}$, і обчислюється сигнал розузгодженості $\Delta T_{дв}$. З виходу суматора 1 сигнал розузгодженості надходить на вхід регулятора 2, який формує керуючу дію $u_{пв}$ – струм живлення ТЕП. Керуюча дія з виходу регулятора 2 надходить на вхід випарника 3 для стабілізації температури деалкоголізованого виноматеріалу у випарнику дистилятора.

СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЄЮ ВИНА



Фігура

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЄЮ ВИНА

Спосіб автоматичного управління деалкоголізацією вина, який містить регулювання температури деалкоголізованого виноматеріалу у випарнику, **який відрізняється тим, що** додатково керуюча дія з виходу регулятора температури надходить на ТЕП на виході яких формується поточне значення температури деалкоголізованого виноматеріалу.

РЕФЕРАТ

СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЄЮ ВИНА

Корисна модель відноситься до автоматичного управління деалкоголізацією вина і може бути використана в технологічному процесі деалкоголізації у виноробній галузі харчової промисловості.

Спосіб автоматичного управління деалкоголізацією вина містить регулювання температури деалкоголізованого виноматеріалу у випарнику, додатково керуюча дія з виходу регулятора температури надходить на ТЕП на виході яких формується поточне значення температури деалкоголізованого виноматеріалу.

ДОДАТОК В

**Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації,
робототехніки та програмування ім.П.Н.Платонова**

**«ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ І
АВТОМАТИЗАЦІЯ – 2023»**

***МАТЕРІАЛИ
XVI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ***



19 - 20 ЖОВТНЯ 2023 р.

м.ОДЕСА

ПОТУЖНЕ ПРОГРАМОВАНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСУ

Філярський В. І., Петренко Д. С., Пашков С. О., Мазур О. В. (mazur.a.v.ua@gmail.com, filyarsky@gmail.com, dmytropetrenko00@gmail.com, sergypashkov2001@gmail.com)

Одеський національний технологічний університет, (Україна)

В дослідженні розглянуто розробку програмованого джерела струму для керування продуктивністю термоелектричного теплового насосу потужністю 1000Вт на базі AC/DC перетворювача, DC/DC перетворювача та контролера керування. Висвітлено особливості апаратного забезпечення та цифрового керування за протоколом Modbus.

Постановка проблеми.

Останнім часом спостерігається ріст попиту на використання енергоефективних та енергозберігаючих технологій. Це зумовлює тенденцію застосування теплових насосів, в тому числі широко починають використовуватися термоелектричні теплові насоси. Особливістю таких агрегатів є необхідність живлення великим струмом при відносно малій напрузі.

Стаття присвячена розробці потужного програмованого реверсивного джерела струму для використання в системах керування термоелектричними тепловими насосами. Таке джерело струму при потужності від 1кВт повинно відповідати наступним вимогам: мати високий ККД (мінімум 90%), мінімальні масо-габаритні характеристики, цифрове дистанційне керування, складатись з стандартних комплектуючих, які є доступні в масовому виробництві.

Перелік вирішених завдань. Розроблено структуру програмованого джерела струму. Розглянуто питання його апаратної й програмної реалізації з використанням одноплатного комп'ютера beaglebone black та виконавчого середовища Codesys V3.5.

Суть дослідження. Джерело живлення складається з AC/DC перетворювача (AC230V/DC48V 20A), керуваного джерела струму (0-10A, 45V max), керуваного мостового драйверу реверсу струму та ПЛК контролера керування. Структурна схема представлена на рисунку 1.



Рисунок 1 - Структурна схема потужного програмованого джерела струму для використання в системах керування термоелектричними тепловими насосами

На рисунку 2 зображено використані стандартні блоки з яких складається джерело живлення. Для реалізації AC/DC перетворювача використано два послідовно включених блоки живлення AC/DC СВ-500W-24V(а). В якості програмованого джерела струму використано DC-DC перетворювач з цифровим керуванням DPS5020 (б), керуючий програмований логічний контролер (ПЛК) реалізовано на одноплатному комп'ютері beaglebone black (в) з виконавчою системою Codesys, керований мостовий драйвер реалізований на чотирьох польових транзисторах, керування джерелом струму здійснюється за протоколом Modbus.



а

б

в

Рисунок 2 - а - блок живлення AC/DC CB-500W-24V; б - перетворювач DC-DC DPS5020; в - одноплатний комп'ютер beaglebone black

Фрагмент програми керування перетворювачем DC-DC DPS5020 за протоколом Modbus для виконавчого середовища Codesys наведено на рисунку 3.

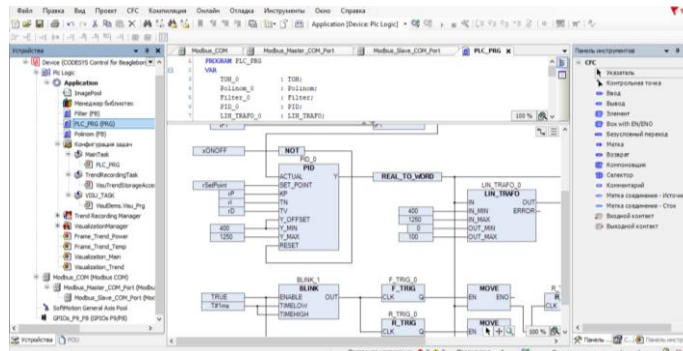


Рисунок 3 - Фрагмент програми у виконавчому середовищі CoDeSys.

В ролі Master виступає beaglebone black, в ролі Slave виступає перетворювач DC-DC DPS5020. При цьому до одного Modbus Master може бути одночасно підключено до 256 Modbus Slave. Всього beaglebone black має 6 UART портів, нумеруються вони від 0 до 5. Виконавче середовище CoDeSys сприймає їх як COM-порти з нумерацією 1 до 6 відповідно. 1-й COM-порт використовується для зовнішнього терміналу, тому в проекті для роботи обираємо COM2 (UART1). Під час налаштування Modbus Slave у виконавчому середовищі CoDeSys необхідно скористатися таблицею регістрів DC-DC перетворювача (табл.1).

Таблиця 1. Таблиця регістрів DC-DC перетворювача

Функція	Опис	Кількість байтів	Десяткові знаки	Одиниця	Читати писати	Адреса регістру
U-SET	Задане значення напруги	2	2	В	R/W	0000H
I-SET	Задане значення струму	2	2	А	R/W	0001H
UOUT	Фактичне значення вихідної напруги	2	2	В	P	0002H
IOUT	Фактичне значення вихідного струму	2	2	А	P	0003H
POWER	Фактичне значення вихідної потужності	2	1 або 2	В	P	0004H
UIN	Фактичне значення вхідної напруги	2	2	В	P	0005H
LOCK	Блокування органів керування	2	0	-	R/W	0006H
PROTECT	Статус захисту	2	0	-	P	0007H
CV/CC	Стан постійної напруги / постійного струму	2	0	-	P	0008H
ONOFF	Вихідний стан перетворювача	2	0	-	R/W	0009H

Для вибору діючого COM порта в дереві проекту вибираємо підрозділ MODBUS_COM і вказуємо номер робочого порту (рис. 4).

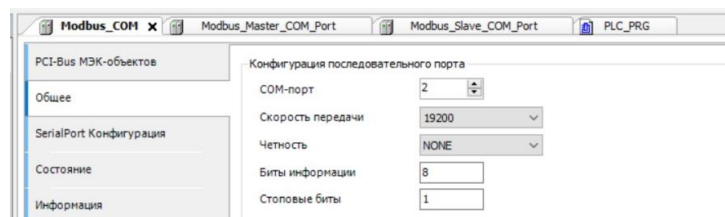


Рисунок 4 – налаштування Modbus в проекті.

Для налаштування параметрів протоколу MODBUS в дереві проекту вибираємо послідовно підрозділи MODBUS_MASTER та MODBUS_Slave та вводимо наступні параметри: протокол передачі RTU, таймаут відповіді 1000мс, проміжок часу між фреймами 10мс, адреса Modbus Slave 1, автоперезапуск з'єднання (рис. 5).

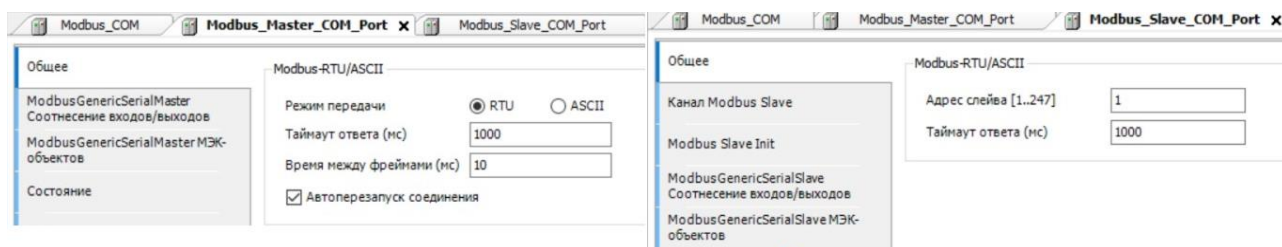


Рисунок 5 – налаштування Modbus Master та Modbus Slave у виконавчому середовищі CoDeSys.

Для налаштування каналів Modbus Slave в дереві проекту вибираємо пункт Канал Modbus slave та формуємо таблицю регістрів і команд (таблиця 1) згідно з документацією DPS5020 (рисунок 6).

Имя	Тип доступа	Триггер	Сдвиг READ	Длина	Обработка ошибок	Сдвиг WRITE	Длина	Комментарий
0 W_USET	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт				16#0000	1	
1 R_UOUT	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0002	1	Сохранить посл. значение			
2 W_ISET	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт				16#0001	1	
3 R_UOUT	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0003	1	Сохранить посл. значение			
4 W_ONOFF	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт				16#0009	1	
5 R_ONOFF	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0009	1	Сохранить посл. значение			
6 R_POWER	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0004	1	Сохранить посл. значение			

Рисунок 6 – таблиця регістрів і команд

Для прив'язки каналів Modbus Slave до змінних проекту в дереві проекту вибираємо пункт ModbusGenericSerialSlave (рисунок 7).

Переменная	Соотношение	Канал	Адрес	Тип	Единица	Описание
Application.PLC_PRG.WriteUSET2		W_USET2	%QX0-0	BIT		Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.USET2		W_USET	%QW1	ARRAY [0..0] OF WORD		Write Single Register
Application.PLC_PRG.xReadUOUT2		R_UOUT	%IX4-0	BIT		Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.UOUT2		R_UOUT	%IW0	ARRAY [0..0] OF WORD		Read Holding Registers
Application.PLC_PRG.xWriteISET2		R_UOUT[0]	%IW0	WORD		0x0002
Application.PLC_PRG.ISET2		W_ISET	%QX4-1	BIT		Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.ISET2		W_ISET	%QW3	ARRAY [0..0] OF WORD		Write Single Register

Рисунок 7 – співвідношення регістрів до змінних проекту

Використовуючи органи керування DC-DC перетворювача налаштуємо Slave адрес та швидкість обміну даними.

На рисунку 8 наведено структурну схему реверсивного джерела струму для живлення шести термоелектричних перетворювачів (ТЕП) TEC1-12710 які включено в два паралельні ланцюги кожен з яких є послідовною збіркою з трьох ТЕП. Для вирівнювання різниці струмів в ланцюгах послідовно включені балансуючі резистори.

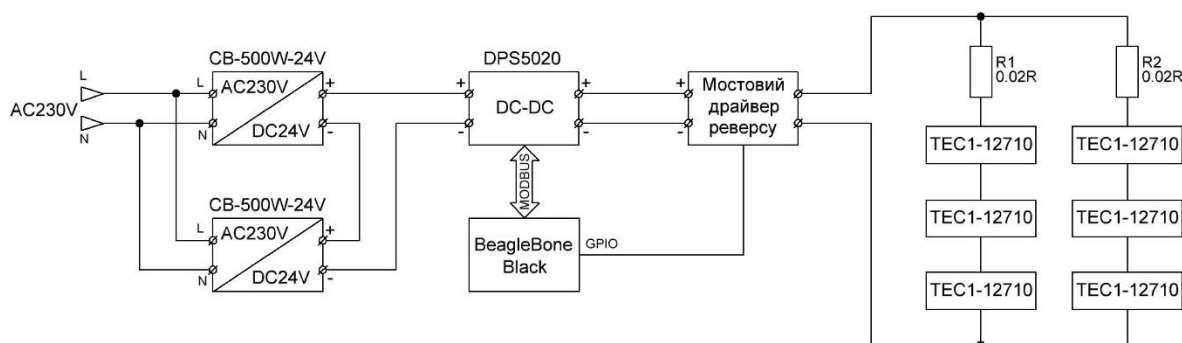


Рисунок 8 – схема електричних з'єднань.

Висновки. Розроблене програмоване джерело струму при відносно малих масо-габаритних характеристиках має максимальну потужність до 1000 Вт при струмі до 20А, зберігаючи значення ККД на високому рівні (94-96%), підтримує можливість цифрового дистанційного керування за протоколом MODBUS, складається з загально-доступних елементів вартістю до 120 USD.

Список літератури

- [1]. DPS5020 file – Google Диск - https://drive.google.com/drive/folders/1Yexv_WoXYMtnnO4fUvltQDUX7falAo2N
- [2]. CODESYS Control for BeagleBone SL | CODESYS Store International - <https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html>
- [3]. Jantharamin N., Thongbuaban P. Maximum-power-point tracking using multiphase interleaved converters based on multi-unit synchronization //2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (Busan, South Korea, 26-29 Oct. 2013) – Busan, 2013. – P. 1528–1531.
- [4]. Beagleboard:BeagleBoneBlack Debian - eLinux.org - https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays
- [5]. Setting Up the BeagleBone Black's GPIO Pins (vadl.github.io) - <https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio>

КОНТРОЛЕР З ВИКОНАВЧИМ СЕРЕДОВИЩЕМ CoDeSys НА БАЗІ ОДНОПЛАТНОГО КОМП'ЮТЕРА BEAGLEBONE BLACK

Петренко Д. С., Філярський В. І., Пашков С. О., Мазур О. В. (mazur.a.v.ua@gmail.com, filyarsky@gmail.com, dmytropetrenko00@gmail.com, sergypashkov2001@gmail.com)

Одеський національний технологічний університет, (Україна)

В дослідженні розглянуто методика розробки контролера для використання в вбудованих системах керування з виконавчим середовищем codesys на базі одноплатного комп'ютера beaglebone black, особливості завантаження програмного забезпечення, конфігурування функцій пінів GPIO контролера. В результаті отримуємо програмований логічний контролер з вільним налаштуванням системи введення/виведення та підтримкою протоколів UART, I2C, SPI, USB2.0, mini-USB, Ethernet, HDMI, 7AI, 45DI/DO, ШІМ.

Постановка проблеми. Промислові програмовані логічні контролери ПЛК стали невід'ємною частиною сучасних систем керування. Хоча кількість та різноманіття поставлених перед ними задач тільки зростають, більшість ПЛК мають закриту та жорстку архітектуру і, у зв'язку з цим, відносно обмежений функціонал. Ціна та специфічні особливості експлуатації таких ПЛК ускладнюють їх використання для домашньої автоматизації та у навчальних цілях. Стаття присвячена розробці ПЛК, який матиме відкриту архітектуру, потужним виконавчим середовищем, підтримуватиме більшість сучасних протоколів зв'язку, матиме широкий функціонал і при цьому низьку ціну.

Перелік вирішених завдань. Розроблено ПЛК з виконавчим середовищем codesys на базі одноплатного комп'ютера beaglebone black. Розглянуто функціональні можливості одноплатного комп'ютера beaglebone black а також особливості роботи з ним. Розглянуто функціональні можливості виконавчого середовища codesys.

Суть дослідження. Для реалізації ПЛК, орієнтованого на використання у вбудованих системах керування, обрано одноплатний комп'ютер beaglebone black з операційною системою (ОС) Linux.

Живлення плати beaglebone black відбувається через USB-кабель, або зовнішнє джерело живлення 5 В постійного струму, але це рідко потрібно. Зв'язок з ПК забезпечується через USB-кабель або LAN-порт (рис. 1).

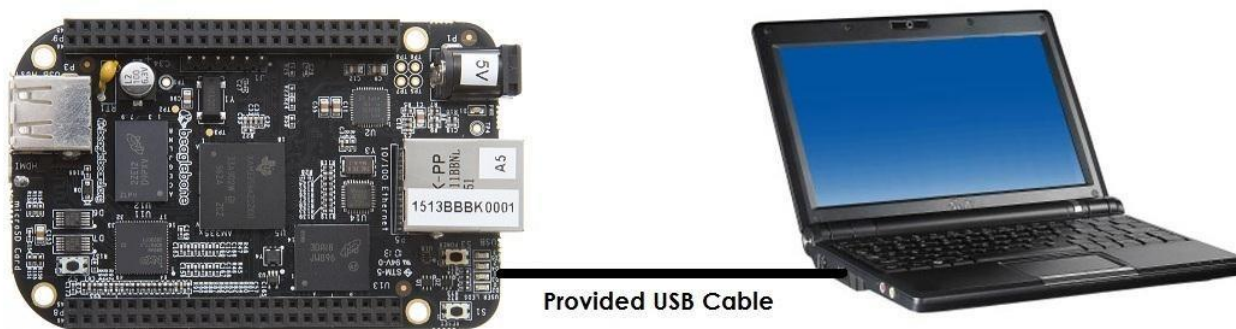


Рисунок 1 – підключення beaglebone black до ПК через USB-кабель

Тип завантаженого образу ОС залежить від об'єму eMMC пам'яті beaglebone black. Встановити дистрибутив Linux на eMMC плати можливо з SD-накопичувача. Запуск ОС також доступний безпосередньо і з SD-накопичувача. За перебігом встановлення ОС можна спостерігати за допомогою термінальної програми персонального комп'ютера (ПК), підключивши beaglebone black через зовнішній UART/USB конвертер до ПК. Для стабільної роботи системи встановлювати найсучаснішу версію Debian.

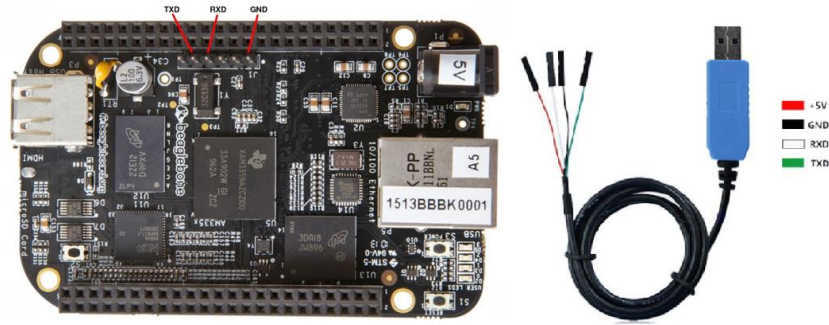


Рисунок 2 - beaglebone black зовнішній UART/USB конвертер

Після вдалої інсталяції ОС Linux, на beaglebone black встановлюємо виконавчу систему codesys (рис 2).

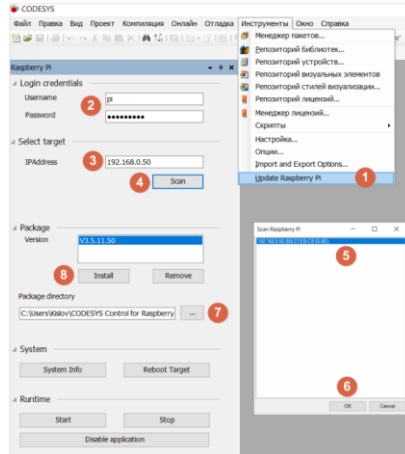


Рисунок 2 – Встановлення виконавчої системи codesys на beaglebone black

Особливістю beaglebone black є те, що більшість контактів GPIO плати може мати декілька призначень (рис 3), які ми конфігуруємо в залежності від поставленої задачі.

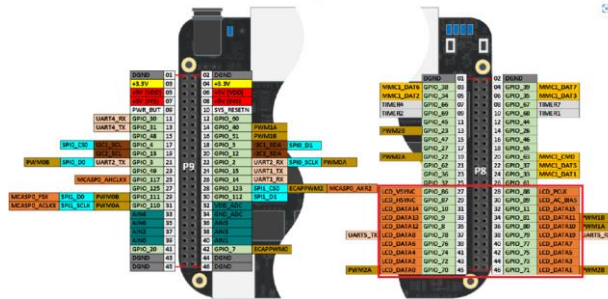


Рисунок 3 – Призначення контактів beaglebone black

Налаштування функцій пінів плати здійснюється шляхом редагування конфігураційних файлів beaglebone black через Putty - термінальну програму ПК(рис 5).

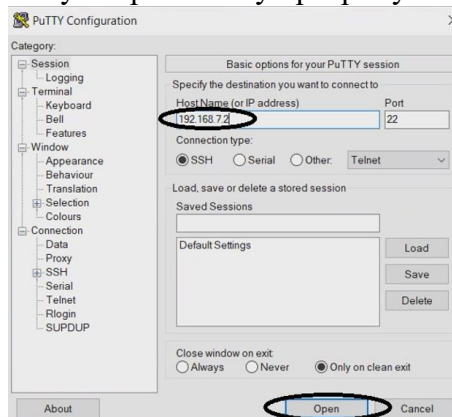


Рисунок 5 – вікно термінальної програми

```
login as: debian
Pre-authentication banner message from server:
Debian GNU/Linux 10

|
| BeagleBoard.org Debian Buster Console Image 2023-05-03
| Support: https://bbb.io/debian
| default username:password is [debian:temppwd]
|
End of banner message from server
debian@192.168.7.2's password:

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Thu Jul 6 13:38:07 2023 from 192.168.7.1
debian@beaglebone:~$ sudo nano /boot/uEnv.txt
[sudo] password for debian:
debian@beaglebone:~$ █
```

Рисунок 6 - вікно терміналу beaglebone black

У вікні терміналу beaglebone black авторизуємося (за замовчуванням логін : debian, пароль: temppwd). Для доступу до редагування конфігураційного файлу виконуємо команду `sudo nano /boot/uEnv.txt` (рис 6). Після завершення зберігаємо відредагований конфігураційний файл для подальшого використання.

Наприклад, для того щоб звільнити під DI/DO піни GPIO зконфігуровані для роботи з HDMI необхідно:

- розкоментувати (видалити решітки “#”) два рядки: `disable_uboot_overlay_video=1`
`disable_uboot_overlay_audio=1`;
- виконати команду Write Out, затиснувши клавіші Ctrl+O;
- виконати команду «перезаписати» затиснувши клавіші Ctrl+(M+A);
- затиснути клавіші Ctrl+X для виходу.

Для активувації UART, необхідно знайти в конфігураційному файлі рядок `#uboot_overlay_addr4=<file4>.dtbo`, та замінити його на `uboot_overlay_addr4=/lib/firmware/BB-UART1-00A0.dtbo`.

Висновки. Таким чином на базі доступного апаратного та програмного забезпечення (beaglebone black + codesys v3.5) ми отримали ПЛК з відкритою архітектурою та підтримкою інтерфейсів UART, I2C, SPI, USB2.0, mini-USB, Ethernet, HDMI, 7AI, 45DI/DO, PWM.

Список літератури

- [1]. CODESYS Control for BeagleBone SL | CODESYS Store International - <https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html>
- [2]. Терморегулятори BeagleBone Black, конфігурація штифтів, особливості та застосування (microcontrollerslab.com) - <https://microcontrollerslab.com/beaglebone-black-pinout-pin-configuration-features-applications/>
- [3]. PowerPoint-Präsentation (codesys.com) <https://www.codesys.com/fileadmin/data/Images/Download/CODESYS-Features-Improvements-ly.pdf>
- [4]. BeagleBone Black — BeagleBoard Documentation - <https://docs.beagleboard.org/latest/boards/beaglebone/black/index.html>
- [5]. Beagleboard:BeagleBoneBlack Debian - eLinux.org - https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays
- [6]. Setting Up the BeagleBone Black's GPIO Pins (vadl.github.io) - <https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio>

МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В
СЕРЕДОВИЩІ MATLAB Simulink ДЛЯ КОНТРОЛЕРІВ З ВИКОНАВЧОЮ СИСТЕМОЮ
CoDeSys V3.5Пашков С. О., Філярський В. І., Петренко Д. С. (sergypashkov2001@gmail.com,
filyarsky@gmail.com, dmytropetrenko00@gmail.com)

Одеський національний технологічний університет, (Україна)

В дослідженні розглянута методика використання середовища Matlab Simulink для модельно-орієнтованого проектування програмного забезпечення програмованих логічних контролерів (ПЛК) з виконавчою системою CoDeSys V3.5.

Постановка проблем. Після розробки та тестування алгоритмів безперервного та логіко-програмного керування, спеціалістами з систем керування, під час програмування ПЛК спеціалістами-програмістами подекуди виникають різноманітні проблеми пов'язані з «людським» фактором, які призводять до неточної реалізації алгоритму в програмному коді. Одним з шляхів запобігання цих помилок є використання модельно-орієнтованого проектування програмного забезпечення, що дозволяє розробляти та проводити імітаційне моделювання як усієї системи цілком, так і її компонентів. А автоматична генерація програмного коду зменшує вірогідність появи більшості помилок пов'язаних із людським фактором та дозволяє суттєво скоротити час розробки та верифікації прикладного програмного забезпечення. Одним з інструментів модельно-орієнтованого проектування є пакет прикладних програм MATLAB та його додаток для візуального програмування при моделюванні динамічних систем SIMULINK. Додаток Simulink PLC Coder дозволяє конвертувати отриманий алгоритм або його частини у програмний код для подальшого використання в різноманітних ПЛК. У статті розглянуто процес конвертації частини алгоритму у програмний код та його імпорт у виконавче середовище CoDeSys V3.5.

Перелік вирішених завдань. У дослідженні розглянуті питання використання модельно-орієнтованого проектування при розробці алгоритмів керування на прикладі реалізації фільтра низьких частот у середовищі Matlab Simulink, генерації програмного коду згідно стандарту ІЕС 61131-3 та його імпорт у середовище CoDeSys V3.5.

Суть дослідження. Додаток Simulink PLC Coder доступний на версіях Matlab 2012a та новіших, тому розробка фільтру проводилась у версії Matlab 2022b. До прикладу розглянемо задачу реалізації фільтру низьких частот другого порядку з передатною функцією $\frac{10p+1}{(2p+1)^2}$ та часом квантування $T_k = 0.1$ с. Переведемо задану передатну функцію з неперервного часу у дискретний і в результаті отримуємо наступне рівняння $\frac{101-100z^{-1}}{441-840z^{-1}+400z^{-2}}$. У найпростішому випадку для реалізації передатної функції фільтра скористаємося елементом Discrete Filter з бібліотеки plclib для чого у командному рядку Matlab необхідно прописати команду «plclib». Копіюємо обраний блок у поле Simulink, записуємо у ньому z-передатну функцію та встановлюємо час квантування Sample Time = 0.1. Налаштування Discrete Filter наведені на рисунку 1.

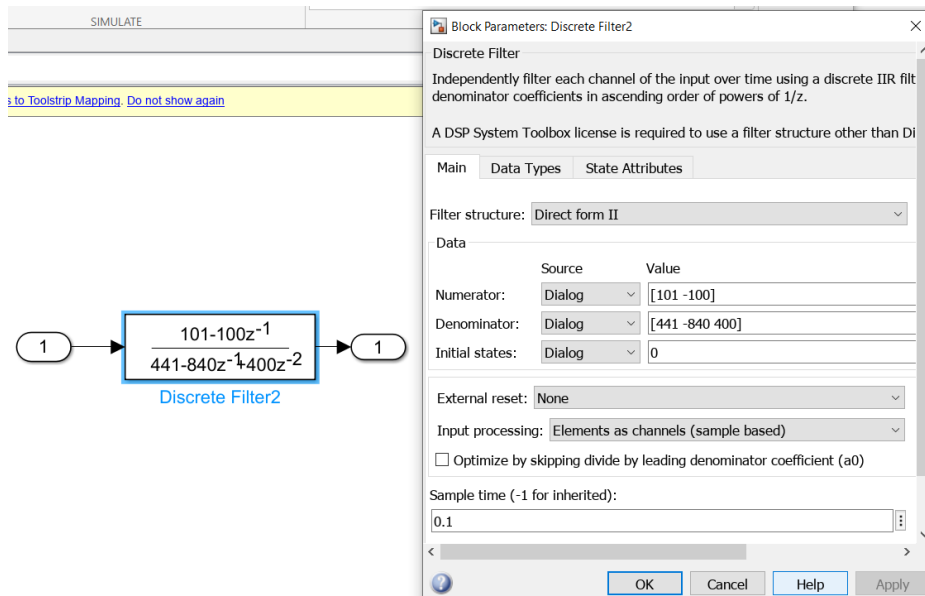


Рисунок 1 – Реалізація фільтру низьких частот у цифровій формі в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink

Далі отриманий алгоритм об'єднуємо у підсистему яку далі розглядаємо як окрему частину. Для цього виділяємо фільтр, натискаємо праву кнопку миші, обираємо «Create subsystem for selection», переходимо у параметри підсистеми та ставимо галочку навпроти «Treat as atomic unit». На рисунку 2 наведено налаштування підсистеми з фільтром.

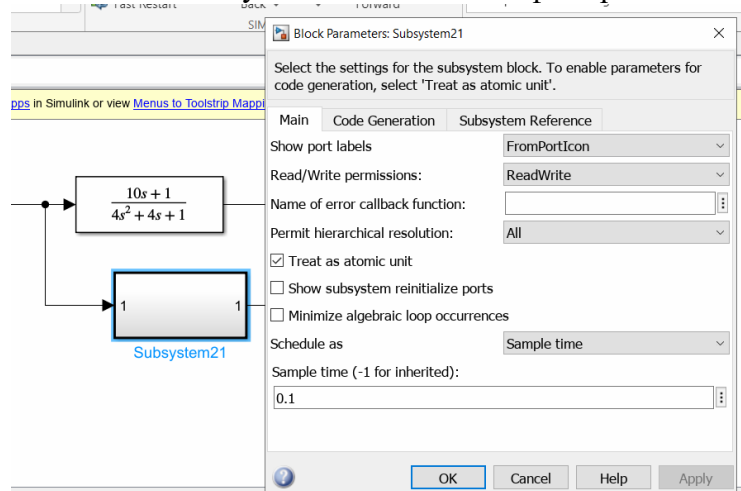


Рисунок 2 – Налаштування підсистеми алгоритму

Перед генерацією програмного коду необхідно обрати цільове інтегроване середовище розробки. Для цього натискаємо правою кнопкою миші по підсистемі та переходимо у «PLC Code => Options...», де у рядку «Target IDE» обираємо, в нашому випадку, «3S CoDeSys 3.5». Щоб згенерувати код натискаємо правою кнопкою миші по підсистемі => «PLC Code => Generate Code for Subsystem». Після чого автоматично створюються файл ST та XML Document що мають таку ж назву як і файл Simulink.

Для імпорту файлів та оновлення компонентів з Simulink PLC Coder необхідно встановити плагін CODESYS «Simulink PLC Coder Import». Далі відкриваємо проект CODESYS, переходимо в меню «Проект => Simulink PLC Coder Import...» та обираємо «Add and import PLC Coder files...» після чого відкриваємо згенерований XML Document. Для використання згенерованої частини програмного коду необхідно додати блок «Елемент» та підписати його назвою підсистеми в Simulink. На рисунку 3 показаний функціональний блок фільтра у виконавчому середовищі CoDeSys V3.5.



Рисунок 3 – Згенерований програмний код фільтра у вигляді функціонального блоку у виконавчому середовищі CoDeSys V3.5.

Висновок. Simulink PLC Coder надає можливість генерувати апаратно-незалежні структуровані текстові та сходові діаграми IEC 61131-3 із моделей Simulinkmodels, діаграм стану та функцій MATLAB. Структурований текст генерується в PLCopen XML та інших форматах файлів, які підтримуються більшістю інтегрованими середовищами розробки (IDE), включаючи програмні рішення 3S-Smart CODESYS, Rockwell Automation Studio 5000, Siemens TIA Portal і Omron Sysmac Studio. Ви можете скопіювати та розгорнути отриману програму на численних програмованих логічних контролерах та програмованих контролерах автоматизації. Інструмент «Simulink PLC Coder Import» дозволяє імпортувати файли Simulink PLC Coder і оновлювати імпортовані компоненти. Всі імпортовані компоненти можуть оновлюватися автоматично з підтвердженням або без нього. Поведінку оновлення можна встановити для кожного імпортованого файлу.

Список використаної літератури

- [1]. Модельно-орієнтоване проектування програмного забезпечення для вбудовуваних систем в середовищі Matlab/Simulink. Топораш Г.К., Мазур А.В., Ковальчук Д. А., Пушкін А.А. Одеська Національна Академія Харчових Технологій, м. Одеса, 2014. Available: https://www.researchgate.net/publication/307758793_Modelno-orientirovannoe_proektirovanie_programmnogo_obespecenia_dla_vstraivaemyh_sistem_v_srede_MatlabSimulink.
- [2]. Кодер ПЛК Simulink - MATLAB (mathworks.com) <https://www.mathworks.com/products/simulink-plc-coder.html>
- [3]. PowerPoint-Präsentation (codesys.com) <https://www.codesys.com/fileadmin/data/Images/Download/CODESYS-Features-Improvements-lv.pdf>
- [4]. Simulink PLC Coder(TM) Import (codesys.com) <https://us.store.codesys.com/simulink-plc-coder-import.html>
- [5]. Simulink PLC Coder Import — Product Data Sheet V0.0.0.1 (codesys.com) https://us.store.codesys.com/media/n98_media_assets/files/000062-F/2/Simulink%20PLC%20Coder%20Import_en.pdf
- [6]. Генерація коду - MATLAB і Simulink (mathworks.com) https://www.mathworks.com/help/overview/code-generation.html?s_tid=hc_product_group_bc
- [7]. Кодер ПЛК Simulink Документації (mathworks.com) https://www.mathworks.com/help/plccoder/index.html?s_tid=hc_product_card
- [8]. Обмеження на генерацію структурованого текстового коду - MATLAB і Simulink (mathworks.com) <https://www.mathworks.com/help/plccoder/ug/structured-text-code-generation-limitations.html>

ДОДАТОК Г1

EFFICIENT AUTOMATIC CONTROL OF THE ENERGY-SAVING PROCESS OF
DEALCOHOLIZATION OF WINE IN THE FLOW IN A THERMOELECTRIC HEAT
PUMP INSTALLATION

Developed by :

Art. c. Am - 10

Serhiy Pashkov

Head :

Ph.D., senior Lecturer departments of ATP and RS

Dmytro Kovalchuk

Рис. Г – Перший слайд презентації з міжнародного конкурсу студентських наукових робіт «Black Sea Since 2023»

Authors: Dmytro Petrenko
Serhii Pashkov

Advisor: Dmytro Kovalchuk
Odesa National University of Technology (Ukraine)

Abstract. *The structure of the programmable current source has been developed. The issue of its hardware and software implementation is considered. A PLC with the codesys execution environment was developed on the basis of a beaglebone black single-board computer. The functional capabilities of the beaglebone black single-board computer, as well as the features of working with it, are considered. Functionality of the codesys execution environment is considered.*

Key words: *PLC, TEC, programmable current source, codesys execution environment, Modbus communication protocol , heat pump .*

I. INTRODUCTION

Industrial PLC programmable logic controllers have become an integral part of modern control systems. Although the number and variety of tasks set before mine are only growing, most PLCs have a closed and rigid architecture and, in this regard, relatively limited functionality. The price and specific features of operation of such PLCs make it difficult to use them for home automation and for educational purposes.

Recently observed growth demand for use energy-efficient and energy-saving technologies. It causes trend application thermal pumps, including widely start to be used thermoelectric heat pumps. A feature of such units is necessity power supply with a large current at relatively small voltage. Therefore, the development of a programmable power source for use in an embedded thermoelectric heat pump control system is an urgent task.

II. LITERATURE ANALYSIS

BeagleBone ® Black [1] is a low-cost development platform with high level extension that is supported community , for developers and hobbyists. Users they can download Linux [2] less than in 10 seconds and start development less than in 5 minutes with help only one USB cable. It was equipped with a minimal set of peripherals to allow the user to experience the power of the processor, while also offering access to many interfaces and allowing the use of add-on boards called capes to add many different combinations of functions [3]. The CODESYS runtime environment contained in the product is especially adapted that the Beaglebone Black, the community supported hardware. With a CODESYS single device license (SL), users can permanently realize a PLC device and use functions of the freely available development environment CODESYS Development System that configure it in IEC 61131-3.

The software package contains an extension for the CODESYS programming environment, with which an update mechanism is integrated in order that install the runtime environment he the BeagleBone Black without LINUX knowledge. The

installation of the CODESYS Runtime component on the BeagleBone Black takes place in the form of a Debian package, directly from the CODESYS Development System [4].

Laboratory power supply unit DC-DC 0-50 V 20 A DPS5020 is a powerful programmed source step-down power supply DC-DC converter, LCD display and external communication. Ideally suitable for creating a powerful laboratory power supply unit. It consists of 2 modules: control and power, connected by a cable 20 cm long [5].

III. OBJECT, SUBJECT AND RESEARCH METHODS

Formulation of the purpose of the work. The development of a PLC that will have an open architecture, a powerful execution environment, will support most modern communication protocols, will have a wide range of functionality and, at the same time, a low price; development of a powerful programmable reversible current source for use in control systems thermoelectric heat pumps, which at power from 1 kW should correspond next requirements: mother high efficiency (minimum 90%), minimal mass and dimensional characteristics, digital remote management, consist of standard components that are available in bulk production.

Object research is programmable reversible current source for use in control systems thermoelectric heat pumps with a PLC control controller based on a beaglebone black single-board computer with the Linux operating system (OS).

The subject of research is development programmable reversible _ current sources for use in control systems thermoelectric heat pumps with a PLC control controller based on a beaglebone black single-board computer with the Linux operating system (OS).

Methods research: the method of object - oriented programming, the method of computer modeling, the method of programming real-time systems.

IV. RESULTS

Source feeding consists of an AC/DC converter (AC 230 V / DC 48 V 20 A), controlled current sources (0-10A, 45 V max), controlled current reverse bridge driver and PLC control controller. The structural diagram is presented in Figure 1.



Figure 1 - Structural diagram of a powerful programmable current sources for use in control systems thermoelectric heat pumps

Figure 2 shows used standard blocks of which consists source power supply. For implementation AC / DC converter used two in a row included power supplies AC/DC

CB -500 W -24 V (a). As programmable sources current is used DC-DC converter with digital management DPS 5020 (b), manager programmed the logic controller (PLC) is implemented on a single-board computer beaglebone black with Codesys executive system, managed the bridge driver is implemented on four field transistors, control current source is carried out according to the Modbus protocol .



Figure 2 - a - power supply unit AC / DC CB -500 W -24 V; b - DC-DC converter DPS5020; single-board computer beaglebone black

A beaglebone single-board computer was chosen for the implementation of the control controller PLC, oriented for use in a programmable power source black with the Linux operating system (OS).

Power board beaglebone black occurs by a USB cable, or an external 5V DC power supply, but this is rarely required. Communication with a PC is provided by a USB cable or a LAN port (Fig. 3).

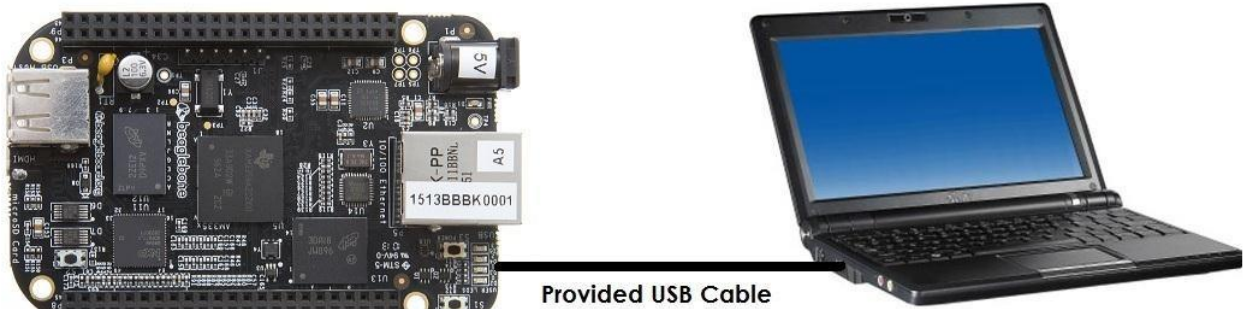


Figure 3 - beaglebone connection black to PC via USB cable

The type of bootable OS image depends on the amount of eMMC memory of the beaglebone black. It is possible to install the Linux distribution on the eMMC board from an SD storage device. Launching the OS is also available directly from the SD storage. The progress of the OS installation can be monitored using the terminal program of a personal computer (PC) by connecting the beaglebone black through an external UART / USB converter to a PC (Fig. 4). For stable operation of the system, install the most modern version of Debian .

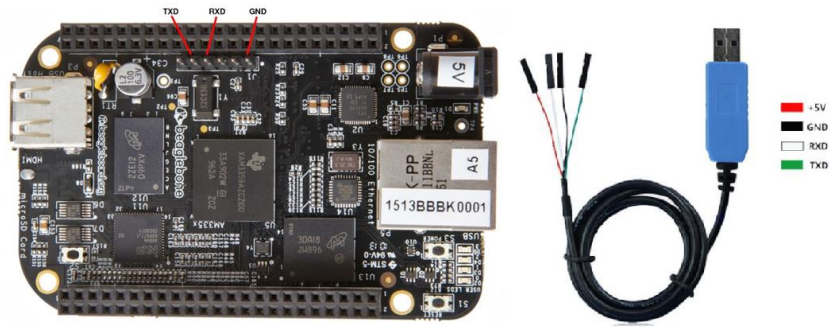


Figure 4 - beaglebone black external UART / USB converter

After successful installation of Linux OS on beaglebone black install the codesys executive system (Fig. 5).

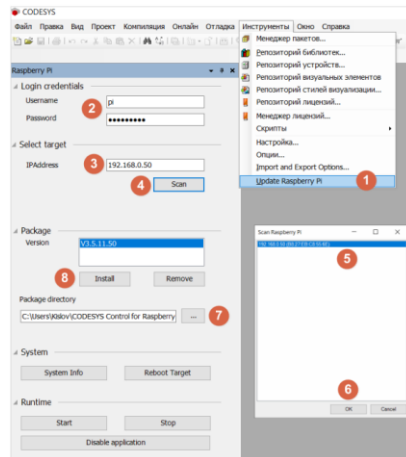


Figure 5 - the codesys executable on beaglebone black

A feature of the beaglebone black is that most of the GPIO contacts of the board can have several assignments (Fig. 6), which we configure depending on the task at hand. Communication between the controller and the power source is carried out by UART.

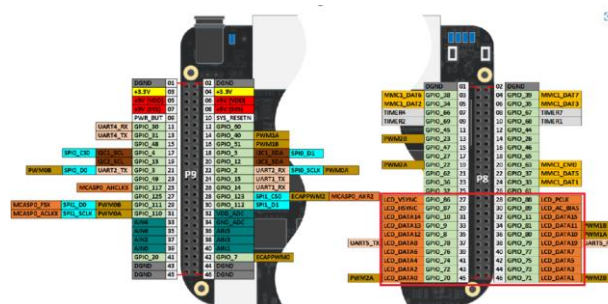


Figure 6 – Beaglebone pin assignments black

Pin functions are configured by editing the beaglebone configuration files black through Putty - a PC terminal program (Fig. 7).

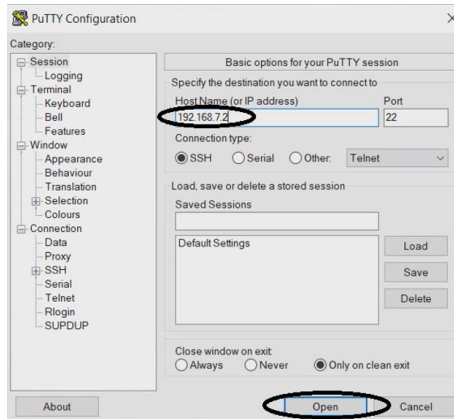


Figure 7 – the window of the terminal program

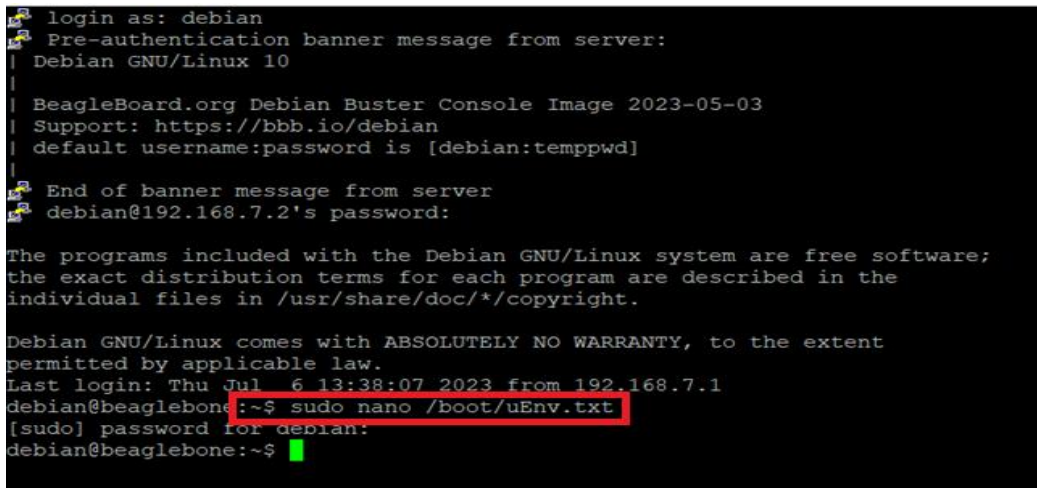


Figure 8 – beaglebone terminal window black

In the beaglebone terminal window black login (default login: debian , password: temppwd). To access the editing of the configuration file, execute the sudo command nano / boot / uEnv.txt (Fig. 8). After completion, save the edited configuration file for further use.

To activate UART , you need to find the line #uboot_overlay_addr4=<file4> in the configuration file. dtbo , and replace it with uboot_overlay_addr4=/ lib / firmware /BB-UART1-00A0.dtbo.

A fragment of the program management converter DC-DC DPS 5020 by Modbus protocol for executive environment Codesys is shown in Figure 9.

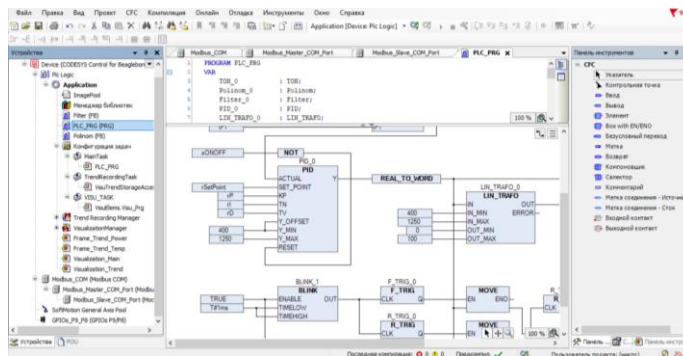


Figure 9 - Fragment of the program in the executive environment CoDeSys .

In the role Master stands out beaglebone black, in the role Slave stands out transformer DC - DC DPS 5020. At the same time, up to one Modbus Master can be at the same time connected to 256 Modbus Slave . In total beaglebone black has 6 UARTs ports, they are numbered from 0 to 5. Executive environment CoDeSys perceives them as COM ports numbered 1 to 6, respectively. The 1st COM port is used for external terminal, therefore in the project for work select COM2 (UART 1). During setup Modbus Slave in executive environment CoDeSys necessary use the table of registers DC-DC converter (Table 1).

Table 1. Table registers DC - DC converter

Function	Description	Number bytes	Decimal marks	Unit	Read write	Register address
U-SET	Given value voltage	2	2	IN	R/W	0000H
I-SET	Given current value	2	2	AND	R/W	0001H
UOUT	Actual value outgoing voltage	2	2	IN	R	0002H
IOUT	Actual value output current	2	2	AND	R	0003H
POWER	Actual value outgoing power	2	1 or 2	IN	R	0004H
UIN	Actual value incoming voltage	2	2	IN	R	0005H
LOCK	Locking bodies management	2	0	-	R/W	0006H
PROTECT	Protection status	2	0	-	R	0007H
CV/CC	The state is permanent voltage / direct current	2	0	-	R	0008H
ONOFF	The initial state of the converter	2	0	-	R/W	0009H

To choose active Select the COM port in the project tree unit MODBUS _ COM and indicate the working port number (Fig. 10).

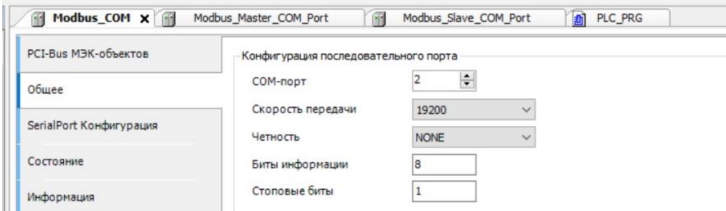


Figure 10 - settings Modbus in the project .

To configure of the MODBUS protocol parameters in the project tree successively subdivisions MODBUS _ MASTER and MODBUS _ Slave and enter the following parameters: transmission protocol RTU, response timeout 1000ms, time interval between frames 10ms, Modbus address Slave1, auto restart connection (Fig.11).

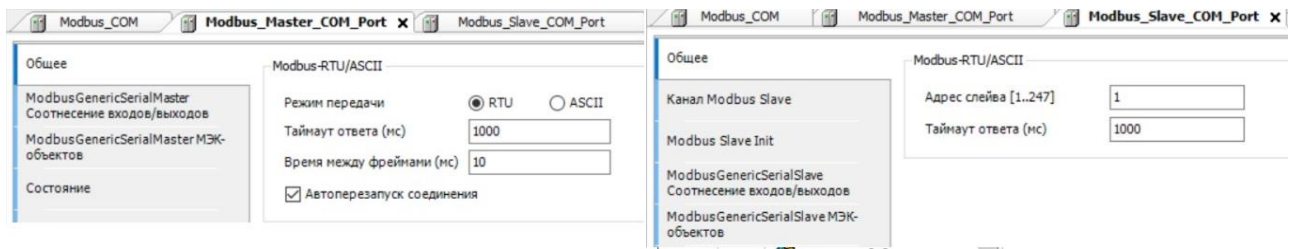


Figure 11 - settings Modbus Master and Modbus Slave in executive environment CoDeSys .

To configure channels Modbus Slave in the project tree, select the Modbus Channel item slave and form table registers and commands (table 1) according to the documentation DPS 5020 (Fig. 12).

Имя	Тип доступа	Триггер	Сдвиг READ	Длина	Обработка ошибок	Сдвиг WRITE	Длина	Комментарий
0 W_USET	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт				16#0000	1	
1 R_UOUT	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0002	1	Сохранить посл. значение			
2 W_ISET	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт				16#0001	1	
3 R_IOUT	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0003	1	Сохранить посл. значение			
4 W_ONOFF	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт				16#0009	1	
5 R_ONOFF	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0009	1	Сохранить посл. значение			
6 R_POWER	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0004	1	Сохранить посл. значение			

Figure 12 - a table registers and commands

For binding channels Modbus Slave to the project variables in the project tree, select the ModbusGenericSerialSlave item (Figure 13).

Переменная	Соотнесение	Канал	Адрес	Тип	Единица	Описание
Application.PLC_PRG.WriteUSET2		W_USET2	%QW0	BIT		Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.USET2		W_USET	%QW1	ARRAY [0..0] OF WORD		Write Single Register
Application.PLC_PRG.xReadUOUT2		R_UOUT	%QW4	WORD		0x0000
Application.PLC_PRG.xReadIOUT2		R_IOUT	%QX4	BIT		Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.IUOUT2		R_IOUT[0]	%IW0	ARRAY [0..0] OF WORD		Read Holding Registers
Application.PLC_PRG.xWriteISET2		W_ISET	%QW1	BIT		0x0002
Application.PLC_PRG.xWriteISET2		W_ISET	%QW3	ARRAY [0..0] OF WORD		Триггерная переменная
						Write Single Register

Figure 13 - ratio registers to project variables

Using bodies management DC - DC converter we adjust Slave address and speed exchange given.

Figure 14 shows the structural diagram of a reversible current source for powering six thermoelectrics converters (TEP) TEC 1-12710 which are included in two parallel chains each of which is consecutive a collection of three TEPs. For alignment differences currents in circuits successively included balancing resistors.

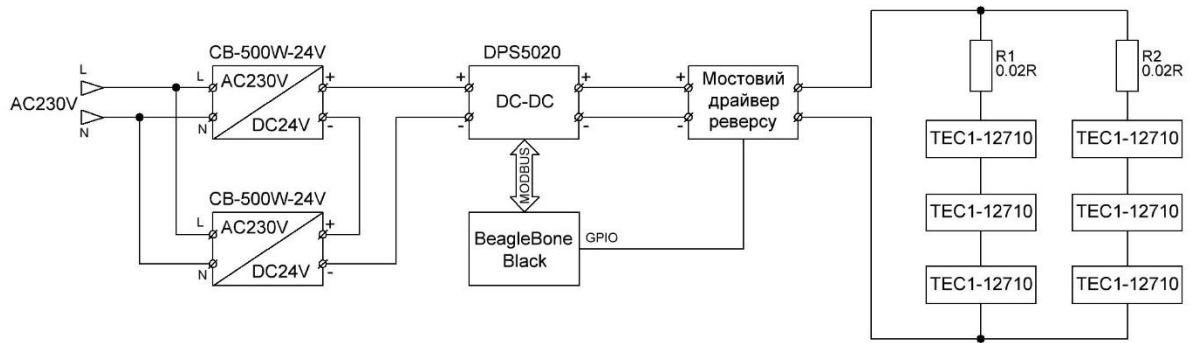


Figure 14 is an electrical scheme connections.

V. CONCLUSIONS

So based on available hardware and software (beaglebone black + codesys v 3.5) we got a PLC with open architecture and support for UART, I2C, SPI, USB 2.0, mini - USB, Ethernet, HDMI, 7 AI, 45 DI / DO, PWM interfaces.

Developed programmed current source at relatively small has mass and dimensional characteristics maximum power up to 1000 W at a current of up to 20A, while saving the efficiency value is high levels (94-96%), supports possibility of digital remote management according to the MODBUS protocol, consists of publicly available elements worth up to 120 USD.

VI. REFERENCES

1. BeagleBone Black is a BeagleBoard Documentation - <https://docs.beagleboard.org/latest/boards/beaglebone/black/index.html>
2. Beagleboard: BeagleBoneBlack Debian - eLinux.org - https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays
3. Setting Up the BeagleBone Black's GPIO Pins (vadl.github.io) - <https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio>
4. CODESYS Control for BeagleBone SL | CODESYS Store International - <https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html>
5. DPS 5020 file - Google Drive - https://drive.google.com/drive/folders/1Yexv_WoXYMtnnO4fUvltQDUX7falAo2N

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЛІВКОВОГО ВИПАРНИКА ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

Пашков. С. О. Мазур О. В.

Одеський національний технологічний університет mazur.a.v.ua@gmail.com

При виробництві різноманітних алкогольних напоїв зазвичай постає проблема нормалізації вмісту алкоголю в готовому продукті. Процес деалкоголізації застосовується для зменшення вмісту алкоголю в одних продуктах та отримання спирту для зміцнення інших. Для підвищення енергоефективності процесу та поліпшення якості отриманих продуктів зазвичай використовується вакуумна дистиляція у плівкових випарниках. Використання термоелектричних перетворювачів (ТЕП) дозволяє значно зменшити енергетичні витрати при реалізації таких процесів. Розробка ефективних САК не можлива без наявності імітаційної математичної моделі такого процесу як об'єкту керування (ОК).

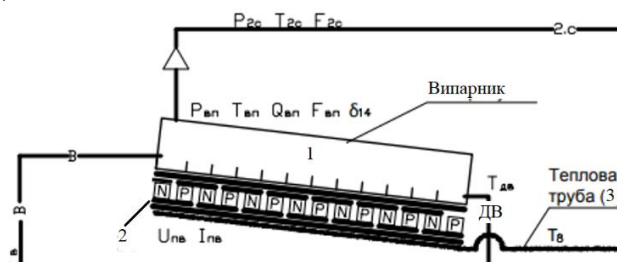


Рисунок 1 - Технологічна схема термоелектричного плівкового випарника

Де: 1- паровий канал випарника; 2 – ТЕП; 3 – теплова труба; в – подача виноматеріалу; ДВ – відвід деалкоголізованого виноматеріалу; 2.с – паропровід.

В результаті аналізу процесів що протікають в комірці термоелектричного плівкового випарника з одним ТЕП як об'єкту керування було прийнято наступну структуру його математичної моделі (рис.2). Вона включає в себе чотири основні складові: модель термоелектричного перетворювача (ТЕП), модель теплопередачі через стінку, модель тепломасообмінних процесів у випарнику та модель перепаду тиску в паровому каналі комірці плівкового випарника.

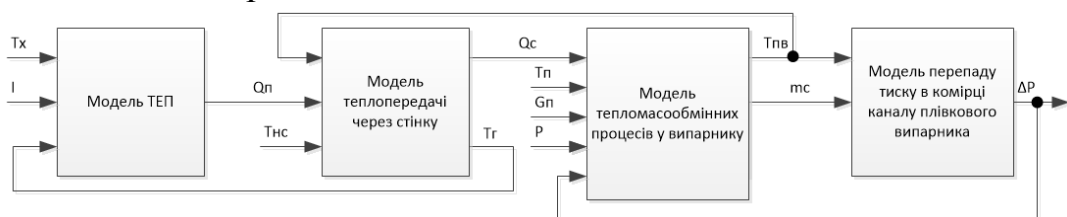


Рисунок 2 – Структурна схема математичної моделі термоелектричного плівкового випарника як об'єкту керування

На рисунку прийняті наступні позначення: T_r – абсолютна температура гарячої сторони; T_x – абсолютна температура холодної сторони; I – струм від

вхідного джерела живлення; Q_x - «холодного» теплового потоку; Q_r - величина «гарячого» теплового потоку; $T_{пв}$ - температура продукту в випарнику; $T_{нс}$ - температура навколишнього середовища; Q_c - величина теплового потоку через плоску стінку.

Математична модель теплопередачі через плоску стінку.

Моделі температури стінки з гарячої сторони $t_{ст1}$ (1) та теплового потоку крізь неї Q (2) мають вигляд:

$$t_{ст1} = \int \frac{\left(\frac{Q_{ГВ}-R_{СТ}}{F} + t_{ст2} \right) - \left(t_{ст2} - \frac{Q_{ГВ}-R_{СТ}}{F} \right) - t_{ст1.1}}{R_{СТ}} \cdot F - Q_{ГВ} dt + t_{нс} \quad (1)$$

$$Q = Q_{ГВ} - \left(\frac{\left(\left(\frac{Q_{ГВ}-R_{СТ}}{F} + t_{ст2} \right) - \left(t_{ст2} - \frac{Q_{ГВ}-R_{СТ}}{F} \right) - t_{ст1} \right) \cdot F}{R_{СТ}} - Q_{ГВ} \right) \quad (2)$$

Де: $t_{ст1}$ і $t_{ст2}$ - температури стінки з гарячої та холодної сторони відповідно; $\Delta t = t_{ст1} - t_{ст2}$ - температурний напір; $R_{СТ}$ - термічний опір теплопровідності (стінки); F - товщина стінки; k - еквівалентний коефіцієнт теплопровідності; $c_{ст}$ - питома теплоємність матеріалу стінки; $m_{ст}$ - маса стінки; $t_{ст1.1}$ - температури стінки з гарячої сторони на крок раніше; $t_{ст1} = T_r$, $t_{ст2} = T_{пв}$.

Математична модель тепломасообмінних процесів у випарнику.

Модель зміни температури продукту в комірці випарника ($T_{пв}$) описується системою рівнянь (3).

$$T_{пв} = \begin{cases} \int \frac{Q_{ГВ}}{c_{п} \cdot G_{п}} dt + T_{п}; T_{пв} < T_{к}, m_{зал.спирту} > 0 \\ \int (T_{дп} - T_{к}) dt + T_{дп}; T_{пв} \geq T_{к}, m_{зал.спирту} > 0 \\ \int \frac{Q_{ГВ}}{c_{дп} \cdot G_{дп}} dt + T_{дп}; T_{пв} \geq T_{к}, m_{зал.спирту} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Де: $m_{зал.спирту}$ - маса спирту, що не випарилася. $Q_{ГВ}$ - тепловий потік від гарячої сторони ТЕП; $c_{п}$ - теплоємність продукту; $G_{п}$ - масова витрата продукту; $T_{п}$ - початкова температура продукту; $T_{к}$ - температура кипіння спирту; $T_{дп}$ - температура перегріву ДП; r_c - теплота пароутворення спирту; G_c - масова витрата спирту що випаровується; $c_{дп}$ - теплоємність ДП; $G_{дп}$ - масова витрата ДП.

Модель зміни витрат спирту що випаровується в комірці випарника G_c описується залежністю (4).

$$G_c = \frac{Q_c + (T_{п} - T_{к}) \cdot c_{в} \cdot m_{в}}{r_c}; T_{дв} \geq T_{к} \quad (4)$$

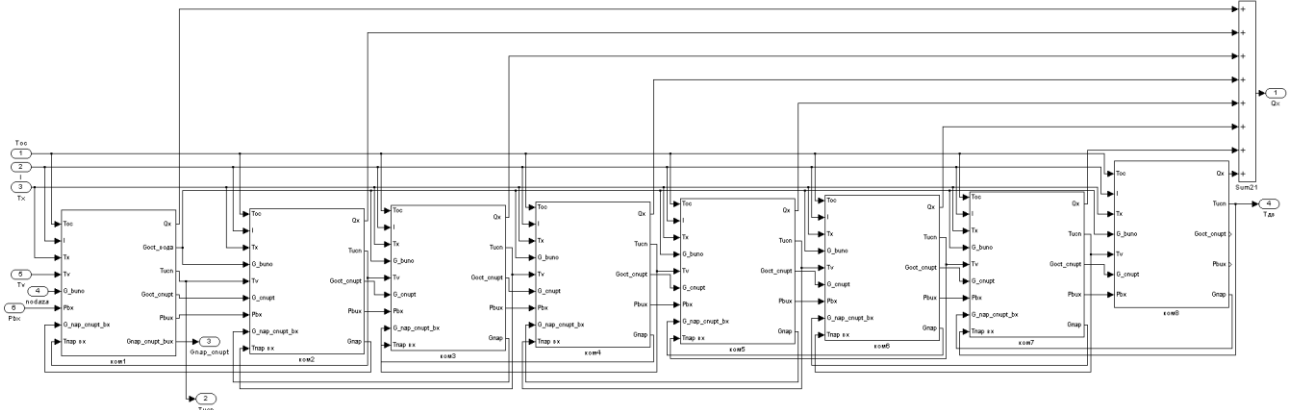
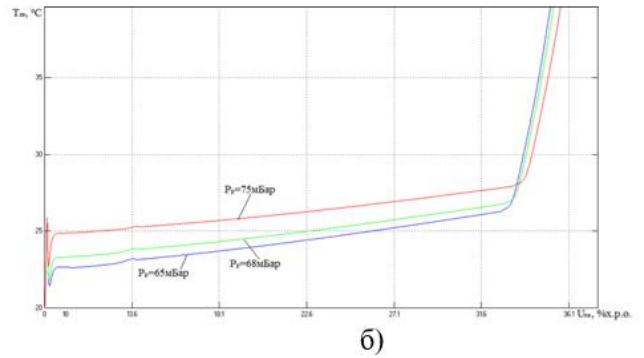
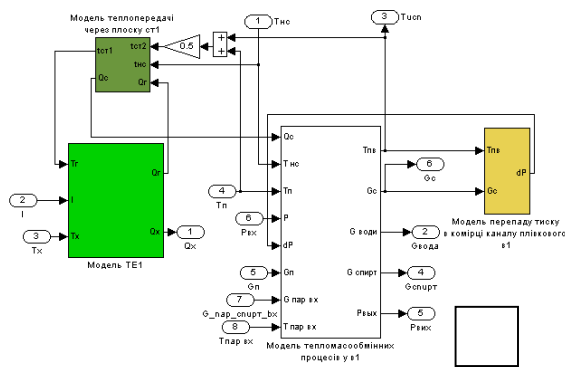
Модель перепаду тиску в комірці каналу плівкового випарника

Перепад тиску у паровому каналі комірки ΔP :

$$\Delta P = \lambda \cdot \rho (u^2 \cdot L) / 2D \quad (5)$$

Де: λ - коефіцієнт гідравлічного опору трубопроводу; u - швидкість потоку (м/с); D - внутрішній діаметр трубопроводу, м; L - довжина трубопроводу, м; ρ - густина рідини, кг/м³.

На рисунку 3а представлено реалізацію в середовищі Simulink моделі тепломасообмінних процесів у випарнику та математичної моделі термоелектричного плівкового випарника як об'єкту керування.



в)

Рисунок 3 – а) реалізація в середовищі Simulink імітаційної моделі комірки термоелектричного плівкового випарника як об'єкту керування; б) квазістатичні залежності температури продукту на виході з випарника від струму живлення ТЕП при різному тиску в ресивері; а) реалізація в середовищі Simulink імітаційної моделі термоелектричного плівкового випарника як об'єкту керування

Модель була застосована як складова частина загальної моделі процесу деалкоголізації вина в потоці як ОК. На рисунку 3б представлені квазістатичні залежності температури продукту у випарнику від струму живлення ТЕП при різних тисках. У зв'язку з обмеженістю об'єму доповіді інші складові загальної моделі будуть розглянуті в наступних доповідях.

[1] Інноваційні технології продуктів бродіння і виноробства: Підруч. / Іванов С.В., Домарецький В.А., Прибильський В.Л. та ін. // За загальною редакцією Іванова С.В. – К.: НУХТ, 2012. – 487с.

[2] БОЙКО, Валентин Семенович, et al. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: підручник, книга 3.

[3] DISALVO, Francis J. Thermoelectric cooling and power generation. Science, 1999, 285.5428: 703-706.

ДОДАТОК Г2

Петренко Д. С.

Магістрант кафедри АТПіРС ОНТУ

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-7739-5755>

dmytropetrenko00@gmail.com

Мазур О. В.

Доцент кафедри АТПіРС ОНТУ; к.т.н.

Одеський національний технологічний університет

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-7104-9010>

mazur.a.v.ua@gmail.com

Пашков. С. О.

Магістрант кафедри АТПіРС ОНТУ

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0202-7015>

sergypashkov2001@gmail.com

Ковальчук Д.А.

ст. викладач ОНТУ, к.т.н.

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0549-5244>

radiolomaster@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО РЕКУПЕРАТОРА ТЕПЛА "ПОВІТРЯ - ПОВІТРЯ" ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

Анотація. Доповідь присвячена розробці імітаційної математичної моделі термоелектричного рекуператора тепла "повітря - повітря" як об'єкту керування, що включає в себе три основні складові: модель термоелектричного перетворювача, модель теплопередачі через плоску стінку та модель конвективного теплообміну. Імітаційна модель реалізована в середовищі Matlab Simulink.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач, теплопередача, конвективний теплообмін, математична модель.

1.ВСТУП. Використання термоелектричних перетворювачів (ТЕП) для рекуперації теплової енергії паро-повітряних сумішей при реалізації технологічних процесів харчових технологій дозволяє суттєво зменшити енергетичні витрати і знизити собівартість готової продукції. Енергетична ефективність ТЕП при реалізації таких процесів в значній мірі залежить від здатності системи керування підтримувати енергоефективні режими рекуперації. Розробка ефективних систем автоматичного керування (САК) неможлива без наявності імітаційної аналітичної математичної моделі такого процесу як об'єкту керування (ОК).

2.ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Математична модель термоелектричного рекуператора тепла «повітря – повітря» як ОК включає в себе три основні складові: модель ТЕП, модель теплопередачі через «плоску стінку» та модель конвективного теплообміну «стінка-повітря»

2.1. Для розрахунку конвективного теплового потоку Q_k скористаємося наступною залежністю

$$Q_k = F \cdot a \cdot (t_{ст} - (t_{пвх} + t_{пвих})/2) \quad (1)$$

Де: F – площа поверхні плоскої стінки, a – коефіцієнт теплопередачі Вт/(м²·К) в залежності від швидкості руху середовища відносно стінки, $t_{ст}$ – температура стінки, $t_{пвх}$, $t_{пвих}$ – температура повітря на вході та виході рекуператора відповідно.

2.2. При розробці моделі радіатора рекуператора як ОК приймемо спрощення, що радіатор є плоскою стінкою з середнім тепловим опором R_{al} . В такому разі тепловий потік крізь радіатор розраховується наступним чином

$$Q_{ст} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot F \cdot (t_{ст1} - t_{ст2}) \quad (2)$$

Теплова енергія що витрачається на зміну температури стінки радіатора рекуператора $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$ (3)

Де: λ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, F – площа поверхні плоскої стінки, δ – товщина стінки, $t_{ст1}$, $t_{ст2}$ – температури стінки з гарячої та холодної сторони відповідно, c – теплоємність радіатора, Δt – зміна температури радіатора, m – маса радіатора.

2.3. Тепловий баланс з «холодного» боку ТЕП

$$Q_x = Q_{хст} - Q_{нхст} = Q_{хк}$$

$$Q_{хст} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot F_{хст} \cdot \Delta T_{хст}$$

$$Q_{хк} = F_x \cdot \alpha_x \cdot \left(t_{хст} - \frac{(t_{хпвх} + t_{хпвих})}{2} \right)$$

$$Q_{нхст} = c_{хст} \cdot m_{хст} \cdot (t_{хст1} - t_{хст2})$$

2.4. Тепловий баланс з «гарячого» боку ТЕП

$$Q_g = Q_x + P = Q_{гст} - Q_{нгст} = Q_{гк}$$

$$Q_{гст} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot F_{гст} \cdot \Delta T_{гст}$$

$$Q_{гк} = F_g \cdot \alpha_g \cdot \left(t_{гст} - \frac{(t_{гпвх} + t_{гпвих})}{2} \right)$$

$$Q_{нгст} = c_{гст} \cdot m_{гст} \cdot (t_{гст1} - t_{гст2})$$

Де: **написать**

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

В результаті аналізу процесів що протікають в термоелектричному рекуператорі тепла «повітря - повітря» як ОК для його математичної моделі була прийнята наступна структура (рис.1).

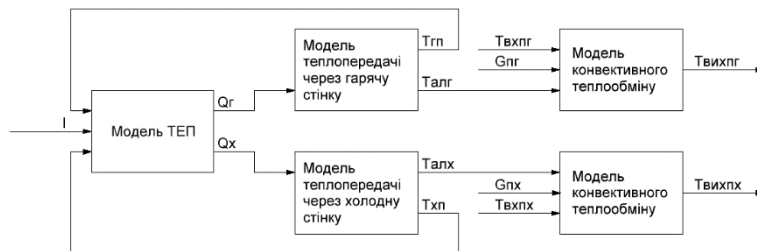


Рис. 1 - Структурна схема математичної моделі термоелектричного рекуператора тепла «повітря-повітря» як ОК.

На рисунку прийняті наступні позначення: I – струм живлення ТЕП, Q_g – тепловий потік від гарячої сторони ТЕП, Q_x – тепловий потік від холодної сторони ТЕП, $T_{гп}$ – температура

гарячої сторони ТЕП, $T_{хп}$ – температура холодної сторони ТЕП, $Sp_{г}$ та $Sp_{х}$ – швидкість руку потоку повітря, $T_{алг}$ та $T_{алх}$ – температура поверхні радіатора з гарячої та холодної сторони відповідно.

3.1. Математична модель термоелектричного перетворювача (ТЕП). Величини «холодного» Q_x та «гарячого» теплового потоку Q_r ТЕП описуються рівняннями (10) та (11) відповідно.

Величина «холодного» теплового потоку може бути описана з рівняння (3.1.1).

$$Q_x = -\frac{\Delta T}{\theta_m} + am \cdot Ta \cdot I - \frac{I^2 R_m}{2} \quad (3.1)$$

Величина «гарячого» теплового потоку дорівнює є сумі ефекту Пельть'є ($am \cdot TI$), теплопровідністю елемента (t / θ_m) і теплового ефекту Джоуля ($I^2 R_m$). Дію ефекту Томсона не описуємо оскільки вона не значна. Описується залежністю (3.2).

$$Q_r = -\frac{\Delta T}{\theta_m} + am \cdot Ta \cdot I + \frac{I^2 R_m}{2} \quad (3.2).$$

Параметри am , θ_m і R_m можуть бути розраховані з листа даних виробників відповідно до рівнянь (3.3 – 3.5).

$$R_m = \frac{V_{max}}{I_{max}} \cdot \frac{(T_e - \Delta T_{max})}{T_e} \quad (3.3)$$

$$\theta_m = \frac{\Delta T_{max}}{I_{max} \cdot V_{max}} \cdot \frac{2 \cdot T_e}{(T_e - \Delta T_{max})} \quad (3.4)$$

$$am = \frac{V_{max}}{T_e} \quad (3.5)$$

Де: I_{max} – максимально допустимий струм, V_{max} – напруга яка виникає на термоелементі при I_{max} , ΔT_{max} – максимально допустима різниця температур між холодною та гарячою стороною, Q_x – холодний тепловий потік, Q_r – гарячий тепловий потік, R_m – електричний опір термоелемента [Ом], θ_m – тепловий опір елемента [K/W], am – коефіцієнт р-п переходу Зеебека [V/K], T_e – абсолютна температура теплої сторони [K], T_a – абсолютна температура холодної сторони [K].

3.2. Математична модель теплопередачі через плоску стінку. Математичні моделі температури поверхні радіатора з гарячої сторони $t_{ст1}$ (15) та поверхні радіатора з холодної сторони (16) мають вигляд:

$$T_{алг} = \left(\int \frac{Q_{rn} - (T_{ал1} - T_{пвх}) * F_{ал} * a}{m_{ал} * c_{ал}} + T_{0_{вх}} \right)$$

$$T_{алх} = \left(\int \frac{(T_{пвх} - T_{ал1}) * F_{ал} * a - Q_{xn}}{m_{ал} * c_{ал}} + T_{0_{вх}} \right)$$

Математичні моделі температури гарячої() та холодної() сторін ТЕП мають вигляд

$$T_{гп} = \int \frac{Q_{rn} - (T_{ал} - T_{пвх}) * F_{ал} * a}{m_{ал} * c_{ал}} + \frac{Q_{rn} * F_{ал} * R_{ал}}{h_{ал}}$$

$$T_{хп} = \int \frac{Q_{xn} - (T_{ал} - T_{пвх}) * F_{ал} * a}{m_{ал} * c_{ал}} - \frac{Q_{xn} * F_{ал} * R_{ал}}{h_{ал}}$$

3.3. Математична модель конвективного теплообміну. Математичні моделі температури повітря на виході з гарячої () та холодної () сторони рекуператора

$$T_{п_{вих_г}} = \frac{(T_{алг} - T_{возд_{вх}}) * F_{ал} * a}{m_{возд} * c_{возд}} + T_{возд_{вх}}$$

$$T_{п_{вих_х}} = \frac{(T_{алх} + T_{возд_{вх}}) * F_{ал} * a}{m_{возд} * c_{возд}} - T_{возд_{вх}}$$

На рисунку 2а представлено реалізацію в середовищі Simulink моделі тепломасообмінних процесів у випарнику та математичної моделі термоелектричного плівкового випарника як об'єкту керування.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Модель була застосована як складова частина загальної комірчастої моделі рекуперації тепла «повітря-повітря» технологічного процесу гарячого копчення ковбаси як ОК. На рисунку 2 представлені квазістатичні залежності температури гарячого (а) та холодного(б) повітря у рекуператорі від струму живлення ТЕП.

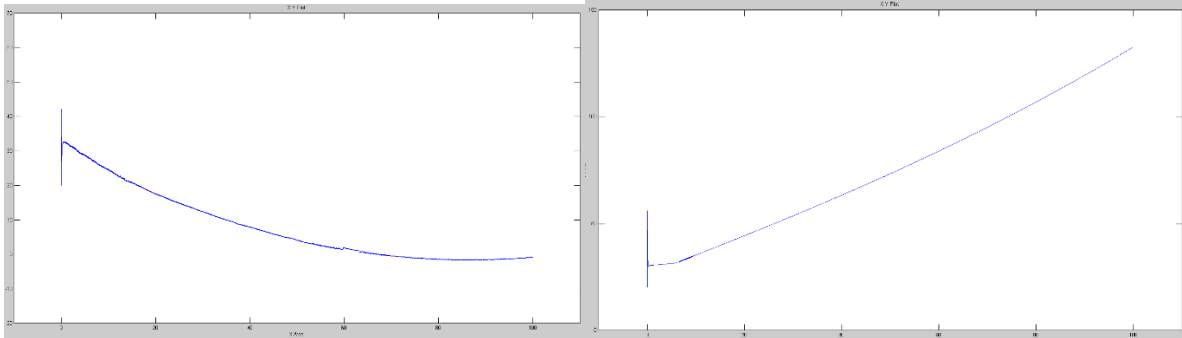


РИС.2-

У зв'язку з обмеженістю об'єму доповіді інші складові загальної моделі будуть розглянуті в наступних доповідях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] БОЙКО, Валентин Семенович, et al. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: підручник, книга 3.

[2] DISALVO, Francis J. Thermoelectric cooling and power generation. Science, 1999, 285.5428: 703-706.