

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП - 02.00.00.000 ПЗ

Група АКП-22-1

Мар'ян Бородакі

2026

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Бородакі Мар'ян Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК _ 681.53

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація системи керування процесу випалу гіпсу в обертовій печі

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

М.Р. Бородакі

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Фешанич

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТ

« » 2026 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Бородакі Мар'ян Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація системи керування процесу випалу гіпсу в
обертовій печі

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «29» травня 2026 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 17.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики,
методичні вказівки, інтернет-ресурс, каталоги, технічна література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу випалу гіпсу в обертовій печі як об'єкта автоматичного контролю і керування. 2. Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування. 3. Синтез ефективної САК.

4. Розробка проектної складової САК. 5. Розробка принципів електричних схем системи автоматизації

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Лист 1 – Технічна схема процесу випалу гіпсу в обертовій печі –

БР.АКП – 02.00.00.000 01

Лист 2 – Структурна схема обертової печі БР.АКП – 02.00.00.000 02

Лист 3 – Структура одноконтурної та каскадної АСК – БР.АКП – 02.00.00.000 03

Лист 4 – Принципові електричні схеми електричних з'єднань –

БР.АКП – 02.00.00.000 04

Лист 5 – Функціональна схема автоматизації – БР.АКП – 02.00.00.000 05

Лист 6 – Схема щита керування – БР.АКП – 02.00.00.000 06

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу випалу гіпсу в обертовій печі як об'єкта автоматичного контролю і керування	20.05.2026 р.	
2	Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування	25.05.2026 р.	
3	Синтез ефективної САК	01.06.2026 р.	
4	Розробка проектної складової САК	05.06.2026 р.	
5	Розробка принципів електричних схем системи автоматичності	09.06.2026 р.	

Студент _____

(підпис)

М.Р. Бородакі

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____

(підпис)

Л.І.Фешанич

(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 66 сторінок друкованого тексту, 55 рисунків, 6 таблиць, 31 переліків посилань на джерела і 3 додатки.

Тема: «Автоматизація системи керування процесу випалу гіпсу в обертовій печі».

Об'єкт дослідження: процес випалу гіпсу в обертовій печі.

Мета проєкту: розроблення автоматизованої системи керування процесом випалу гіпсу в обертовій печі, що забезпечує стабільне підтримання температурного режиму, регулювання витрати паливного газу та підвищення якості готового будівельного гіпсу. Для цього в роботі виконано аналіз технологічного процесу, проведено вибір параметрів контролю і регулювання, здійснено ідентифікацію об'єкта керування та синтез системи автоматичного регулювання.

Методи дослідження: експериментальне моделювання автоматичної системи керування процесом випалу гіпсу в обертовій печі.

Результати бакалаврської роботи: для досягнення заданої мети було проведено опис технологічної схеми випалу гіпсу в обертовій печі, наведено технічні характеристики основного технологічного обладнання та визначено параметри, що підлягають автоматичному контролю і регулюванню. На основі експериментальних даних отримано перехідні характеристики каналів регулювання температури та витрати паливного газу. За допомогою програмного середовища MATLAB System Identification Toolbox визначено передавальні функції об'єкта керування. У середовищі MATLAB/Simulink виконано моделювання одноконтурних систем автоматичного керування з ПІ- та ПІД-регуляторами, а також каскадної системи регулювання. У роботі також здійснено вибір технічних засобів автоматизації, розроблено функціональну схему автоматизації, принципові електричні схеми та загальний вигляд щита керування.

Ключові слова: випал гіпсу, обертова піч, автоматизація, система автоматичного керування, температура, витрата газу, регулятор, MATLAB, Simulink, контролер.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 66 pages of printed text, 55 figures, 6 tables, 31 references, and 3 appendices.

Title: "Automation of the Control System for the Gypsum Calcination Process in a Rotary Kiln."

Object of research: the gypsum calcination process in a rotary kiln.

Purpose of the project: development of an automated control system for the gypsum calcination process in a rotary kiln that ensures stable maintenance of the temperature regime, regulation of fuel gas consumption, and improvement of the finished building gypsum quality. To achieve this, the thesis provides an analysis of the technological process, selects control and regulation parameters, performs identification of the control object, and synthesizes the automatic control system.

Research methods: experimental modeling of the automatic control system for the gypsum calcination process in a rotary kiln.

Results of the qualification work: to achieve the specified goal, a description of the technological scheme of gypsum calcination in a rotary kiln was provided, the technical characteristics of the main technological equipment were presented, and the parameters subject to automatic control and regulation were determined. Based on experimental data, transient characteristics of the temperature and fuel gas consumption control channels were obtained. The transfer functions of the control object were determined using the MATLAB System Identification Toolbox. Modeling of single-loop automatic control systems with PI and PID controllers, as well as a cascade control system, was performed in the MATLAB/Simulink environment. The thesis also covers the selection of technical automation equipment, and the development of an automation functional diagram, electrical schematic diagrams, and the general layout of the control panel.

Keywords: gypsum calcination, rotary kiln, automation, automatic control system, temperature, gas consumption, controller, MATLAB, Simulink, controller.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИПАЛУ ГІПСУ В ОБЕРТОВІЙ ПЕЧІ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ	10
1.1 Призначення установки та суть процесу випалу гіпсу в обертовій печі ...	10
1.2. Характеристика гіпсової сировини, технологічних газів та готового в'язучого.....	11
1.3. Аналіз технологічної схеми установки випалу гіпсу в обертовій печі.....	12
1.4. Технічна характеристика технологічного обладнання	14
1.5. Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання процесу....	18
Висновки до розділу	19
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	20
2.1 Обґрунтування вибору об'єкта автоматизації.....	20
2.2 Аналіз об'єкту керування.....	20
2.3. Формування вимог для регулювання автоматичної системи та дослідження показників якості регулювання	21
2.4. Підготовка та планування експерименту	22
2.4.1 Аналіз даних за каналом регулювання температури	24
2.4.2 Аналіз даних за каналом регулювання витрати паливного газу.....	27
Висновки до розділу	29
3 СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНОЇ САК.....	30
3.1 Розроблення одноконтурної САК з ПІ регулятором	30
3.2 Розроблення одноконтурної САК з ПІД регулятором.....	31
3.3 Розроблення схеми для каскадної системи САК.....	32

					БР.АКП-22.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація системи керування процесу випалу гіпсу в обертовій печі	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Бородакі М.Р.					6	83
Перевір.		Фешанич Л.І.						
Реценз.		Чигур І.І.						
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.				АКП-22-1 ІФНТУНГ		

3.4 Дослідження показників якості регулювання за динамічними характеристиками системи	34
3.5 Оцінка стійкості одноконтурної АСК з ПІ регулюванням.....	36
Висновки до розділу	38
4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК.....	39
4.1 Вибір технічні засоби в системі автоматизації та їх аналіз.....	39
4.2 Вибір первинних перетворювачів витрати, температури, рівня, ваги, вологості та швидкості	40
4.3 Вибір технологічного електроприводу та виконавчих механізмів.....	43
4.4 Вибір контролерів, регуляторів та індикаторів	45
4.5 Вибір електротехнічного обладнання.....	48
4.6 Розробка ФСА процесу випалу гіпсу в обертовій печі.....	53
Висновки до розділу	56
5 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	57
5.1 Розроблення приципових електричних схем	57
5.2 Проектування загального вигляду щита системи автоматизації.....	59
Висновки до розділу	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	64
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

- СП – приймальний бункер-сипник гіпсового каменю;
ЩД – щокова дробарка первинного подрібнення;
СТ – стрічкові транспортери;
РД – роторна дробарка;
ЕЛ1, ЕЛ2 – елеватори;
Б1 – бункер живлення печі;
ВД – ваговий дозатор;
ТП – топка;
ОБ – обертовий барабан;
К1 – регулюючий клапан подачі паливного газу з виконавчим механізмом;
К2 – регулюючий клапан подачі повітря з виконавчим механізмом;
ВТ1 – відцентровий радіальний вентилятор подачі повітря;
ТА – трубопровід авспірації;
ЦК – циклон;
ФЛ – фільтр рукавний;
ВТ2 – відцентрований радіальний вентилятор аспірації;
ШТ – шнековий транспортер;
Б2 – бункер томлення;
ЖВ – живильник подачі гіпсу в млин;
МЛ – молотковий млин;
Б3 – бункер готового будівельного гіпсу;

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Автоматизація технологічних процесів є важливим напрямом розвитку сучасного промислового виробництва. Вона дає змогу підвищити стабільність роботи обладнання, зменшити вплив людського фактора, покращити якість готової продукції та забезпечити ефективне використання енергетичних ресурсів.

Виробництво будівельного гіпсу є важливою складовою промисловості будівельних матеріалів. Одним із основних етапів цього виробництва є випал гіпсової сировини в обертовій печі. Під час цього процесу відбувається термічна обробка гіпсового щєбню та його часткова дегідратація, у результаті чого утворюється напівводний сульфат кальцію, який є основою будівельного гіпсу. Якість готового продукту значною мірою залежить від підтримання заданого температурного режиму, стабільної подачі паливного газу та правильного співвідношення газоповітряної суміші.

Обертova піч є інерційним об'єктом керування, робота якого залежить від температури пічних газів, витрати паливного газу, витрати повітря, подачі сировини та стану допоміжного обладнання. Тому для забезпечення стабільного перебігу процесу необхідно застосовувати автоматизовану систему керування.

Метою бакалаврської роботи є розроблення автоматизованої системи керування процесом випалу гіпсу в обертовій печі. У роботі виконано аналіз технологічного процесу, визначено основні параметри контролю та регулювання, проведено математичне моделювання й ідентифікацію об'єкта керування. За допомогою MATLAB та Simulink досліджено одноконтурні системи з ПІ- і ПІД-регуляторами, а також каскадну систему регулювання.

У проектній частині виконано вибір технічних засобів автоматизації, розроблено функціональну схему автоматизації, принципові електричні схеми та загальний вигляд щита керування. Запропонована система забезпечує стабілізацію температурного режиму, контроль витрати паливного газу та підвищення якості готового будівельного гіпсу.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

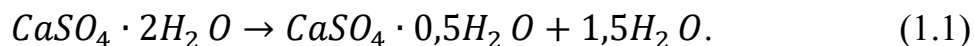
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИПАЛУ ГІПСУ В ОБЕРТОВІЙ ПЕЧІ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ

1.1 Призначення установки та суть процесу випалу гіпсу в обертовій печі

Використання в'язучих будівельних матеріалів по типу будівельного гіпсу є важливим компонентом у сучасному будівництві. Як відомо, що випал гіпсу проводиться при температурі 140 - 160 °С.

Процес передбачає, що перед подачею в піч сировину дроблять до фракції 15–20 мм, що забезпечує більш рівномірний нагрів матеріалу. Після дроблення гіпсового каменю до фракції щебню він безперервно подається в обертову піч, де відбувається процес його випалу.

При температурі 140 - 160 °С двоводний гіпс переходить у напівводний сульфат кальцію, який є основною складовою будівельного гіпсу.



Установка обертової печі складається з двох основних функціональних вузлів: топки, у якій відбувається спалювання газоповітряної суміші, та обертового барабана, де здійснюється термічна обробка гіпсової сировини.

Необхідний тепловий режим підтримується за допомогою спалювання газоповітряної суміші.

Під час обертання барабану матеріал поступово переміщується вздовж її довжини та за допомогою лопатей у середині переміщується, завдяки чому покращується рівномірність випалу. Час перебування сировини в печі становить 45 хв, а швидкість обертання обертового барабану — 2 об/хв.

Після завершення випалу гіпс подається в бункер томлення, де витримується протягом 6 – 12 годин для покращення процесу дегідратації.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Після цього матеріал направляється на подальший помел, після чого стає готовим будівельним гіпсом. Контроль технологічного процесу здійснюється за допомогою вимірювальних приладів і засобів автоматизації.

1.2. Характеристика гіпсової сировини, технологічних газів та готового в'язучого

У якості сировини розглядуваної установки виступає природний гіпсовий камінь (гідрат сульфату кальцію), котрий поступає на установку з гіпсового кар'єру. Характеристики сировинного гіпсового каменю наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики сировинного гіпсового каменю

Назва показника та одиниці виміру	Значення показника
Хімічна формула	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$.
Вміст домішок (глина, пісок, карбонати), %	5,0 – 15,0
Насипна густина (у подрібненому стані), кг/м ³	1100 – 1300
Кристалізації води, %	20 - 21
Твердість за шкалою Мооса	2

Для забезпечення процесу випалу дегідратації сировини в якості реагенту та теплоносія використовуються технологічні гази, що утворюються в результаті спалювання природного газу в суміші з атмосферним повітрям. Характеристики паливного газу наведені у таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Характеристики паливного паливного газу

Назва показника та одиниці виміру	Значення показника
Вміст метану (CH ₄), %	95,0 – 98,0
Нижча теплота згоряння, МДж/м ³	34 – 35,6
Густина за нормальних умов, кг/м ³	0,68 – 0,72
Вміст азоту (N ₂), %	до 2,0
Вміст діоксиду вуглецю (CO ₂), %	до 1,0

Готовою продукцією технологічної установки є будівельний гіпс - напівводний сульфат кальцію, отриманий внаслідок дегідратації сировини.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Характеристики готового гіпсового в'язучого наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристики готового гіпсового в'язучого

Назва показника та одиниці виміру	Значення показника
Вміст гемігідрату сульфату кальцію ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$), %	80,0
Терміни схоплювання: початок, хв	не раніше 6
Терміни схоплювання: кінець, хв	не пізніше 30
Межа міцності при згині (через 2 години), МПа	2,0 – 5,0
Межа міцності при стиску (через 2 години), МПа	4,0 – 7,0
Густина, кг/м ³	2600 – 2750

1.3. Аналіз технологічної схеми установки випалу гіпсу в обертовій печі

Сировинний гіпсовий камінь фронтальним навантажувачем подається у приймальний сипник СП, звідки надходить на подрібнення у щокову ЩД. Отриманий колений камінь транспортується у роторну дробарку РД, де матеріал подрібнюється до фракції гіпсового щебню розміром 15–20 мм та транспортується до бункера живлення печі Б1 (рис. 1.1).

Завантаження гіпсового щебню в обертову піч здійснюється виключно в попередньо розігріту піч. Нагрівання печі та підведення тепла для забезпечення ендотермічної реакції дегідратації здійснюється за рахунок спалювання у топці ТП, газоповітряної суміші.

В топці відбувається спалювання суміші природного газу із атмосферним повітрям. Співвідношення цих компонентів у паливній суміші відбувається за пропорції 1:10 м³ (на одну частину газу беруть десять частин повітря), що гарантує максимальне вигорання та підтримання балансу тепла. Керують подачею палива і повітряного потоку виконавчі механізми, які змінюють положення регулюючих клапанів К1 газу та К2 повітря.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

похолодання призведе до появи бракованого недопалу, а перегрів вище за 180 °С спровокує утворення розчинного ангідриту, що зіпсує якість готового в'язучого.

Увесь цикл термообробки матеріалу в печі триває 45 хвилин. Щоб гіпс прогрівався однорідно, барабан печі постійно крутиться зі швидкістю 2 об/хв, а всередині нього змонтовані спеціальні перемішуючі лопаті. Робоча надійність обертового барабану тримається на приводі електродвигуна який обертає сам барабан задля рівномірного прогріву та пересування матеріалу вздовж барабану.

З протилежного боку обертового барабану ОБ виходять відпрацьовані пічні газу. Вони формуються під час горіння суміші та виділення вологи з матеріалу. У них містить гіпсовий пил, тому для цього використовується аспірація обертової печі, за допомогою трубопроводу аспірації ТА та циклона ЦК із фільтром ФЛ, які збирають частинки гіпсового пилу та повертають їх назад у виробничий процес.

Гарячий випалений гіпс, який залишає піч, має рівень кристалізаційної води 5,8 до 6,2 %. Після випалу гіпс потрапляє у бункер томлення Б2. В бункері томлення гіпс витримується від 6 до 12 годин. Ця технологічна пауза потрібна, щоб за рахунок внутрішнього тепла вирівнялася вологість матеріалу і повністю завершилися всі молекулярні перетворення.

Коли процес томлення добігає кінця, випалений матеріал крізь керований живильник ЖК з електроприводом, дозовано подається у молотковий млин МЛ. Тут гіпс остаточно перемелюється до стану тонкодисперсного порошку де стає повністю готовим будівельним гіпсом. З млина будівельний гіпс висипається у бункер готового будівельного гіпсу Б3 звідки згодом здійснюється його відвантаження споживачам.

1.4. Технічна характеристика технологічного обладнання

Приймальний бункер-сипник СП слугує для накопичення великих шматків сирого гіпсу перед дробаркою. Це відкрита зварна металева конструкція конічно-прямокутної форми з ребрами жорсткості під вивантаження з навантажувача.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Об'єм місткості становить 15 м³, а стінки нахилені під кутом 60° проти зависання породи.

Щокова дробарка ЩД та Роторна дробарка РД – це механічні апарати ударної дії, призначений для руйнування великих шматків гіпсового каменю. Максимальна продуктивність пристроїв по сировині - 25 т/год. Роторна дробарка здатна приймати вхідні куски гіпсу розміром до 200–300 мм. Подрібнюють до фракції 20–50 мм. Частота обертання робочого ротора становить 1000 об/хв. Головні привіди дробарок оснащені електродвигунами потужністю 22 кВт.

Обертова піч складається із двох частин, топки – де відбувається спалювання газоповітряної суміші та обертового барабану – де відбувається термічна обробка гіпсового щебню. Обертовий барабан ОБ має форму похилого циліндричного барабану безперервної дії, встановлений на опорних роликах. Внутрішній простір печі оснащений спеціальними перемішувачами лопатями для рівномірного перекидання гіпсового щебню під час обертання. Продуктивність лінії по вихідній сировині становить від 20 до 25 т/год. для випалу гіпсу робоча температура вхідних газів на вході в обертовий барабан становить 650 – 720 °С. Барабан печі обертається зі швидкістю 2 об/хв. Час перебування матеріалу в печі складає 45 хвилин. Внутрішній діаметр барабану печі 1,6 м, а довжина складає 20 м та встановлюється під кутом нахилу від 3 до 4 градусів.

Топка ТП призначена для генерації гарячого теплоносія у вигляді димових газів. Камера згоряння зсередини захищена футеровкою з високоміцної вогнетривкої шамотної цегли. Робоча температура на виході з топки 650 – 720 °С. Технологічне паливо - природний газ метан, його витрата складає 290 - 320 м³/год. Співвідношення робочої паливної суміші газ–повітря контролюється у пропорції 1:10 відповідно. Робочий тиск газу від 0,05 до 0,1 МПа, а тиск подачі повітря від 3,5 до 5,0 кПа.

Регулюючий клапан газу К1 інтегрований у топку ТП для стабілізації температури шляхом зміни витрати палива. Це фланцевий заслінковий клапан з

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

виконавчим механізмом. Діаметр - 80 мм, граничний тиск — 0,6 МПа, а час ходу штока дорівнює 10–15 секундам.

Регулюючий клапан повітря К2 змонтований на магістралі від радіального вентилятора ВТ1 до камери змішування. Апарат виконаний як поворотна дискова заслінка, що працює синхронно з К1 задля витримування пропорції суміші. Повний кут повороту диска складає 90 градусів. Корпус і заслінка виготовлені зі сталі з антикорозійним шаром.

Стрічковий ваговий дозатор ВД1 - це безперервний транспортуючий апарат, для точного подавання подрібненого щебню з бункера Б1 в обертову піч. Регульована пропускна здатність дозатора становить від 20 до 25 т/год. Ширина транспортерної стрічки - 1000 мм. Максимальна швидкість від 0,2 до 0,5 м/с. Похибка дозування матеріалу не перевищує $\pm 1,0$ %.

Циклон ЦК, призначений для попереднього очищення запиленого потоку, що відводиться із печі. У циклоні за рахунок відцентрових сил відбувається відділення більших частинок пилу від повітряного потоку.

Рукавний фільтр ФЛ, призначений для остаточного очищення вихідних пічних газів від дрібнодисперсного пилу. Запилене повітря проходить через фільтрувальні рукави, на поверхні яких затримуються дрібні частинки гіпсового пилу.

Бункер томлення Б2 - це вертикальний металевий циліндричний резервуар із конічним днищем, який зовні покритий товстим шаром теплоізоляції для збереження внутрішнього тепла випаленого матеріалу. Корисний технологічний об'єм цієї місткості становить 400 м³, що дозволяє здійснювати витримування гіпсу протягом 6–12 годин. Максимальна температура завантажувального матеріалу - 160 °С. Діаметр циліндричної частини - 6 м. Загальна висота бункера - 14 м.

Живильник ЖК призначений для регулювання подачі гіпсу в млин. Конструкція виконана у вигляді металевих плоских лопатей, які за допомогою привода регульованого електродвигуна обертають лопаті, таким чином видаючи рівне дозування матеріалу. Робоча продуктивність – 20-25 т/год.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Молотковий млин МЛ – це апарат для тонкого помолу сухого випаленого гіпсу до стану готового порошкоподібного в'язучого. Продуктивність – 20 - 25 т/год. Дисперсність помолу 0,05-0,1 мм.

Бункер готового будівельного гіпсу БЗ – це металевий силос із товщиною стінок 6–8 мм. Використовується для накопичення й відвантаження будівельного гіпсу. Діаметр циліндричної частини - 6 м. Загальна висота бункера - 14 м. Робочий б'єм резервуара дорівнює 400 м³.

Радіальний вентилятор ВТ1 використовується для примусової подачі повітря в топковий пристрій печі. Він забезпечує необхідну кількість повітря для процесу горіння. Максимальна подача вентилятора становить 4000 м³/год, а потужність привідного електродвигуна – 22 кВт.

Радіальний вентилятор аспірації ВТ2, призначений для відведення запиленого повітря та надлишкових газів із зони печі. Вихідні гази з печі проходить через циклон ЦК і рукавний фільтр ФЛ, де здійснюється очищення від пилу перед подальшим відведенням.

Шнекові транспортери ШТ1, ШТ2, ШТ3 та стрічкові транспортери СТ1, СТ2, СТ3, використовуються для горизонтального переміщення сировини. Приводяться в дію електродвигунами потужністю 5.5 кВт.

Ковшові елеватори ЕЛ1 та ЕЛ2 призначені для вертикального підйому матеріалу. Висота елеваторів 35м. Працює від електродвигуна потужністю 22 кВт.

Трубопровід аспірації ТА забезпечує відведення з обертової печі відпрацьованих пічних газів, які утворюються під час згоряння газоповітряної суміші та термічної обробки гіпсової сировини. Разом із газами з робочої зони печі видаляються дрібні частинки гіпсового пилу та надлишкова волога, що утворюється під час дегідратації матеріалу. Трубопровід спрямовує запилений газоповітряний потік до системи очищення, яка включає циклон та рукавний фільтр. Діаметр трубопроводу становить 800 мм, а його довжина — 10 м.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.5. Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання процесу

Найважливішими параметрами, що безпосередньо впливають на якість кінцевого будівельного гіпсу та безпеку експлуатації установки, є:

- дозування гіпсового щебню на завантаженні в обертовий барабан;
- температура пічних газів на вході в обертовий барабан;
- витрата паливного газу;
- співвідношення газоповітряної суміші;
- час томлення;
- помол випалено гіпсу;

Дозування гіпсового щебню на вході в обертовий барабан: Стабільність подачі сировини визначає матеріальний баланс установки. Проектом автоматизації передбачено безперервний контроль та автоматичне регулювання цього параметра за допомогою вагового дозатора ВД. Будь-які неконтрольовані коливання витрати призводять або до перевантаження печі, або до її спорожнення, що веде до перевитрати газу та не якісно випаленого гіпсу.

Температура пічних газів на вході в обертовий барабан: Це головний регульований параметр усього процесу. Вона повинна суворо утримуватися в регламентних межах 650 – 720 °С. Оскільки реакція дегідратації дуже чутлива до тепла, зменшення температури загрожує виходом двоводного сирого залишку, а перевищення зумовлює появу мертвообпаленого ангідриту. Параметр підлягає автоматичному регулюванню та контролю.

Витрата паливного газу: Енергія для випалу виділяється саме від горіння газу. Його витрату контролюють і динамічно змінюють за допомогою клапана К1. Це необхідно для точного керування подачі тепла під роботи установки.

Співвідношення газоповітряної суміші: Для повного та ефективного згоряння метану без утворення сажі необхідно подавати повітря у чіткій

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

пропорції 1:10. Контроль та регулювання клапаном К2 дозволяють уникнути як перевитрати газу, так і охолодження топки надлишковим повітряним потоком.

Час томлення: Гарячий гіпс після печі має витримуватися від 6 до 12 годин у бункері томлення Б2. Контроль рівня у бункері Б2 захищає лінію від аварійного переповнення або повного спустошення, що порушило б безперервний цикл помолу в молотковому млині МЛ, та контролює певний рівень у бункері, який відповідає правильному діапазону часу томлення гіпсу.

Помол випаленого гіпсу: Після процесу томлення відбувається помол випаленого гіпсу в млині МЛ для подальшого його використання у будівельних цілях, це є завершальний етап у виробництві будівельного гіпсу.

Перелік параметрів контролю та регулювання наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Параметри контролю та регулювання

Контрольований параметр	Вимірювальна величина	Робочі межі
Дозування гіпсового щебню на завантаженні в обертовий барабан	т/год	20 - 25
Температура пічних газів на вході в обертовий барабан	°С	650 - 720
Витрата паливного газу	м ³ /год	290 - 320
Співвідношення газоповітряної суміші	м ³ /год	1:10
Час томлення	год	6 - 12
Помол випалено гіпсу	мм	0,05 - 0,1

Висновки до розділу

Розглянуто процес випалу гіпсу в обертовій печі як об'єкт автоматичного контролю та керування. Описано основні етапи переробки сировини, роль температурного режиму у формуванні якості готового продукту, а також наведено характеристику сировини, паливного газу, готового в'язучого матеріалу й основного обладнання. Визначено ключові параметри контролю та регулювання.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Обґрунтування вибору об'єкта автоматизації

Об'єктом керування у проєкті є обертова піч. Під час вибору об'єкта було проаналізовано процес випалу гіпсу в обетовій печі. З технології виробництва відомо, що обертова піч складається з двох основних елементів – з топки та обертового барабану. Отже, процес випалу гіпсу полягає у тому, що гіпсовий щєбінь постуває в обертовий барабан, де спочатку зустрічається із гарячими газами температурою 650 - 720°C, в процесі обертання та просування по барабану печі матеріл поступово нагрівається і на виході з печі досягає своєї температури випалу 140 - 160°C. Розігрівається піч за рахунок спалювання газоповітряної суміші у топці.

Точне автоматичне керування співвідношення подачі паливного газу та повітря до топки є першочерговим завданням для всієї системи тому клапан регулюючий подачу газу програмно зв'язаний із клапаном подачі повітря у пропорції 1 до 10. Це дозволяє оперативно компенсувати будь-які температурні коливання всередині печі, забезпечуючи високу якість випалу гіпсової сировини та безаварійну роботу обладнання.

2.2 Аналіз об'єкту керування

Об'єктом дослідження було обрано обертову піч, у якій відбувається регулювання температури гарячих газів на вході в обертовий барабан. Температура повинна знаходитись в межах від 650 °C до 720 °C. Вхідною величиною є два керуючі сигнали, $F_{\text{газ}}$ – це витрата паливного газу та $F_{\text{пов}}$ – це витрата повітря, а вихідною $T_{\text{г}}$ - це температура гарячих газів на вході в обертовий барабан. Збурюючим впливом є $F_{\text{с}}$ – це витрата гіпсового щєбню та $T_{\text{с.вх}}$ – це температура вхідного гіпсового щєбню.

Структурну схему керованого об'єкта показано на рисунку 2.1.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

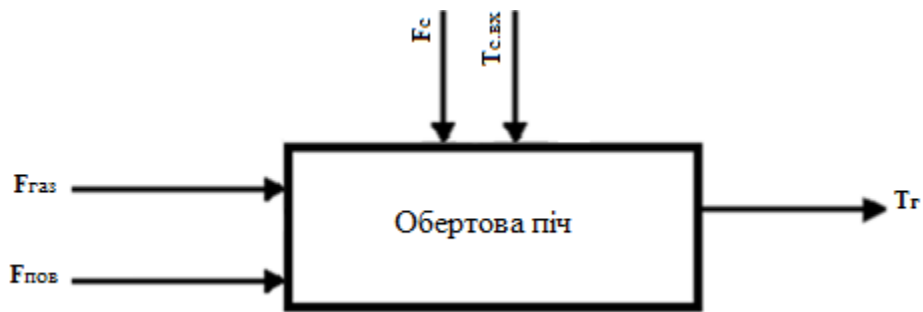


Рисунок 2.1 – Структурна схема обертової печі

2.3. Формування вимог для регулювання автоматичної системи та дослідження показників якості регулювання

Основною метою керування процесом випалу є забезпечення сталого температурного режиму пічних газів перед входом в обертовий барабан. Для нормального перебігу технологічного процесу температура газів повинна підтримуватися в межах 650–720 °С. Дотримання цього діапазону дає змогу забезпечити необхідні умови термічної обробки гіпсової сировини та отримати температуру матеріалу на виході з барабана в межах 140–160 °С.

Джерелом теплової енергії в установці є згоряння газоповітряної суміші в топковому пристрої. У зв'язку з цим основним регулюючим впливом приймається зміна витрати паливного газу, що подається через регулюючий клапан. Для забезпечення повного згоряння палива та підтримання необхідного теплового балансу витрата повітря коригується узгоджено зі зміною подачі газу.

Для оцінювання ефективності роботи системи автоматичного керування приймаються такі основні показники якості регулювання:

- Точність апроксимації $S \geq 90\%$;
- Перерегулювання системи автоматизації $\delta \leq (0-10)\%$;
- Тривалість перехідного процесу.

2.4. Підготовка та планування експерименту

Для визначення динамічних властивостей об'єкта керування було проведено активний експеримент у виробничих умовах. Його суть полягала у зміні вхідного сигналу та подальшій реєстрації реакції системи в часі. Отримані перехідні характеристики використано для ідентифікації математичних моделей каналів керування.

Дослідження виконувалося для каналу регулювання температури гарячих газів на вході в обертовий барабан і каналу витрати паливного газу. Вхідною дією приймалася зміна положення регулюючих клапанів газу та повітря, а вихідними величинами були покази датчиків температури і витрати.

Перед початком вимірювань установку було виведено на усталений режим. Після стабілізації параметрів витрату паливного газу змінювали приблизно на 8–10 %, що дозволило оцінити інерційність об'єкта та характер температурного запізнення. Дані фіксувалися кожні 120 секунд до досягнення нових сталих значень. Отримані експериментальні дані для обох каналів зведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Експериментальні даних температури та витрати газу

t, c	T, °C	F, м3/год
0	650	290
120	650	290
240	651	291
360	653	292
480	656	293
600	661	295
720	668	297
840	676	299
960	685	302
1080	693	305
1200	700	308

1320	706	311
1440	710	313
1560	712	315
1680	713	317
1800	714	318
1920	714	318,5
2040	715	319
2160	715	319
2280	715	319
2400	715	319

За результатами вимірювань, наведених у табл. 2.1, сформовано експериментальні перехідні характеристики. Графічне представлення перехідної характеристики каналу регулювання температури наведено на рис. 2.2.

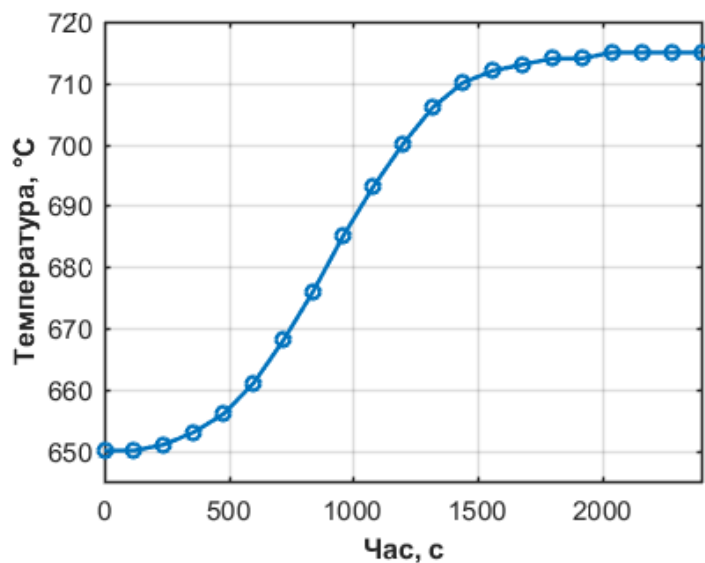


Рисунок 2.2 – Перехідна характеристика регулювання температури гарячих газів на вході в обертовий барабан

Графічне представлення перехідної характеристики каналу витрати паливного газу наведено на рис. 2.3.

За допомогою програмного забезпечення MatLab та його середовища System Idetyfication tool box знаходимо передавальну функцію. Для цього вписуємо у командне вікно MatLab масив із даних таблиці 2.2 (див. додаток А1. рис.А1.1). З використанням Import Data заносимо нашу експериментальну модель в інструмент та обираємо час дискретності 120 секунд для подальшого знаходження передавальної функції (див. додаток А1. Рис.А1.2). Наступним кроком є дослідження математичної моделі та розрахунок її параметрів, які є найбільш наближеними до реального об'єкту, для цього було використано інструмент Process Models. Під час налаштування інструменту було отримано найбільш наближений відсоток точності 94,28% (див. додаток А1. рис.А1.3) за такими параметрами налаштування (див. додаток А1. рис.А1.4). В результаті налаштування інструменту Process Models було отримано математичний вираз передавальної функції, яка має вигляд (див. додаток А1. рис.А1.5).

Передавальна функція об'єкта за каналом регулювання температури на вході в обортовий барабан матиме вигляд:

$$W_o(p) = \frac{K_p}{(1+T_p p)^3} \cdot e^{-T_d p}, \quad (2.3)$$

Де розраховані коефіцієнти становлять:

- Коефіцієнт підсилення: $K_p = 1$;
- Сталі часу знаменника: $T_p = 229,87$ с;
- Стала часу: $T_d = 291$ с;

Підставляємо отримані значення коефіцієнтів:

$$W_o(p) = \frac{1}{(1 + 229,87p)^3} \cdot e^{-291p}.$$

Проводимо математичне розкриття дужок за формулою:

$$(1 + T_p p)^3 = 1 + 3 \cdot T_p p + 3 \cdot T_p^2 p^2 + T_p^3 p^3, \quad (2.4)$$

Тоді:

- $3 \cdot T_p = 3 \cdot 229,87 = 689,61$,
- $3 \cdot T_p^2 = 3 \cdot 229,87^2 = 158520,6507$,
- $T_p^3 = 229,87^3 = 12146380,6588$,

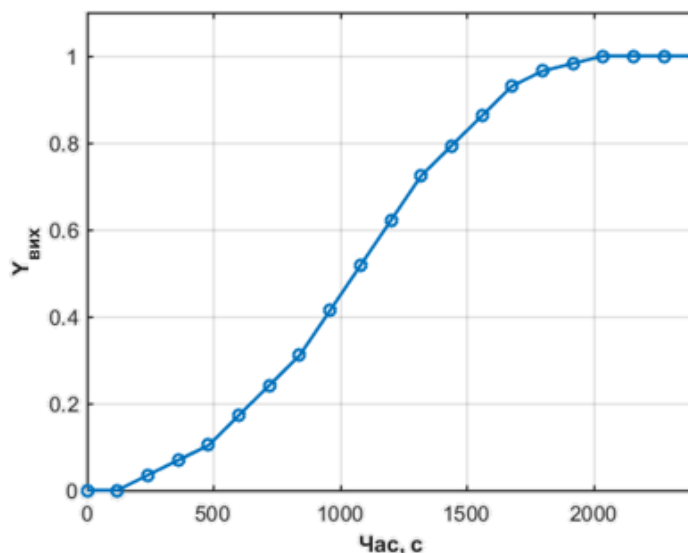


Рисунок 2.5 - Перехідна характеристика каналу витрати паливного газу у безрозмірних одиницях

За допомогою програмного забезпечення MatLab та його середовища System Idetyfication tool box знаходимо передавальну функцію. Для цього вписуємо у командне вікно MatLab масив із даних таблиці 2.3 (див. додаток А2. рис.А2.1). З використанням Import Data заносимо нашу експериментальну модель в інструмент та обираєм час дискретності 120 секунд для подальшого знаходження передавальної функції (див. додаток А2. Рис.А2.2). Наступним кроком є дослідження математичної моделі та розрахунок її параметрів, які є найбільш наближеними до реального об'єкту, для цього було використано інструмент Process Models. Під час налаштування інструменту було отримано найбільш наближений відсоток точності 91,93% (див. додаток А2. рис.А2.3) за такими параметрами налаштування (див. додаток А2. рис.А2.4). В результаті налаштування інструменту Process Models було отримано математичний вираз передавальної функції, яка має вигляд (див. додаток А2. рис.А2.5).

Передавальна функція об'єкта за каналом витрати паливного газу матиме вигляд:

$$W_1(p) = \frac{K_p}{(1+T_{p1} \cdot p)(1+T_{p2} \cdot p)}, \quad (2.6)$$

Де розраховані коефіцієнти становлять:

- Коефіцієнт підсилення: $K_p = 1,16$;
- Сталі часу знаменника: $T_p1 = 557,26$ с;
- Сталі часу знаменника: $T_p2 = 558,48$ с;

Підставляємо отримані значення коефіцієнтів:

$$W_1(p) = \frac{1,16}{(1 + 557,2607p)(1 + 558,4838p)}$$

Проводимо математичне розкриття дужок:

$$1 + 558,4838p + 557,2607p + 557,2607p \cdot 558,4838p, \quad (2.7)$$

- Додаємо коефіцієнти: $557,2607 + 558,4838 = 1115,7445$,
- Множимо коефіцієнти: $557,2607 \cdot 558,4838 = 311263,8995$,
- Отримаєм знаменник: $311263,8995p^2 + 1115,744p + 1$.

Після математичного розкриття дужок отримуємо передавальну функцію каналу витрати паливного газу:

$$W_1(p) = \frac{1,16}{311263,8995p^2 + 1115,744p + 1} \quad (2.8)$$

Висновки до розділу

Виконано аналіз обертової печі як об'єкта автоматизації та визначено основні вхідні, вихідні й збурюючі величини. Для дослідження динамічних властивостей об'єкта було використано експериментальні дані, отримані за каналами температури пічних газів і витрати паливного газу. Експериментальні значення переведено у безрозмірний вигляд, що дало змогу коректно використати їх для подальшої ідентифікації. За допомогою середовища MATLAB отримано математичні моделі досліджуваних каналів керування у вигляді передавальних функцій.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

3 СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНОЇ САК

3.1 Розроблення одноконтурної САК з ПІ регулятором

Для підтримання заданого температурного режиму в обертовій печі було обрано пропорційно-інтегральний регулятор.

Математичний опис ПІ-регулятора задається передавальною функцією:

$$W_p(p) = \frac{K_p p + K_i}{p}, \quad (3.1)$$

Параметри регулятора визначено за допомогою середовища MATLAB із використанням інструментів автоматичного налаштування (додаток Б, рисунок Б.1). У результаті отримано такі значення коефіцієнтів:

- $K_p = 0,35821$;
- $K_i = 0,00089428$;

Після підстановки знайдених параметрів передавальна функція регулятора набуває вигляду:

$$W_p(p) = \frac{0,35821p + 0,00089428}{p}.$$

Для подальшого дослідження характеристик системи необхідно визначити передавальні функції розімкненого та замкненого контурів.

Передавальна функція розімкненої системи формується як добуток передавальних функцій регулятора та об'єкта керування.

Підставивши отримані математичні моделі регулятора та об'єкта, одержимо вираз для розімкненої системи:

$$W_{\text{роз}}(p) = W_p(p) \cdot W_0(p), \quad (3.2)$$
$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{0,35821p + 0,00089428}{p} \cdot \frac{1}{12146380,6588p^3 + 158520,6507p^2 + 689,61p + 1} \cdot e^{-291p} =$$
$$= \frac{0,35821p + 0,00089428}{12146380,6588p^4 + 158520,6507p^3 + 689,61p^2 + p} \cdot e^{-291p}.$$

Передавальна функція замкненого контуру визначається співвідношенням:

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_{\text{роз}}(p)}{1 + W_{\text{роз}}(p)}. \quad (3.3)$$

						БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			30

Після виконання відповідних перетворень отримуємо математичну модель замкненої системи регулювання температури в печі.

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{(0,35821p+0,00089428) \cdot e^{-291p}}{12146380,6588p^4+158520,6507p^3+689,61p^2+p+(0,35821p+0,00089428) \cdot e^{-291p}}. \quad (3.4)$$

3.2 Розроблення одноконтурної САК з ПД регулятором

Для дослідження якості регулювання температури пічних газів розглянуто систему автоматичного керування з ПД-регулятором. Використання ПД-закону регулювання дає змогу врахувати поточне значення похибки, її накопичення в часі та швидкість зміни регульованої величини.

Передавальна функція промислового ПД-регулятора записується у вигляді:

$$W_p^B(p) = \frac{K_p p^2 + K_p p + K_i}{p}. \quad (3.5)$$

Параметри регулятора визначено за допомогою середовища MATLAB із використанням інструментів автоматичного налаштування (див. додаток Б2 рис.Б2.2). У результаті отримано такі значення коефіцієнтів:

- де - $K_p = 1.0742$;
- $K_i = 0.0012427$;
- $K_d = 175.6045$;

Після підстановки знайдених параметрів передавальна функція регулятора набуває вигляду:

$$W_p^B(p) = \frac{175,6045p^2 + 1,0742p + 0,0012427}{p}.$$

Передавальна функція розімкненої системи формується як добуток передавальних функцій регулятора та об'єкта керування:

$$W_{\text{роз}}(p) = W_p(p) \cdot W_0(p), \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{роз}}(p) &= \frac{175,6045p^2 + 1,0742p + 0,0012427}{p} \cdot \frac{1}{12146380,6588p^3 + 158520,6507p^2 + 689,61p + 1} \cdot e^{-291p} = \\ &= \frac{175,6045p^2 + 1,0742p + 0,0012427}{12146380,6588p^4 + 158520,6507p^3 + 689,61p^2 + p} \cdot e^{-291p}. \end{aligned}$$

Передавальна функція замкненої системи описується виразом:

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

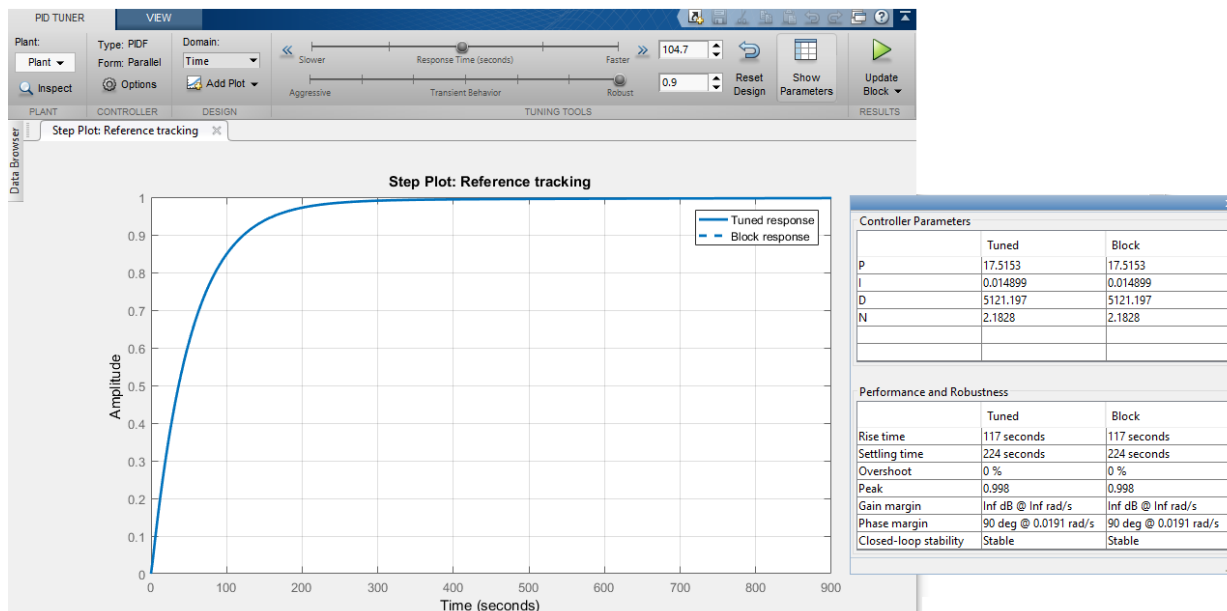


Рисунок 3.1 – Параметри налаштування внутрішнього контуру витрати паливного газу

Для налаштування зовнішнього контуру регулювання температури на вході в обертовий барабан у програмному середовищі Matlab Simulink доцільно використовувати ПІ регулювання. На рисунку 3.2 показано параметри налаштування регулятора.

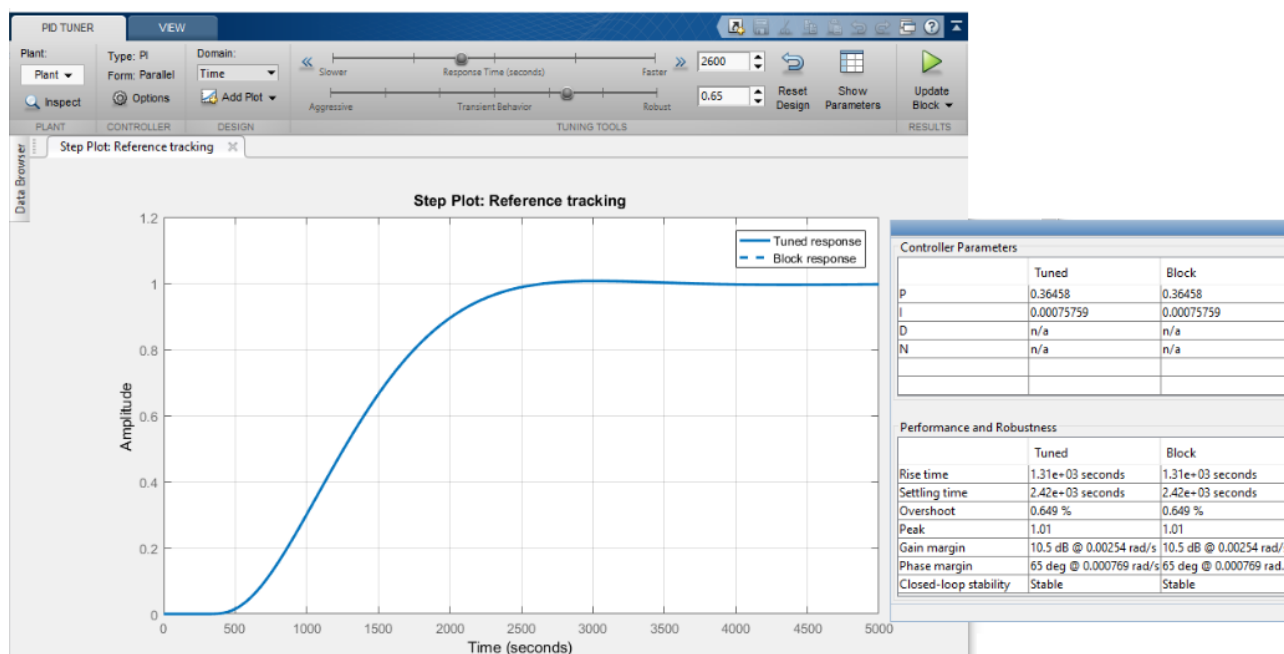


Рисунок 3.2 - Параметри налаштування зовнішнього контуру регулювання температури на вході в обертовий барабан

3.4 Дослідження показників якості регулювання за динамічними характеристиками системи

За допомогою програмного середовища Mat Lab було, зроблено аналіз ефективності одноконтурної та каскадної систем керування шляхом дослідження перехідних процесів. Складена схема та перехідна характеристика одноконтурної САК з ПІ регулятором показані на рисунку 3.4.1 та 3.4.2.

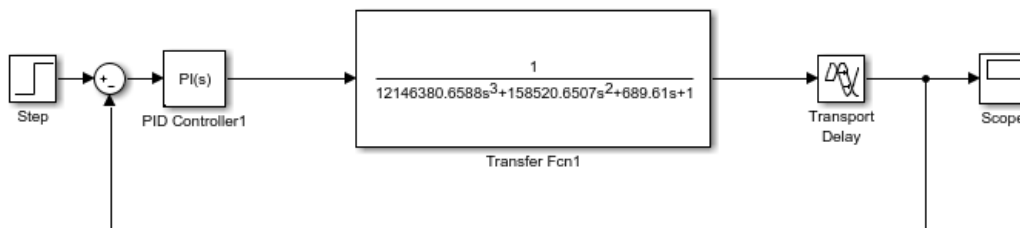


Рисунок 3.4.1 – Модель системи регулювання температури з ПІ-регулятором у середовищі Simulink

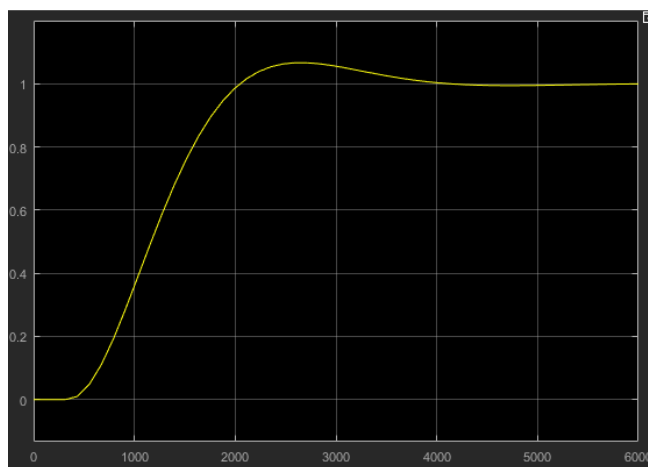


Рисунок 3.4.2 – Результат моделювання одноконтурної системи з ПІ-законом регулювання

Складена схема та перехідна характеристика одноконтурної САК з ПІД регулятором показані на рисунку 3.4.3 та 3.4.4.

З графіків визначаємо параметри якості:

1. Величина перерегулювання

$$\tau = \frac{X_{max} - X_{\infty}}{X_{\infty}} \cdot 100\%, \quad (3.11)$$

де X_{∞} - кінцеве значення величини регулювання;

X_{max} - максимальне значення відхилення динамічної величини регулювання;

На основі отриманих перехідних характеристик було визначено величину перерегулювання для кожного варіанта системи автоматичного керування.

Для одноконтурної системи з ПІ-регулятором максимальне значення вихідної величини становить 1,07. Тоді перерегулювання дорівнює:

$$\tau = \frac{1.07 - 1.00}{1.00} \cdot 100\% = 7\%,$$

Для одноконтурної системи з ПІД-регулятором максимальне значення становить 1,04:

$$\tau = \frac{1.04 - 1.00}{1.00} \cdot 100\% = 4\%,$$

Для каскадної системи автоматичного керування максимальне відхилення є найменшим і становить 1,0065.

$$r = \frac{1.065 - 1.00}{1.00} \cdot 100\% = 0.65\%.$$

Також за графіками перехідних процесів було визначено час регулювання.

- Для одноконтурної системи з ПІ-регулятором становить: $t_p = 4100$ с.
- Для системи з ПІД-регулятором: $t_p = 4800$ с.
- Для каскадної системи: $t_p = 3600$ с.

3.5 Оцінка стійкості одноконтурної АСК з ПІ регулюванням

Метою даного етапу є аналіз стійкості синтезованої замкнутої системи автоматичного керування з ПІ-регулятором за наявності в об'єкті значного чистого запізнення.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Оскільки класичний критерій Михайлова застосовується до лінійних систем із поліноміальними характеристичними рівняннями, трансцендентну ланку запізнення e^{-291p} апроксимовано дробово-раціональною функцією Паде 1-го порядку, що є оптимальним для високоінерційних технологічних процесів:

$$e^{-\tau p} = \frac{1 - \frac{\tau p}{2}}{1 + \frac{\tau p}{2}}, \quad (3.12)$$

$$e^{-291p} = \frac{1 - 145,5p}{1 + 145,5p}.$$

Формула замкненої системи з ПІ регулюванням має вигляд:

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{(0,35821p + 0,00089428) \cdot e^{-291p}}{12146380,6588p^4 + 158520,6507p^3 + 689,61p^2 + p + (0,35821p + 0,00089428) \cdot e^{-291p}}. \quad (3.13)$$

Тоді виконуємо підстановку та прирівнюємо знаменник замкненої передавальної функції до нуля:

$$(12146380,6588p^4 + 158520,6507p^3 + 689,61p^2 + p) \cdot (1 + 145,5p) + (0,35821p + 0,00089428) \cdot (1 - 145,5p) = 0.$$

Після розкриття дужок отримуємо характеристичний поліном:

$$1767298385,8554p^5 + 35211135,3356p^4 + 258858,9057p^3 + 782,990445p^2 + 1,22809226p + 0,00089428 = 0.$$

Для аналізу достатніх умов виконано підстановку $p = j\omega$, внаслідок чого поліном розділено на дійсну та уявну частини.

$$1767298385,8554j\omega^5 + 35211135,3356\omega^4 - 258858,9057j\omega^3 - 782,990445\omega^2 + 1,22809226j\omega + 0,00089428 = 0.$$

Розділюємо поліном на дійсну та уявну частину:

$$P(\omega) = 35211135,3356\omega^4 - 782,990445\omega^2 + 0,00089428,$$

$$Q(\omega) = 1767298385,8554\omega^5 - 258858,9057\omega^3 + 1,22809226\omega.$$

Для автоматизації побудови та аналізу годографа Михайлова у середовищі MATLAB розроблено програмний код (див. додаток Б3 рис. Б3.1). У програмі задаються коефіцієнти характеристичного полінома, формується діапазон частот та виконується підстановка. Після цього поліном розділяється на дійсну та уявну частини, на основі яких будується годограф Михайлова.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

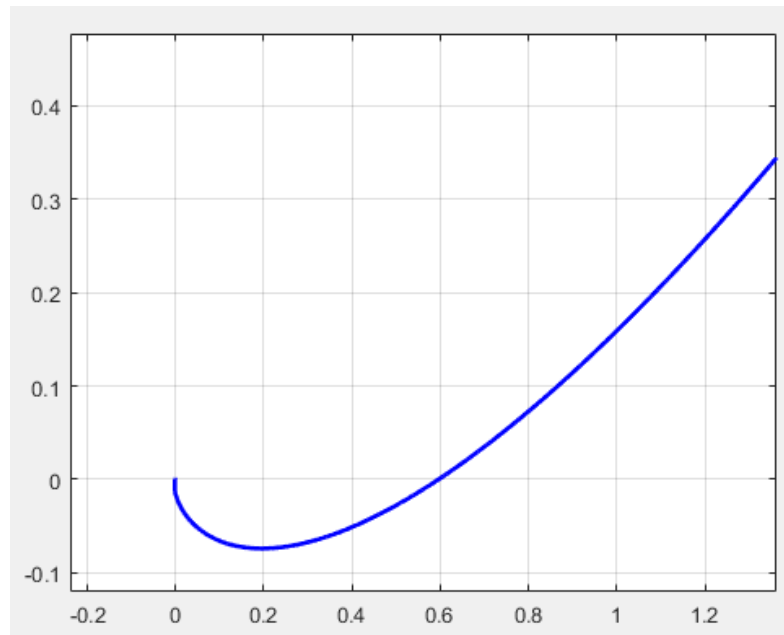


Рисунок 3.5.1 – Годограф Михайлова

Відповідно до отриманого годографа Михайлова (див рис. 3.5.1), можемо бачити, що одноконтурна система є стійкою, адже годограф Михайлова послідовно проходить п'ять квадрантів та іде у безкінечність

Висновки до розділу

У розділі проведено синтез та аналіз САК температурою пічних газів на вході в обертовий барабан. Досліджено одноконтурні системи з ПІ- та ПІД-регуляторами, визначено параметри регуляторів і побудовано відповідні моделі в середовищі MATLAB/Simulink. Також розроблено каскадну систему регулювання, у якій внутрішній контур відповідає за стабілізацію витрати паливного газу, а зовнішній — за підтримання температури. Порівняння перехідних процесів показало, що всі синтезовані системи є працездатними, а каскадна структура забезпечує кращу організацію регулювання за рахунок швидшої реакції внутрішнього контуру. Додатково виконано перевірку стійкості системи за критерієм Михайлова, що підтвердило можливість використання отриманої системи для керування температурним режимом печі.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ САК

4.1 Вибрані технічні засоби в системі автоматизації та їх аналіз

Після аналізу процесу випалу гіпсу в обертовій печі як основного технологічного об'єкта автоматизації, вивчення фізико-хімічних особливостей дегідратації гіпсового каменю та вимог до підтримання температурних режимів, було здійснено обґрунтований вибір комплексу технічних засобів автоматизації. Специфіка виробництва будівельного гіпсу вимагає високої точності регулювання співвідношення газу і повітря, а також безперервного контролю витратних параметрів для запобігання перепалу або недопалу сировини. Обрані ТЗА спрямовані на забезпечення надійної, безаварійної та енергоефективної роботи технологічної лінії.

Враховуючи специфіку та технічні вимоги об'єкта, для реалізації системи автоматизації було використано такий комплекс технічних засобів:

- Термоперетворювачі - для виміру температури в зонах випалу печі та матеріальних потоків;
- Вихрові витратоміри - для виміру витрати газу та повітря, що подається у піч;
- Тензодатчики - для зважування та дозування вхідного гіпсового щебню;
- Датчики швидкості - для контролю частоти обертання електродвигунів
- Датчик вологості - для вимірювання вологості готового гіпсу;
- Датчики рівня - для контролю заповнення бункерів;
- Мікропроцесорний ПІД-регулятор МІК-127 - як основний регулятор для підтримання теплових режимів;
- Промисловий контролер Siemens LOGO! та МІК-127 для логічного керування, захисту та пуску електродвигунів допоміжних механізмів.
- Вторинні прилади та виконавчі механізми

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

4.2 Вибрані первинні перетворювачі витрати, температури, рівня, ваги, вологості та швидкості

Для виміру витрати повітря та природного газу в даному проекті було обрано вихровий витратомір Rosemount 8800 Vortex Flowmeter (рис. 4.1). Цей інтелектуальний прилад призначений для точного контролю потоків, що йдуть у піч. Він працює за принципом детектування вихрових доріжок Кармана і генерує уніфікований струмовий сигнал 4–20мА з протоколом HART.

Вибір повністю обґрунтований суцільнозварною конструкцією корпусу без рухомих частин, що виключає витіки газу і гарантує безпеку. Завдяки технології цифрової фільтрації прилад стійкий до вібрацій трубопроводів, забезпечуючи точність співвідношення «газ-повітря» з похибкою до 0.65%. Клас захисту IP66/IP67 забезпечує стабільну роботу в умовах високих температур та запиленості цеху.



Рисунок 4.1 - Rosemount 8800 Vortex Flowmeter

Для безперервного контролю теплового режиму в зонах випалу обертової печі та вимірювання температури матеріальних потоків обрано термоелектричний перетворювач типу ТХА-2388 (рис. 4.2). Даний прилад є класичним первинним вимірювальним перетворювачем, що генерує сигнал термоелектрорушійної сили в мілівольтах.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Вибір термопари ТХА-2388 є повністю обґрунтованим з огляду паспортні та експлуатаційні параметри. Робочий діапазон вимірювання — від -40°C до $+1000^{\circ}\text{C}$, що забезпечує надійний запас міцності. Захисна арматура представляє чохол із жароміцної високолегованої сталі марки 12Х18Н10Т надійно захищає термоелектроди від руйнування. Конструкція приладу розрахована на тривалу роботу в жорстких умовах печі випалу гіпсу, що супроводжуються високою запиленістю.



Рисунок 4.2 - Давач температури ТХА-2388

Для даного проекту було вибрано ультразвуковий рівнемір Rosemount 3102 Ultrasonic Level Transmitter (рис. 4.3). Цей інтелектуальний прилад безконтактного типу забезпечує безперервний контроль рівня матеріалу в технологічних бункерах, автоматично перераховуючи час проходження ультразвукового імпульсу в поточне значення рівня та генеруючи уніфікований завадостійкий струмовий сигнал 4–20мА.

Даний вибір є повністю обґрунтованим завдяки його експлуатаційним параметрам: робочий діапазон вимірювання становить від 0.3 до 11 метрів. Прилад має високий клас захисту IP66, максимальна похибка вимірювання похибка 0.25%.



Рисунок 4.3 - Rosemount 3102 Ultrasonic Level Transmitter

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Для виміру ваги матеріалу в було обрано тензометричний датчик ваги Keli UDA (рис. 4.4) з робочим діапазоном навантаження 50–750 кг. Цей первинний вимірювальний перетворювач одноточкового типу призначений для безперервного зважування сировини на стрічковому конвеєрі. Датчик інтегрується у струмову петлю 4–20 мА.



Рисунок 4.4 - Keli UDA

Для виміру вологості сировини обрано мікрохвильовий датчик вологості типу Нуму 3000 (рис. 4.5). Цей прилад призначений для безперервного безконтактного контролю вологості гіпсу, безпосередньо на виході з печі. Датчик вимірює діелектричну проникність матеріалу і передає дані через уніфікований аналоговий сигнал 4–20 мА.



Рисунок 4.5 - Нуму 3000

Для контролю частоти обертання молоткового млина було обрано датчик швидкості IFM Electronic MX5050 (рис. 4.6). Цей безконтактний перетворювач призначений для безперервного вимірювання швидкості обертів молоткового млина. Він виконаний у міцному металевому корпусі з різьбою М16, має високу граничну частоту перемикання 15000 Гц, що дозволяє миттєво фіксувати найменші відхилення швидкості.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42



Рисунок 4.6 - IFM Electronic MX5050

4.3 Вибір технологічного електроприводу та виконавчих механізмів

Для забезпечення роботи основних технологічних агрегатів комплексу в даному проекті було обрано трифазний асинхронний електродвигун типу Gamak AGM2E 132 S/4 (рис. 4.7). Цей промисловий двигун загального призначення потужністю 5.5 кВт та синхронною частотою обертання 1500 об/хв використовується здебільшого для приводу гвинтових шнеків, стрічкових транспортерів, а також вагового дозатора та живильника, що працюють у тривалому режимі навантаження. Клас енергоефективності IE2, що знижує енергоспоживання, та має міцний алюмінієвий корпус з ефективним охолодженням.



Рисунок 4.7 - Gamak AGM2E 132 S/4

Для приводу основних важких агрегатів лінії в даному проекті було обрано трифазний асинхронний електродвигун серії Siemens SIMOTICS GP номінальною

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

потужністю 22 кВт (рис. 4.8). Цей промисловий двигун застосовується для елеватора, шокової та роторної дробарки, молоткового млина, вентиляторів, а також як головний привід для забезпечення стабільного обертання обертової печі.

Він має високу перевантажувальну здатність, оптимізований коефіцієнт корисної дії та полегшений алюмінієвий корпус з ефективною системою охолодження.



Рисунок 4.8 - Siemens SIMOTICS GP

Для керування подачею газу та повітря було обрано сервоприводи регулюючих клапанів серії Siemens SQM50 (рис. 4.9). Ці електромоторні виконавчі механізми призначені для точного позиціонування газової заслінки та повітряного клапана, забезпечуючи автоматичне регулювання співвідношення газ-повітря в процесі спалювання.

Він має крутний момент до 15 Нм, час повороту на 90 градусів складає від 10 до 45 секунд. Привод оснащений реверсивним синхронним двигуном із захистом від блокування та підтримує керування через аналоговий сигнал 4-20мА.



Рисунок 4.9 - Siemens SQM50

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

4.4 Вибір контролерів, регуляторів та індикаторів

Для забезпечення регулювання температури в печі було обрано контролер-регулятор МІК-127 (рис. 4.10). Цей прилад призначений для вимірювання, контролю та регулювання температури у печі за рахунок регулювання клапанів газу та повітря.

Основні технічні характеристики МІК-127:

- Кількість аналогових входів — 4 універсальні канали підтримка сигналів 4–20 мА.
- Кількість аналогових виходів - 2 канали підтримка сигналів 4–20 мА.
- Точність вимірювання — похибка становить не більше 0.2%.
- Швидкість опитування входів - не більше 0.1 секунди на канал.
- Інтерфейс зв'язку — вбудований порт RS-485 для інтеграції в SCADA-систему за протоколами Modbus RTU / ASCII;
- Дисплей має 4-розрядний світлодіодний індикатор зелений/червоний колір для відображення поточного значення та додаткова шкала для наочного контролю відхилення
- Живлення приладу іде від мережі змінного струму 220 В або постійного струму 24 В.
- Компактний корпус щитового монтажу із класом захисту з передньої панелі IP54
- Справно працює при температурі від -40 °С до +70 °С.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45



Рисунок 4.10 – МІК-127

Для побудови дискретної логіки керування та автоматичного захисту всього силового обладнання в даному проекті було обрано контролер серії Siemens LOGO! 8 (рис. 4.11). Цей компактний модульний прилад використовується для запуску двигунів шнеків, стрічкових транспортерів, елеваторів, головного приводу обертової печі, вентилятора аспірації, а також важких агрегатів лінії — шокової і роторної дробарок та молоткового млина, забезпечуючи технологічну послідовність увімкнення та захисне блокування у разі аварійних ситуацій.

Основні технічні характеристики:

- Обсяг пам'яті: до 400 функціональних блоків.
- Підтримка мереж: вбудований порт Ethernet та підтримка протоколу MQTT для інтеграції в хмару.
- Входи/Виходи: базова модель підтримує до 8 дискретних входів та 4 виходів.
- Типи живлення: моделі на 12 В, 24 В та 230 В.
- Дисплей: оснащений вбудованим LCD-екраном з можливістю налаштування кольору підсвічування.
- Коректно працює при температурі навколишнього середовища від -20 °С до +55 °С.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



Рисунок 4.11 - Siemens LOGO!

Для індикації рівнів у бункерах та вологості гіпсу на виході з печі у проекті використовується одноканальний цифровий індикатор ІТМ-100 (рис. 4.12).

Основні технічні характеристики

- Кількість входів: один
- Типи вхідних сигналів:
- Струм: 0-5 мА, 0-20 мА, 4-20 мА.
- Напруга: 0-50 мВ, 0-200 мВ, 0-1 В, 0-10 В.
- Термоперетворювачі опору: ТСП, ТСМ (50П, 100П, 50М, 100М), Pt100, Pt500, Pt1000.
- Дисплей: 4-розрядний, 7-сегментний.
- Інтерфейс: RS-485 протокол Modbus RTU.
- Живлення: ~100-230 В.
- Робоча температура: від -40°C до +70°C.



Рисунок 4.12 – ІТМ-100

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

4.5 Вибір електротехнічного обладнання

Частотний перетворювач Schneider Electric Altivar 340D15 N4E (рис. 4.13) використовується у проекті для регулювання швидкості двигунів вагового дозатора та швидкості двигуна живильника молоткового млина.

Технічні характеристики:

- Номінальна потужність: 15 кВт.
- Напруга та кількість фаз - 380 - 480 В змінного струму, 3 фази.
- Типи двигунів - Працює як з асинхронними, так і з синхронними двигунами.
- Вбудовані мережі - Багатопротокольний Ethernet, EtherNet/IP, Modbus TCP, а також лінія Modbus.



Рисунок 4.13 - Schneider Electric Altivar 340D15 N4E

У проекті використовується імпульсні блоки живлення MEAN WELL HDR-15-24 (рис. 4.14). Вхідна напруги 100–240 V AC. Вихідна напруга - 24 V DC. Номінальний струм: 0,63 А. Потужність становить 15 Вт.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48



Рисунок 4.14 - MEAN WELL HDR-15-24

Для захисту від перевантаження контролерів та регуляторів у проекті використовується двофазний автомат Schneider Electric RESI9 16А, 2Р (рис. 4.15). Номінальний струм 16А, класу С. Робоча напруга: ~230 В.



Рисунок 4.15 - Schneider Electric RESI9 16А, 2Р

Для захисту від перевантаження електродвигунів на 5.5 кВт у проекті використовується трьохфазний автомат RESI9 Schneider Electric 32 А, 3Р(рис. 4.16). Номінальний струм 32А, класу С. Робоча напруга: ~380 В.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49



Рисунок 4.16 - Schneider Electric RESI9 32А, 3Р

Для захисту від перевантаження електродвигунів на 22 кВт у проекті використовується трьохполюсний автомат RESI9 Schneider Electric 63 А, 3Р(рис. 4.16). Номінальний струм 63А, класу С. Робоча напруга: ~380 В.



Рисунок 4.17 - Schneider Electric RESI9 63А, 3Р

Для сигналу на увімкнення електро двигнів використовується кнопка Schneider Electric Easy Harmony ХА2ЕW33В1 (рис. 4.17). Кнопка класу NO. Без фіксації. Доступна у двох кольорах зеленому та червоному.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50



Рисунок 4.18 - Schneider Electric Easy Harmony XA2EW33B1

Для захисту електродвигунів потужністю 22кВт використовується теплові реле Schneider Electric LRD365 (рис. 4.18). Діапазон регулювання пристрою 48-65А.



Рисунок 4.19 - Schneider Electric LRD365

Для захисту електродвигунів потужністю 5.5кВт використовується теплові реле теплове реле Schneider Electric LRD35 (рис. 4.19). Діапазон регулювання пристрою 30-38А.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51



Рисунок 4.20 - Schneider Electric LRD65

Для надійної комутації силових кіл електродвигунів та інших потужних навантажень у даному проекті було обрано трифазний силовий контактор серії Siemens Sirius 3RT2536-1NF30 (рис. 4.20). Призначений для частих дистанційних пусків, зупинок та захисного відключення трифазних асинхронних двигунів, зокрема приводів дробарок, млина та стрічкових, шнекових транспортерів.

Характеристика присторою:

- Кількість головних полюсів: 2 NO та 2 NC
- Номінальний робочий струм: до 70 А при 380 В
- Номінальна потужність: 22 кВт



Рисунок 4.21 - Siemens Sirius 3RT2536-1NF30

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

сигнал через перетворювач (поз. 1-б), який надходить на мікропроцесорний індикатор ІТМ-100 (поз. 1-в), встановлений на щиті КВПіА, для постійної візуальної індикації поточного значення.

Витрата гіпсового щебню, що подається з бункера живлення печі Б1 в обертовий барабан ОБ за допомогою стрічкового вагового дозатора ВД, регулюється за допомогою первинного давача ваги Keli UDA (поз. 2-а) та первинного давача швидкості IFM Electronic MX5050 (поз. 3-а), де здійснюється перетворення вимірюваної величини в електричний сигнал 4-20 мА через перетворювачі (поз. 2-б) та (поз. 3-б), який надходить на мікропроцесорний регулятор МІК-127 (поз. 2-в), встановлений на щиті КВПіА. З регулятора керуючий сигнал поступає на виконавчий механізм — електродвигун М7 (поз. 2-г) привода дозатора, який змінює швидкість руху стрічки, регулюючи подачу сировини в піч.

Автоматичне регулювання температури в печі здійснюється за допомогою комплексної системи, де в одному багатоканальному мікропроцесорному регуляторі МІК-127 (поз. 4-в), встановленому на щиті КВПіА, сходяться сигнали від декількох позицій контролю:

- від термопари температури на вході в обертовий барабан ТХА-2388 (поз. 4-а), де здійснюється перетворення вимірюваної величини в електричний сигнал через перетворювач (поз. 4-б);
- від інтелектуального давача-витратоміра паливного газу Rosemount 8800 Vortex Flowmeter (поз. 5-а), де здійснюється перетворення вимірюваної величини в електричний сигнал через перетворювач (поз. 5-б);
- від інтелектуального давача-витратоміра повітря Rosemount 8800 Vortex Flowmeter (поз. 6-а), де здійснюється перетворення вимірюваної величини в електричний сигнал через перетворювач (поз. 6-б);
- від термопари температури матеріалу на виході з обертового барабана ТХА-2388 (поз. 7-а), де здійснюється перетворення

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

вимірюваної величини в електричний сигнал через перетворювач (поз. 7-б).

На основі аналізу цих технологічних параметрів регулятор МІК-127 відображає поточні значення та формує керуючі сигнали на виконавчі механізми сервоприводи регулюючих клапанів: клапана газу К1 (поз. 4-г) на трубопроводі паливного газу та клапана повітря К2 (поз. 4-д) на трубопроводі подачі повітря до топки печі ТП. Залежно від розбалансу системи, регулюючі органи клапанів частково прикриваються чи відкриваються, змінюючи витрату газу та повітря для підтримання заданої температури випалу гіпсу та оптимального співвідношення суміші газ-повітря.

Вологість випаленого гіпсу на виході з печі контролюється за допомогою первинного давача вологості Humty 3000 (поз. 8-а), де здійснюється перетворення вимірюваної величини в електричний сигнал через перетворювач (поз. 8-б), який надходить на мікропроцесорний індикатор ІТМ-100 (поз. 8-в), встановлений на щиті КВПіА, для моніторингу якості готового продукту.

Завантаження помольного молоткового млина МЛ регулюється за допомогою первинного давача швидкості обертання IFM Electronic MX5050 (поз. 10-а) та датчика рівня у бункері томлення Б2 Rosemount 3102 Ultrasonic Level Transmitter (поз. 9-а) , де здійснюється перетворення вимірюваної величини в електричний сигнал через перетворювачі (поз. 9-б) та (поз. 10-б), який надходить на мікропроцесорний регулятор МІК-127 (поз. 9-в), встановлений на щиті КВПіА. Регулятор відображає поточне значення та формує керуючий сигнал, який подається на виконавчий механізм — двигун живильника млина М14 (поз. 9-г), змінюючи інтенсивність подачі матеріалу в млин залежно від його поточного навантаження.

Рівень готового будівельного гіпсу в накопичувальному силосі Б3 контролюється за допомогою первинного давача рівня Rosemount 3102 Ultrasonic Level Transmitter (поз. 11-а), де здійснюється перетворення вимірюваної величини в електричний сигнал через перетворювач (поз. 11-б), який надходить

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

на мікропроцесорний індикатор ІТМ-100 (поз. 11-в), встановлений на щиті КВПіА, для оперативного контролю заповнення силосу готовою продукцією.

Додатково на функціональній схемі автоматизації відображено силове технологічне обладнання та відповідні електродвигуни приводів основних механізмів і агрегатів лінії виробництва будівельного гіпсу:

- М1 - електродвигун привода щокової дробарки (поз. ЩД);
- М2 - електродвигун привода стрічкового транспортера (поз. СТ1);
- М3 - електродвигун привода роторної дробарки (поз. РД);
- М4 - електродвигун привода стрічкового транспортера (поз. СТ2);
- М5 - електродвигун привода ковшового елеватора (поз. ЕЛ1);
- М6 - електродвигун привода стрічкового транспортера (поз. СТ3);
- М7 - електродвигун привода стрічкового вагового дозатора (поз. ВД);
- М8 - електродвигун головного привода обертового барабана печі (поз. ОБ);
- М9 - електродвигун привода шнекового транспортера (поз. ШТ1);
- М10 - електродвигун радіального вентилятора системи циклона та рукавного фільтра (поз. ВТ2);
- М11 - електродвигун привода шнекового транспортера (поз. ШТ2);
- М12 - електродвигун привода другого ковшового елеватора (поз. ЕЛ2);
- М13 - електродвигун привода шнекового транспортера (поз. ШТ3);
- М14 - електродвигун привода живильника завантаження млина (поз. ЖВ);
- М15 - електродвигун привода молоткового млина (поз. МЛ);
- М16 - електродвигун радіального вентилятора подачі повітря для паливної суміші (поз. ВТ1);

Висновки до розділу

У розділі було зроблено вибір технічних засобів автоматизації із аналізом їх характеристик. Обрані ТЗА є важливими для роботи даної автоматизованої системи. Розроблено функціональну схему автоматизації із відображенням необхідних контрольно вимірюваних приладів та контурів регулювання.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

5 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1 Розроблення принципів електричних схем

Принципова електрична схема є основним документом, який описує повний склад електричних елементів, пристроїв, блоків та зв'язків між ними, забезпечуючи детальне розуміння принципів роботи розробленої системи автоматичного керування процесом випалу гіпсу в обертовій печі. Вона є базою для подальшого проектування монтажних схем, схем підключень, проектування щитів КВПіА.

При проектуванні принципів електричних схем для проекту було розроблено такі принципові електричні схеми:

- Розроблено принципову електричну схему, регулювання температури в обертовій печі (див. додаток В1).
- Розроблено принципову електричну схему, індикації з датчиків рівнів та датчика вологості (див. додаток В2).
- Розроблено принципову електричну схему регульованого керування електродвигуном вагового дозатора М7 (див. додаток В3).
- Розроблено принципову електричну схему регульованого керування електродвигуном живильника завантаження молоткового млина М14 (див. додаток В4).
- Розроблено принципову електричну схему керування електродвигунами М1, М2, М3, М4 (див. додаток В5).
- Розроблено принципову електричну схему керування електродвигунами М5, М6, М8, М9 (див. додаток В6).
- Розроблено принципову електричну схему керування електродвигунами М10, М11, М12, М13 (див. додаток В7).
- Розроблено принципову електричну схему керування електродвигунами М15 та М16 (див. додаток В8).

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Перелік елементів на електричних схемах наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Перелік елементів на електричних схемах

Позначення	Назва	Кількість
T1...T2	Датчик температури – ТХА 2388	2
F1...F2	Давач витрати – Rosemount 8800	2
C1...C3	Перетворювач напруги – Mean Well HDR-15-24	3
L1...L3	Датчик рівня – Rosemount 3102 Ultrasonic Level Transmitter	3
U1...U3	Контролер – регулятор Мікрол МІК-127	3
D1...D2	Сервопривід – Siemens SQM50	2
W1...W2	Датчик швидкості – IFM Electronic DI5020	2
VR1...VR2	Перетворювач частоти – Schneider Electric Altivar ATV630	2
ME	Датчик вологомір – Hummy 3000	1
KL	Датчик ваги – Keli UDA	1
BT1...BT12	Кнопка “Strat”, “ Stop” (зелена/червона)- Schneider Electric Easy Harmony XA2EW33B1	14
KT1...KT14	Силовий контактор 3 фазний - Siemens 3RT2536-1NF30	14
SL1...SL4	Програмований логічний контролер PLC – Siemens LOGO!	4
TR2, TR4, TR6, TR8, TR10, TR12	Реле теплове - Schneider Electric LRD65	6

TR1, TR3, TR5, TR7, TR9, TR11, TR13, TR14	Реле теплове - Schneider Electric LRD365	8
SFF, SF1, SF3, SF8, SF13, SF18	Двох полюсний автомат - Schneider Electric RESI9 10A	7
SF2, SF3, SF5, SF7, SF10, SF12 SF15, SF17	Трифазний автомат - Schneider Electric RESI9 32A	8
SF4, SF6, SF9, SF11, SF14, SF16 SF19, SF20	Трифазний автомат – Schneider Electric RESI9 63A	8
M1, M3, M5, M8, M10, M12, M15, M16	Трьохфазний асинхронний електродвигун 22кВт - Siemens SIMOTICS GP	8
M2, M4, M6, M7, M9, M11, M13, M14	Трьохфазний асинхронний електродвигун 5,5кВт – Gamak AGM 132 S/4	8
IT1...IT3	Цифровий індикатор Мікрол – ITM- 100	3
W1, W2	Датчик швидкості – IFM Electronic DI5020	2

5.2 Проектування загального вигляду щита системи автоматизації

Щит автоматизації призначений для компактного розміщення засобів контролю та керування технологічним процесом із забезпеченням максимальної зручності їхнього монтажу та експлуатації. Для даного проекту обрано щит шкафний типу: ЩШ-ЗД-2000x800x500. Який надійно захищає мікропроцесорні

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

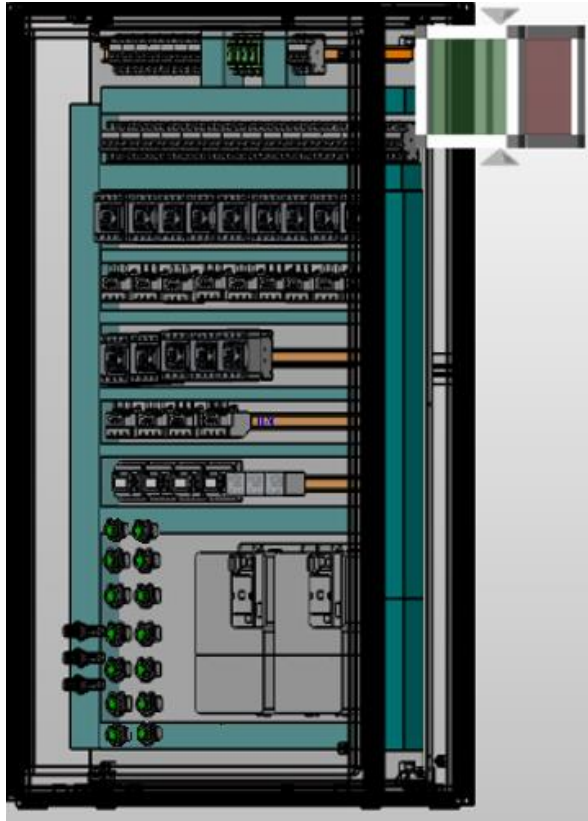


Рисунок 5.2.2 Внутрішній вигляд щита, вид справа

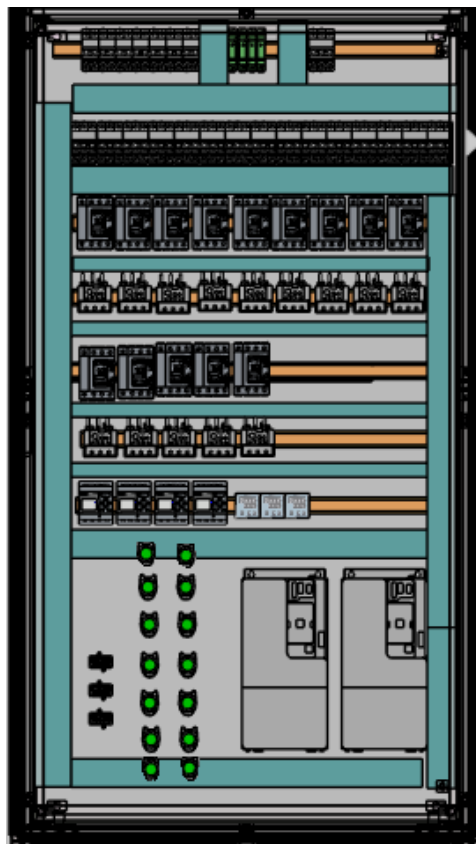


Рисунок 5.2.3 – Внутрішній вигляд щита, вид спереду

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Висновки до розділу

У даному розділі виконано проектування апаратного забезпечення системи автоматизації об'єкта. Результатом етапу проектування є розробка схем принципових електричних з'єднань, які забезпечують надійне функціонування контурів вимірювання, регулювання та логічного захисту обладнання. Крім того, розроблено щит автоматизації, визначено оптимальне компонування приладів на його панелях та обрано марки монтажних проводів і силових кабелів для надійної комутації елементів системи.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розроблено автоматизовану систему керування процесом випалу гіпсу в обертовій печі. Основну увагу приділено підтриманню стабільного температурного режиму, регулюванню витрати паливного газу та забезпеченню якості готового будівельного гіпсу.

У роботі проаналізовано технологічний процес випалу гіпсу, розглянуто основні етапи виробництва та наведено характеристику технологічного обладнання. Визначено параметри, які необхідно контролювати і регулювати під час роботи установки.

На основі експериментальних даних побудовано перехідні характеристики каналів температури та витрати паливного газу. Дані переведено у безрозмірний вигляд, після чого в середовищі MATLAB System Identification Toolbox отримано передавальні функції об'єкта керування.

Виконано синтез одноконтурних систем автоматичного керування з ПІ- та ПІД-регуляторами, а також розглянуто каскадну систему регулювання з внутрішнім контуром витрати газу та зовнішнім контуром температури. Моделювання в MATLAB/Simulink показало, що синтезовані системи забезпечують стійке регулювання.

Також здійснено вибір технічних засобів автоматизації, зокрема вимірювальних перетворювачів, регуляторів, контролерів, виконавчих механізмів, електроприводів та апаратів захисту. Розроблено функціональну схему автоматизації, принципові електричні схеми та загальний вигляд щита керування.

Отже, запропонована автоматизована система керування дозволяє підвищити стабільність процесу випалу гіпсу, забезпечити контроль основних технологічних параметрів, зменшити вплив людського фактора та покращити якість готового будівельного гіпсу.

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

[3101-3102-3105-ultrasonic-liquid-level-transmitters-en-73584.pdf](#) (дата звернення: 05.06.2026 р.).

13. Мікрол. МІК-127. Програмований мікропроцесорний регулятор. – URL: <https://microl.ua/ua/product/programovaniy-logicnij-regulator-z-vilnoprogramovanou-logickou> (дата звернення: 05.06.2026 р.).

14. Мікрол. ІТМ-100. Індикатор-вимірювач технологічних параметрів. – URL: <https://microl.ua/ua/product/indikator-vimiruvac-tehnologicnih-parametriv> (дата звернення: 05.06.2026 р.).

15. Siemens. SQM5 Actuators for Air and Gas Dampers: data sheet. – URL: <https://sid.siemens.com/v/u/28061> (дата звернення: 05.06.2026 р.).

16. IFM Electronic. DI5020 Compact Evaluation Unit for Speed Monitoring. – URL: <https://www.ifm.com/de/en/product/DI5020> (дата звернення: 05.06.2026 р.).

17. Schneider Electric. Altivar Process ATV630 Variable Frequency Drives. – URL: <https://www.se.com/us/en/product-range/62317-altivar-process-630-variable-frequency-drives-vfd/> (дата звернення: 05.06.2026 р.).

18. Muetec Instruments. HUMY 3000 Moisture Measurement System. – URL: <https://muetec-instruments.de/en/products/measurement-systems/moisture/humy-3000/> (дата звернення: 05.06.2026 р.).

19. KELI Sensor. UDA Load Cell. – URL: <https://keli.com.ua/en/product/load-cell-uda/> (дата звернення: 05.06.2026 р.).

20. Schneider Electric. XA2EW33B1 Complete Illuminated Push Button Easy Harmony XA2, green. – URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/XA2EW33B1/> (дата звернення: 05.06.2026 р.).

21. Siemens. 3RT2536-1NF30 SIRIUS Power Contactor: data sheet. – URL: https://www.mouser.lt/datasheet/3/5917/6/3RT25361NF30_datasheet_en.pdf (дата звернення: 05.06.2026 р.).

22. Schneider Electric. LRD365 TeSys LRD Thermal Overload Relay. – URL: <https://www.se.com/uk/en/product/LRD365/tesys-lrd-thermal-overload-relays-48-65-a-class-10a/> (дата звернення: 05.06.2026 р.).

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

23. Schneider Electric. RESI9 10 A Two-pole Circuit Breaker. – URL: <https://sloboda-shop.com/avtomatychnyj-vymykach-10a-schneider-electric-resi9-c2r> (дата звернення: 05.06.2026 р.).
24. Schneider Electric. RESI9 32 A Three-pole Circuit Breaker R9F12332. – URL: https://leoceramika.com/product/avtomatichniy-vimikach-6ka-3p-32a-c-resi9-r9f12332-schneider-electric_6815543 (дата звернення: 05.06.2026 р.).
25. Schneider Electric. RESI9 63 A Three-pole Circuit Breaker R9F12363. – URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/R9F12363/> (дата звернення: 05.06.2026 р.).
26. Siemens. SIMOTICS GP, SD, XP, DP Low-Voltage Motors: catalog. – URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/197/109749197/att_1122986/v1/Motors-D81-1-complete-English-12-2022.pdf (дата звернення: 05.06.2026 р.).
27. Gamak. AGMEL 132 S 4a Three-phase Electric Motor: technical specifications. – URL: <https://www.gamak.com/en/agmel-132-s-4a> (дата звернення: 05.06.2026 р.).
28. MathWorks. MATLAB User's Guide. – URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата звернення: 05.06.2026 р.).
29. MathWorks. Simulink User's Guide. – URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/> (дата звернення: 05.06.2026 р.).
30. MathWorks. System Identification Toolbox Documentation. – URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/> (дата звернення: 05.06.2026 р.).
31. MathWorks. PID Tuner Documentation. – URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html> (дата звернення: 05.06.2026 р.).

					БР.АКП-02.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ДОДАТКИ

Додаток А1

Ідентифікація за каналом регулювання температури

```
Command Window
fx >> % Вхідний ступінчастий сигнал
t1 = [0; ones(length(y1)-1,1)];
% Безрозмірні значення температури
y1 = [0.0000 0.0000 0.0154 0.0462 0.0923 0.1692 0.2769 0.4000 0.5385 0.6615 0.7692 0.8615 0.9231 0.9538 ...
      0.9692 0.9846 0.9846 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000];
```

Рисунок А1.1 – масив переведених в безрозмірні одиниці експериментальних даних каналу регулювання температури на вході в обертовий барабан

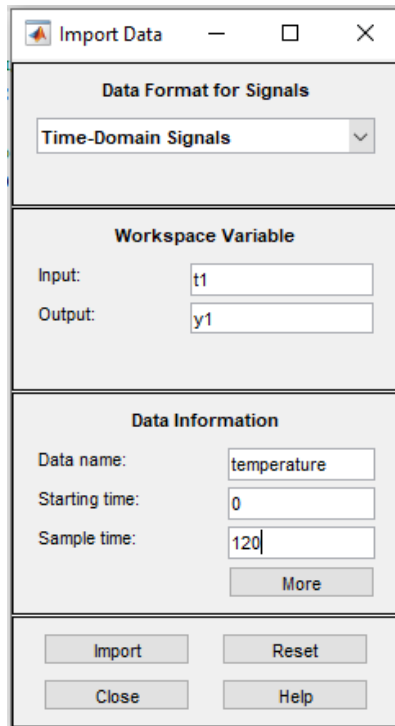


Рисунок А1.2 – Вікно Import Data та його налаштування для імпорту експериментальних даних основного контуру

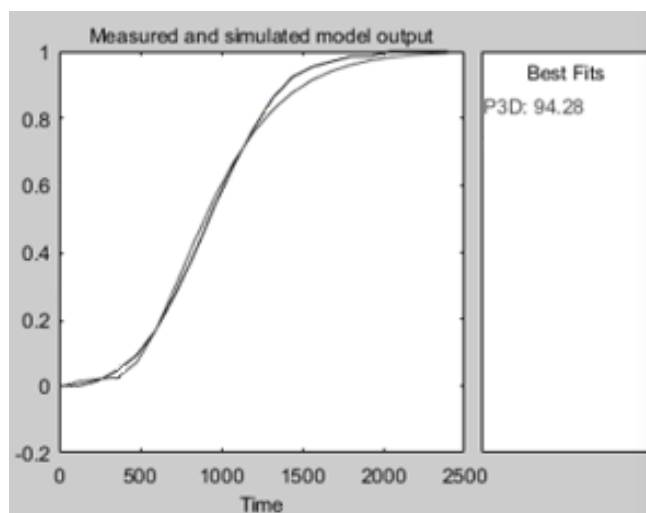


Рисунок А1.3 – Результат отриманої моделі

Продовження додатку А1

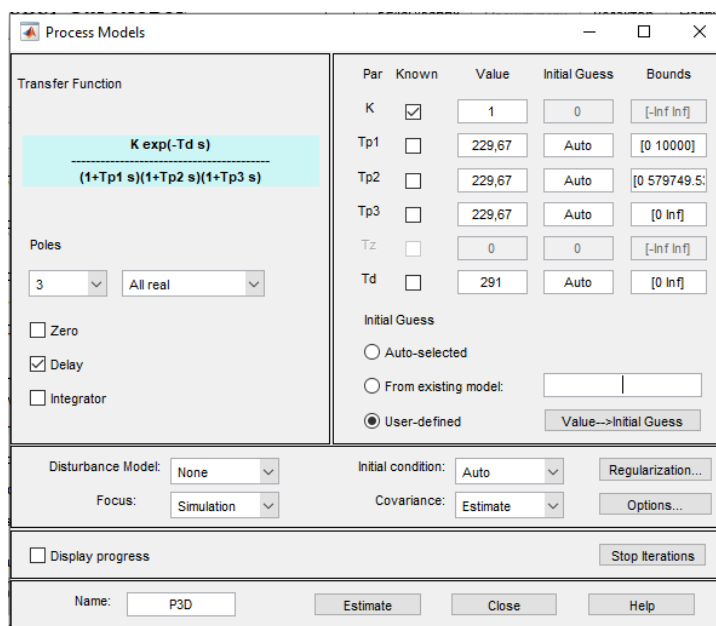


Рисунок А1.4 – вікно налаштування параметрів Process Models

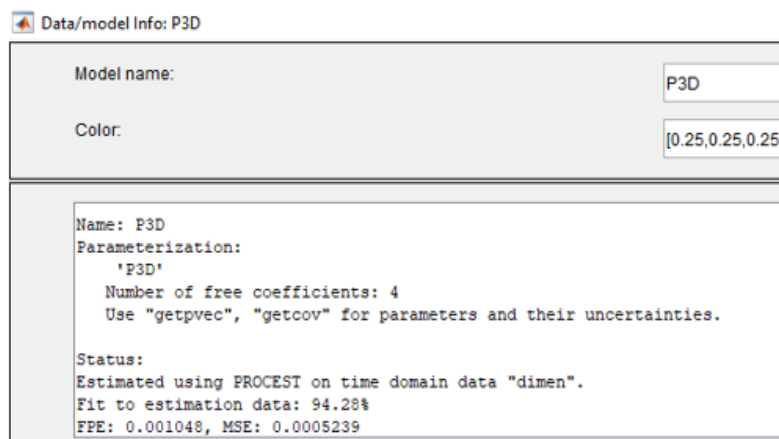
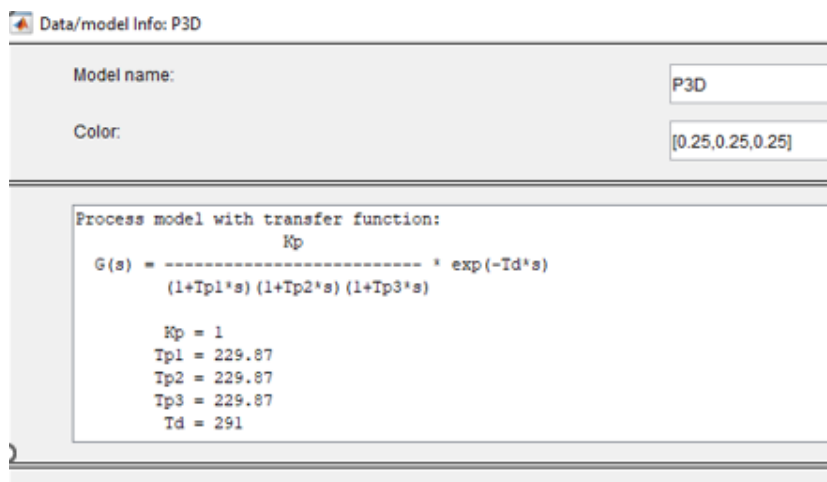


Рисунок А1.5 – математичний вираз передавальної функції

Додаток А2

Ідентифікація каналу регулювання витрати газу

```
fx >> % Вхідний ступінчастий сигнал  
t2 = [0; ones(length(y1)-1,1)];  
% Безрозмірні експериментальні значення витрати газу  
y2 = [0.0000 0.0000 0.0345 0.0690 0.1034 0.1724 0.2414 0.3103 0.4138 0.5172 0.6207 0.7241 0.7931 0.8621 ...  
      0.9310 0.9655 0.9827 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000]';
```

Рисунок А2.1 – масив переведених в безрозмірні одиниці експериментальних даних каналу витрати паливного газу

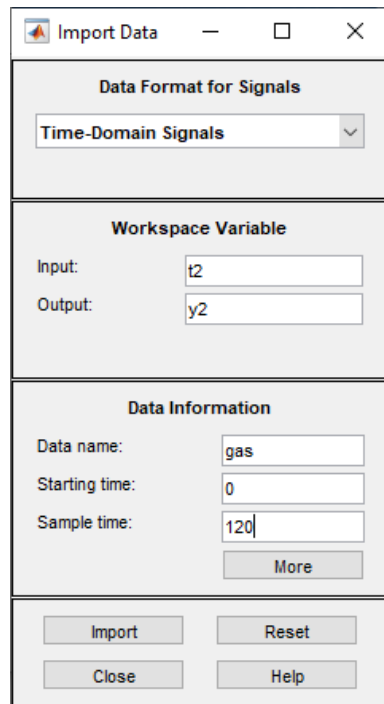


Рисунок А2.2 – Вікно Import Data та його налаштування для імпорту експериментальних даних допоміжного контуру

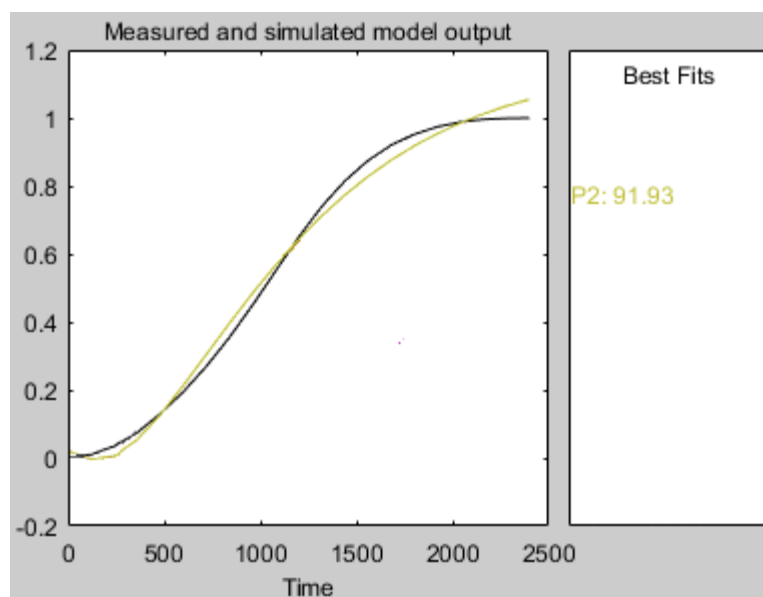


Рисунок А2.3 – Результат отриманої моделі

Продовження додатку А2

Process Models

Transfer Function

$$K \frac{1}{(1 + T_{p1} s)(1 + T_{p2} s)}$$

Poles

2 All real

Zero
 Delay
 Integrator

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input checked="" type="checkbox"/>	1.16	0	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	557.26	Auto	[0 10000]
Tp2	<input type="checkbox"/>	558.48	Auto	[0 579749.5]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]

Initial Guess

Auto-selected
 From existing model:
 User-defined

Disturbance Model: None Initial condition: Auto Regularization...
Focus: Simulation Covariance: Estimate Options...

Display progress

Name: P2

Рисунок А2.4 – вікно налаштування параметрів Process Models

Data/model Info: P2

Model name: P2

Color: [0.75,0.75,0.2]

Process model with transfer function:

$$G(s) = \frac{K_p}{(1+T_{p1}s)(1+T_{p2}s)}$$

Kp = 1.16
Tp1 = 557.26
Tp2 = 558.48

Parameterization:
'P2'
Number of free coefficients: 2
Use "getpvec", "getcov" for parameters and their unc

Status:
Estimated using PROCESST on time domain data "data_new".
Fit to estimation data: 91.93%
FPE: 0.00137, MSE: 0.0009313

Рисунок А2.5 – математичний вираз передавальної функції

Додаток Б1

Параметри налаштування регуляторів одноконтурної системи

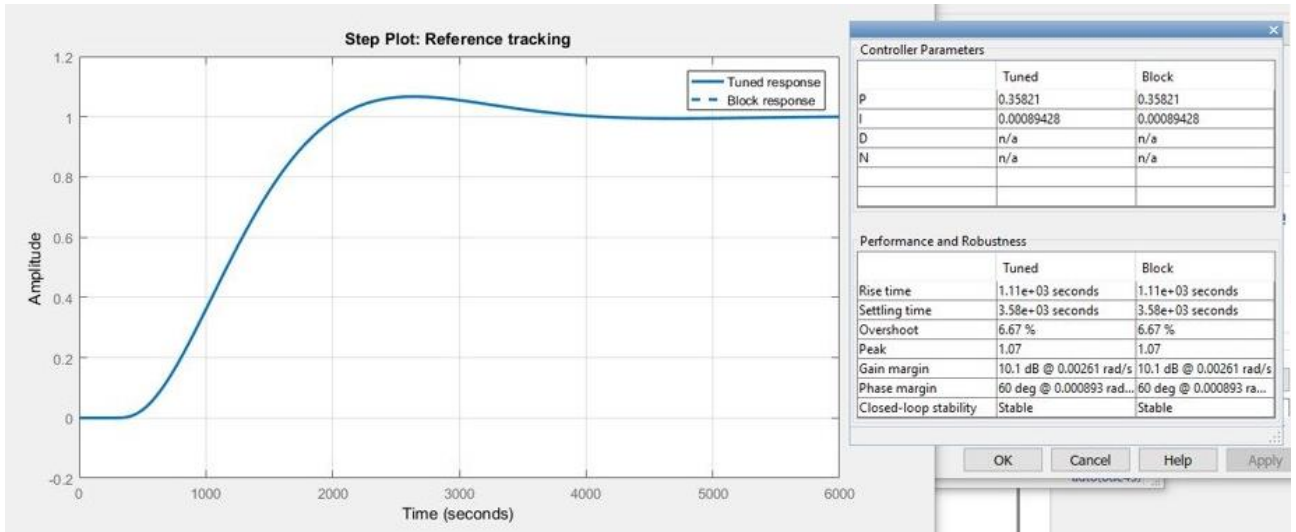


Рисунок Б1.1 – Параметри налаштування ПІ регулятора

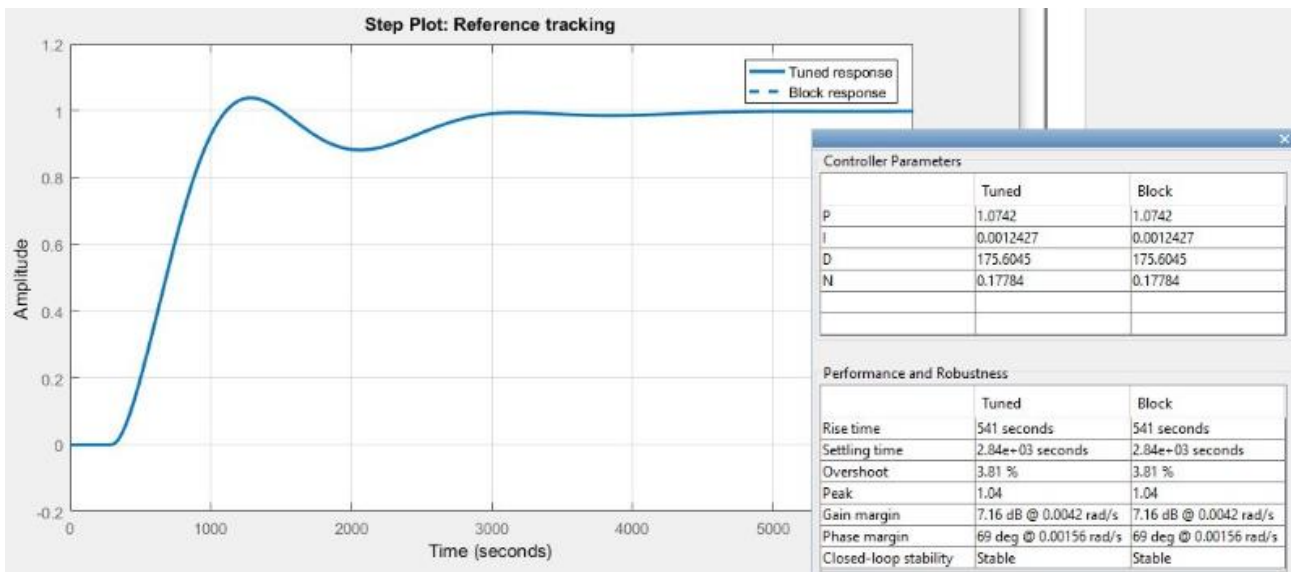


Рисунок Б1.2 - Параметри налаштування ПІД регулятора

Додаток Б2

Параметри налаштування блоку Transport Delay

Block Parameters: Transport Delay

Transport Delay

Apply specified delay to the input signal. Best accuracy is achieved when the delay is larger than the simulation step size.

Parameters

Time delay:
291

Initial output:
0

Initial buffer size:
1024

Use fixed buffer size

Direct feedthrough of input during linearization

Pade order (for linearization):
0

OK Cancel Help Apply

Рисунок Б2.1 – параметри налаштування блоку Transport Delay

Додаток БЗ

Написання коду для дослідження на стійкість методом Михайлова

```
Command Window

% Коефіцієнти характеристичного полінома після апроксимації Паде
% D(p) = c5*p^5 + c4*p^4 + c3*p^3 + c2*p^2 + c1*p + c0

c5 = 1767298385.8554;
c4 = 35211135.33565;
c3 = 258858.9057;
c2 = 782.990445;
c1 = 1.22809226;
c0 = 0.00089428;

% Частотний діапазон
w = linspace(0, 1, 200000);

% Підстановка p = j*w
D = c5*(1i*w).^5 + c4*(1i*w).^4 + c3*(1i*w).^3 + ...
    c2*(1i*w).^2 + c1*(1i*w) + c0;

% Дійсна та уявна частини
X = real(D);
Y = imag(D);

% Побудова годографа Михайлова
figure;
plot(X, Y, 'b', 'LineWidth', 1.8);
grid on;
hold on;

% Осі координат ...
xline(0, 'k', 'LineWidth', 1.5);
yline(0, 'k', 'LineWidth', 1.5);

% Підписи осей
xlabel('Re[D(j\omega)]', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Im[D(j\omega)]', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
title('Годограф Михайлова', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');

% Початкова точка
plot(X(1), Y(1), 'ro', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 2);
text(X(1), Y(1), ' \omega = 0', 'FontSize', 11, 'FontWeight', 'bold');

% Стрілки напрямку руху годографа
idx = round(linspace(1000, length(w)-1000, 8));

for k = 1:length(idx)-1
    i = idx(k);
    dx = X(i+500) - X(i);
    dy = Y(i+500) - Y(i);
    quiver(X(i), Y(i), dx, dy, 0, 'r', ...
        'LineWidth', 1.2, 'MaxHeadSize', 2);
end

axis equal;
set(gca, 'FontSize', 11, 'LineWidth', 1.2);
box on;

% Розрахунок зміни аргументу
phi = unwrap(angle(D));
delta_phi = phi(end) - phi(1);
quadrants = delta_phi / (pi/2);

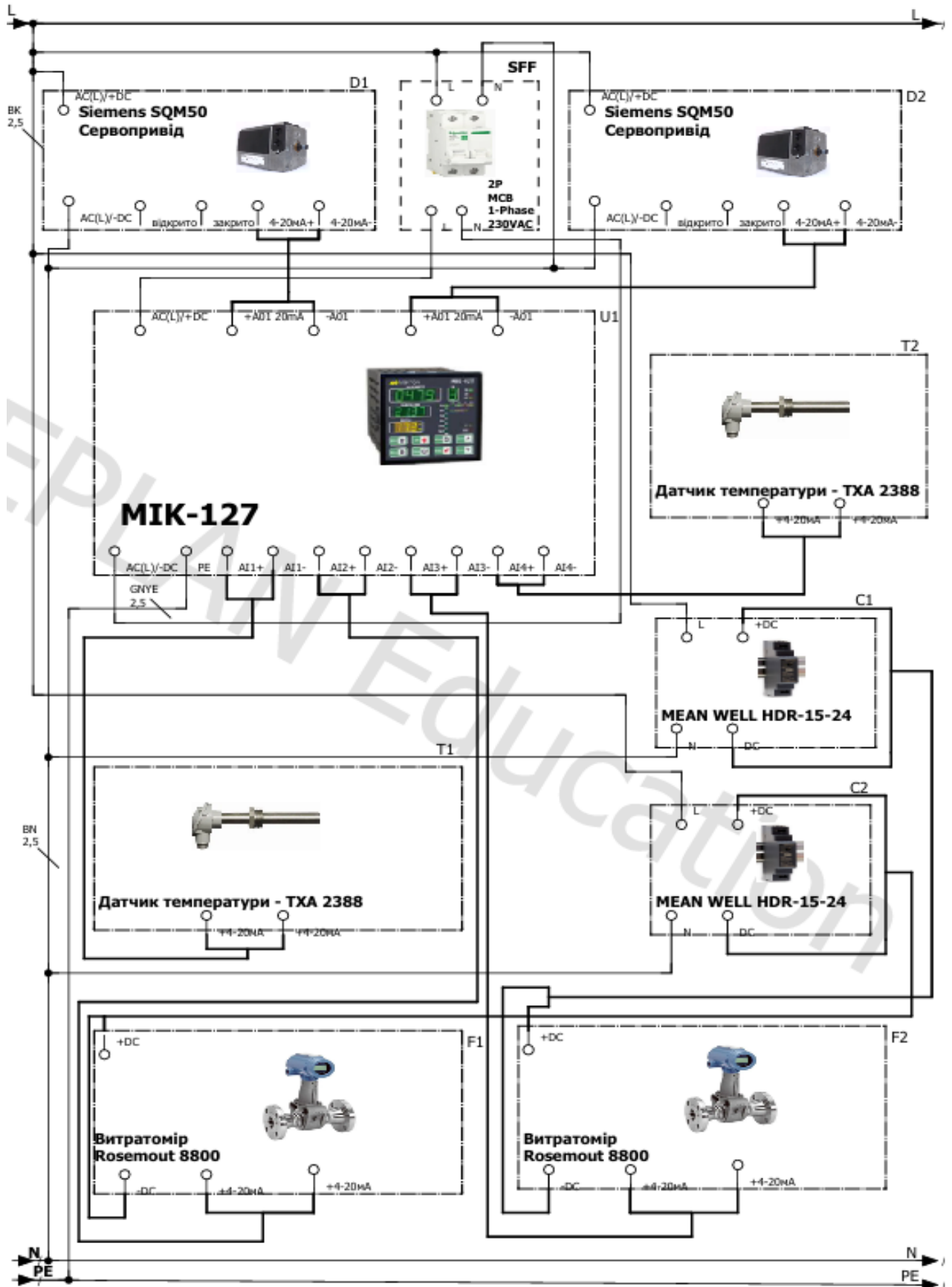
fprintf('Початкова фаза = %.4f рад\n', phi(1));
fprintf('Кінцева фаза = %.4f рад\n', phi(end));
fprintf('Зміна аргументу = %.4f рад\n', delta_phi);
fprintf('Кількість пройдених квадрантів = %.4f\n', quadrants);

% Перевірка стійкості за критерієм Михайлова
if abs(quadrants - 5) < 0.2
    disp('Система стійка за критерієм Михайлова.');
```

Рисунок БЗ.1 – Програмний код побудови годографа Михайлова

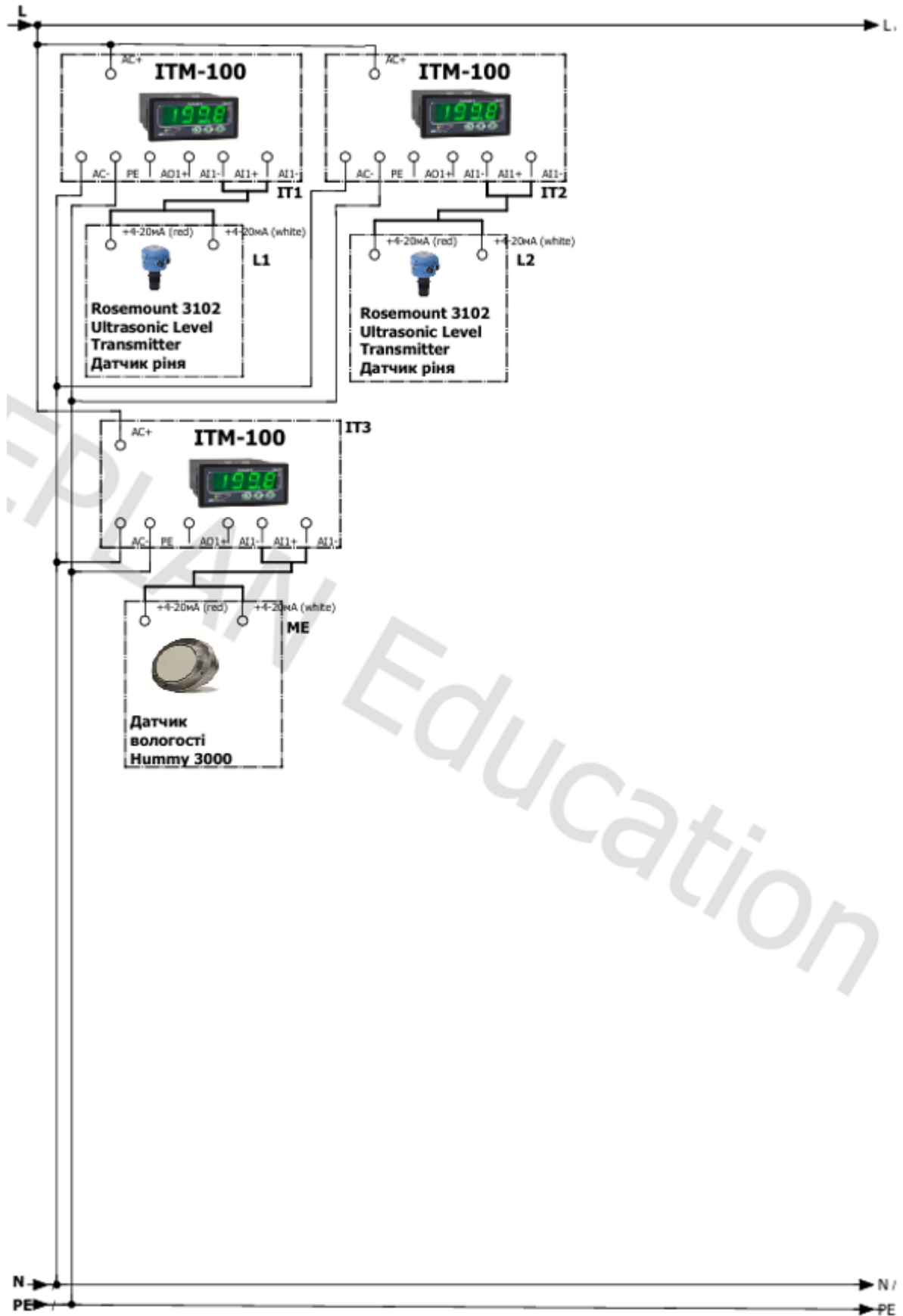
Додаток В1

Принципова електрична схема



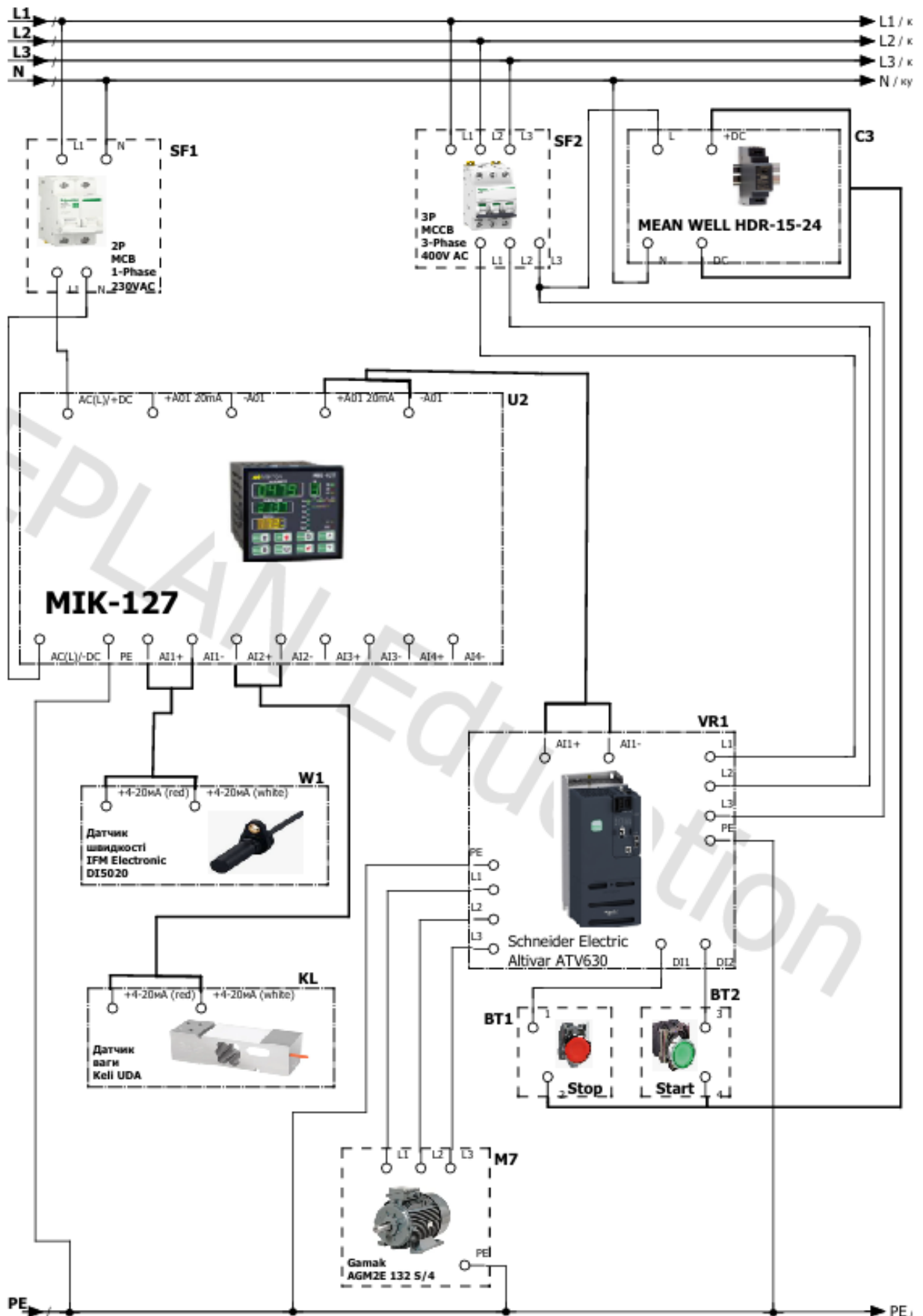
Додаток В2

Принципова електрична схема



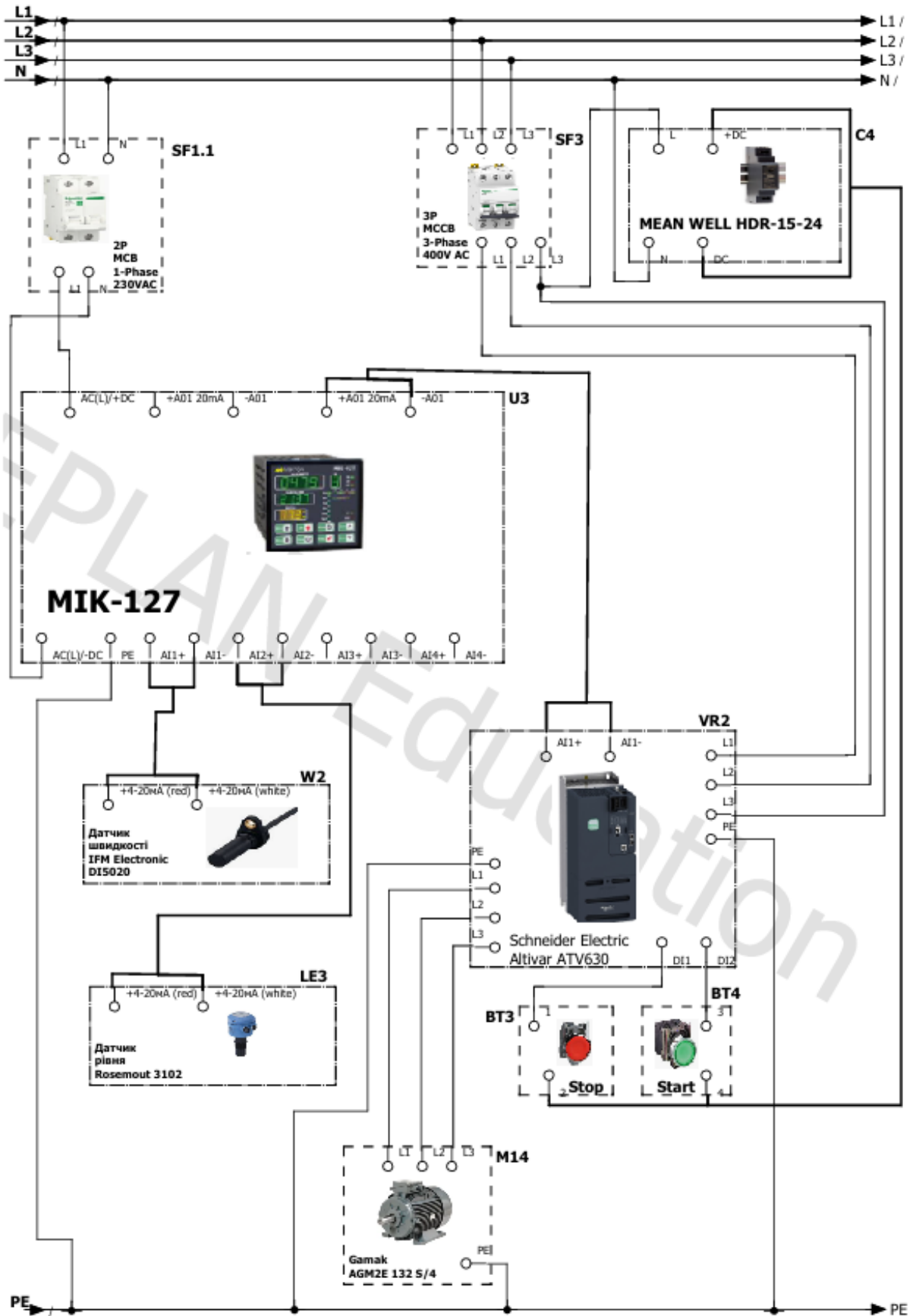
Додаток В3

Принципова електрична схема



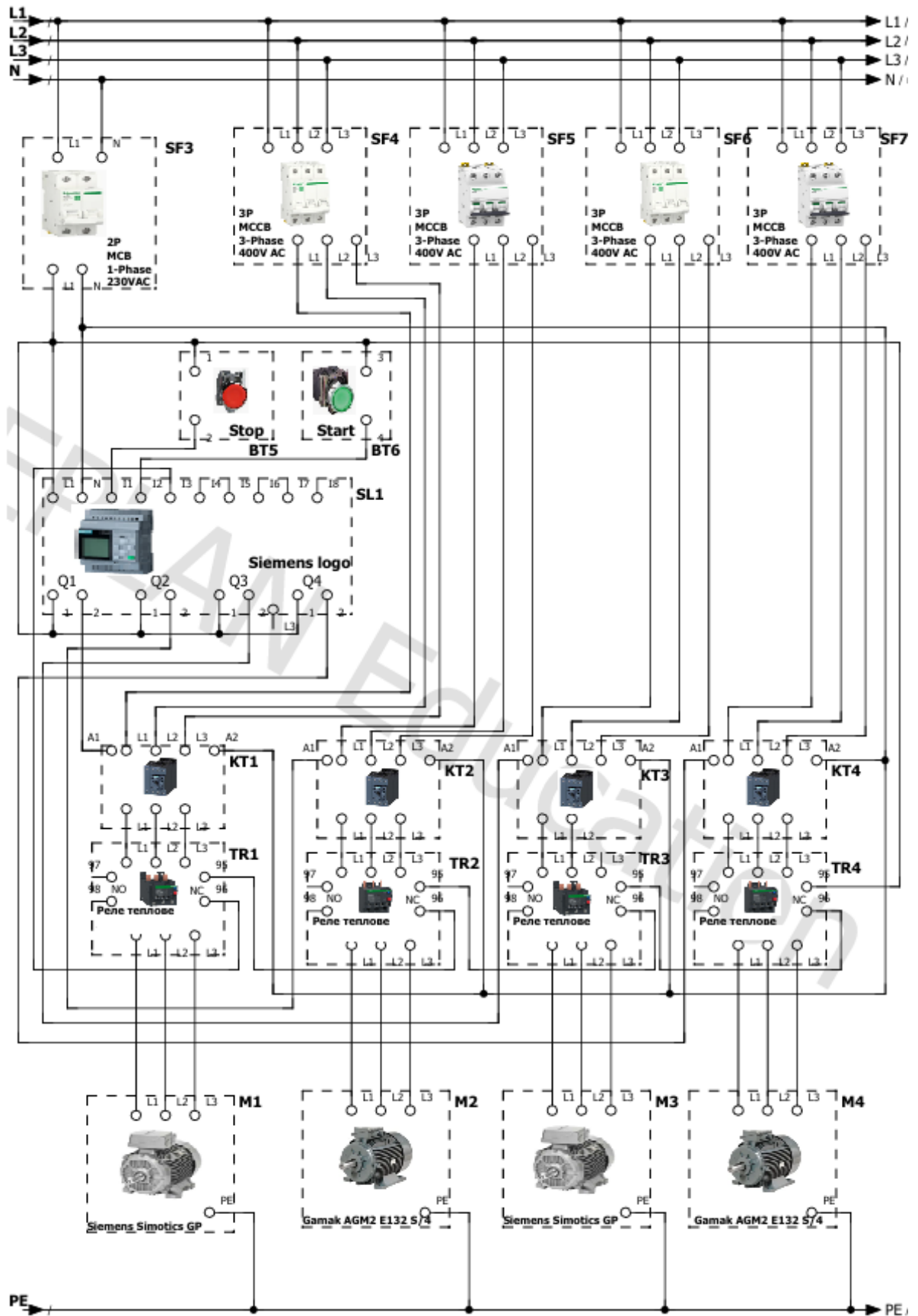
Додаток В4

Принципова електрична схема



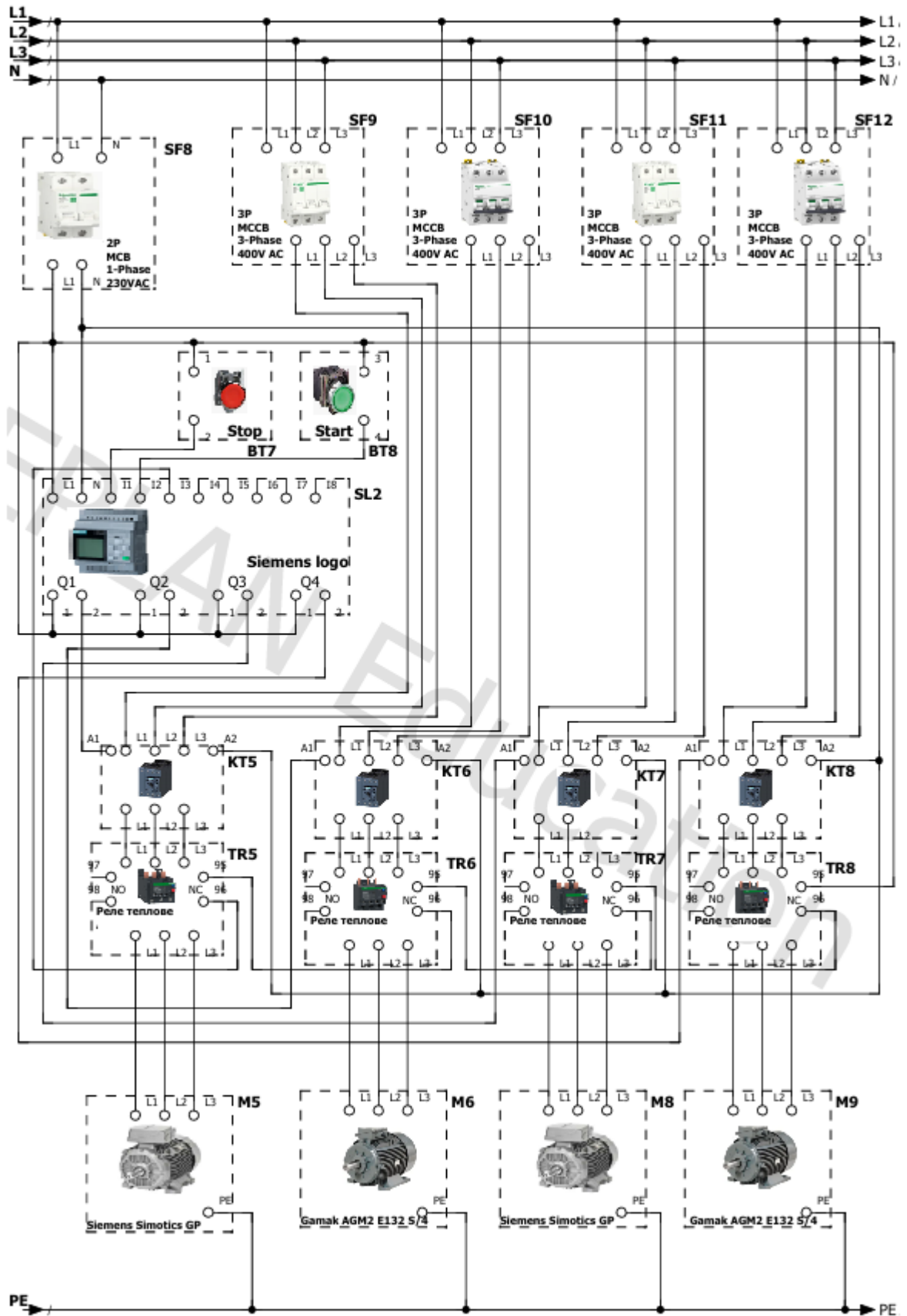
Додаток В5

Принципова електрична схема



Додаток В6

Принципова електрична схема



Додаток В7

Принципова електрична схема

