

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**  
**ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 02.06.-КР.2056"С".2024.11.18.020.ПЗ

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
**В.о. завідувача кафедри**  
автоматики та робототехнічних систем  
ім. акад. І.І. Мартиненка  
(назва кафедри)  
К.Т.Н., доц. \_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПІБ)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему «РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ У БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ»**

Спеціальність: 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
(шифр і назва)

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_

(підпис)

Заєць Н.А., д.т.н., професор  
(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав \_\_\_\_\_

(підпис)

Резвін Є.В.  
(П.І.Б студента)

Керівник бакалаврської роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Лендел Т.І., к.т.н., доцент  
(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

**КИЇВ – 2025**

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
**В.о. завідувача кафедри**  
автоматики та робототехнічних систем  
ім. акад. І.І. Мартиненка  
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. \_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПІБ)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Резвіну Євгенію Валерійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: Розробка системи автоматичного керування температурним режимом у біогазовій установці

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" листопада 2024 р. № 2056 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.05.30  
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: Завдання кафедри на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи. Наукова література та публікації, що відповідають тематиці бакалаврської кваліфікаційної роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз технологічного процесу сушіння зерна.
2. Дослідження зерносушарки як об'єкта автоматизації.
3. Вибір регулятора та обґрунтування його параметрів.
4. Дослідження системи автоматичного керування процесом сушіння зерна.
5. Схеми системи автоматизації.
6. Техніко-економічне обґрунтування.

Дата видачі завдання "18" листопада 2024 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Лендел Т.І.

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Резвін Є.В.

## АНОТАЦІЯ

Для України біоенергетика є одним зі стратегічних напрямків розвитку сектора відновлюваних джерел енергії, враховуючи високу залежність країни від імпортованих енергоносіїв насамперед природного газу та великий потенціал біомаси, доступної для виробництва енергії. На жаль, темпи розвитку біоенергетики в Україні досі суттєво відстають від європейських[1]. Динаміка розвитку відновлювальних джерел багато в чому визначається наявністю механізмів стимулювання. На сьогодні одним із інструментів підтримки відновлюваної енергетики в країні є «зелений» тариф на електроенергію, вироблену з ВДЕ, у тому числі з біомаси.

Біогазова галузь має великий потенціал і має ряд переваг, не тільки в сільському господарстві, але й у промисловості, біогаз можна виробляти зі спеціально вирощених енергетичних культур, а також водоростей, одержувати біогаз на звалищах з муніципальних побутових відходів.

Використання біогазових установок скорочує викид в атмосферу обмеження поширення метану, що скорочує парниковий ефект, а також перероблений гній застосовують як добрива в сільському господарстві. Це дозволяє знизити застосування хімічних добрив.

В свою чергу ключовим напрямком автоматизації біогазових реакторів є контроль температури для недопущення досягнення критичних значень температури, через що метаногенні бактерії загинуть та процес виробництва біогазу зупиниться.

На основі технологічного процесу виробництва біометану було розроблено рішення в галузі автоматизації, що поєднує в собі систему керування температурою засобами мікроконтролерів серії ARDUINO та людино-машинний інтерфейс (SCADA-система). Запропонована структура передбачає збір даних з виробничого обладнання, обробку отриманої інформації, прийняття рішення щодо управління технологічним процесом виробництва біогазу та візуалізацію для ефективного управління системою.

## ANNOTATION

For Ukraine, bioenergy is one of the strategic directions for the development of the renewable energy sector, given the country's high dependence on imported energy carriers, primarily natural gas, and the large potential of biomass available for energy production. Unfortunately, the pace of bioenergy development in Ukraine still lags far behind the European pace[1]. The dynamics of renewable energy development is largely determined by the availability of incentive mechanisms. Currently, one of the tools to support renewable energy in the country is the “green” tariff for electricity produced from renewable energy sources, including biomass.

The biogas industry has great potential and has a number of advantages, not only in agriculture but also in industry; biogas can be produced from specially grown energy crops and algae, and biogas can be obtained from municipal waste in landfills.

The use of biogas plants reduces methane emissions into the atmosphere, which reduces the greenhouse effect, and processed manure is used as fertilizer in agriculture. This reduces the use of chemical fertilizers.

In turn, the key area of biogas reactor automation is temperature control to prevent critical temperature values from being reached, which would kill methanogenic bacteria and stop the biogas production process.

Based on the technological process of biomethane production, an automation solution was developed that combines a temperature control system using ARDUINO series microcontrollers and a human-machine interface (SCADA system). The proposed structure provides for data collection from production equipment, processing of the received information, decision-making on the control of the biogas production process and visualization for effective system management.

## ВСТУП

*Мета дослідження:* Створення системи керування температурним режимом біогазової установки, що дозволить максимально ефективно керувати отриманням біогазу в реакторі з підвищенням якості кінцевого продукту.

*Актуальність теми:* Забезпечення оптимального температурного режиму у біореакторах є ключовим фактором ефективного перебігу анаеробних процесів, зокрема у виробництві біогазу. Коливання температури можуть негативно впливати на активність мікроорганізмів та стабільність утворення метану. В сучасних умовах зростаючої потреби у відновлюваних джерелах енергії зростає інтерес до автоматизованих систем керування, які здатні підтримувати необхідні технологічні параметри з високою точністю. Теплові процеси в біореакторах мають складну динаміку, яка залежить від багатьох зовнішніх і внутрішніх факторів, таких як температура теплоносія, швидкість обміну теплом, геометрія апарату тощо. Тому розробка адекватної математичної моделі теплового режиму біореактора та її реалізація у вигляді імітаційної моделі у середовищі MATLAB Simulink є актуальним завданням, що дозволяє підвищити ефективність та надійність біогазових установок.

*Об'єкт дослідження:* Тепловий режим біореактора, що використовується у складі біогазової установки, зокрема процеси теплообміну між субстратом, теплоносієм та зовнішнім середовищем. Об'єкт характеризується інерційною динамікою та великою сталою часу, що зумовлює необхідність точного моделювання та ефективного регулювання температурних параметрів для забезпечення стабільної роботи мікробіологічних процесів анаеробного розкладу.

*Предмет дослідження:* Математичне моделювання та вдосконалення системи автоматичного регулювання температурного режиму біореактора, що використовується у біогазових установках. Дослідження охоплює побудову передатної функції об'єкта, розробку алгоритмів керування температурою, оптимізацію параметрів регулятора, а також реалізацію цифрової моделі системи у середовищі MATLAB Simulink. Особлива увага приділяється підвищенню точності регулювання, зменшенню впливу зовнішніх збурень та забезпеченню стабільності температурного режиму з метою покращення ефективності процесу утворення біогазу.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ БІОГАЗУ</b> .....	8
<b>1.1. Технологія виробництву біогазу</b> .....	8
<b>1.2. Види біогазових установок</b> .....	10
<b>1.3. Інформаційний аналіз технологічного об'єкта керування</b> .....	14
<b>1.4. Розробка функціональної схеми автоматизації процесу утворення біогазу</b> .....	15
<b>РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕАКТОРА ПОПЕРЕДНЬОГО БРОДІННЯ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ</b>	19
<b>2.1. Розв'язок диференційних рівнянь для створення математичної моделі</b> .....	19
<b>2.2. Побудова імітаційної моделі в середовищі MATLAB SIMULINK</b> ....	22
<b>2.3. Виведення передатної функції об'єкта керування</b> .....	24
<b>2.4. Розрахунок періоду квантування цифрової системи автоматичного регулювання</b> .....	27
<b>2.5. Розрахунок параметрів ПІ-регулятора</b> .....	29
<b>РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	40
<b>3.1. Вибір силової частини електричного кола</b> .....	40
<b>3.2. Вибір керуючої частини електричного кола</b> .....	43
<b>3.3. Вибір кабельно-провідникової продукції</b> .....	52
<b>3.4. Розробка електричної принципової схеми</b> .....	54
<b>3.5. Розробка схеми електричних з'єднань</b> .....	54
<b>3.6. Розробка схеми електричних підключень</b> .....	55
<b>3.7. Розробка загального виду щита керування</b> .....	56
<b>РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ</b> .....	57
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	64
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	65
<b>ДОДАТКИ</b> .....	69

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ БІОГАЗУ

### 1.1. Технологія виробництва біогазу

Утворення біогазу є складним багатофазним біохімічним процесом, який реалізується в анаеробних умовах за відсутності молекулярного кисню та за участі суворо специфічних груп мікроорганізмів. Цей процес відіграє ключову роль у сучасних технологіях перетворення органічних залишків у відновлюване паливо, що поєднує екологічну доцільність з енергетичною ефективністю. Науковий інтерес до цього явища зумовлений не лише його енергогенеруючим потенціалом, а й можливістю екологічно безпечної утилізації органічних відходів різного походження – від аграрної сировини до побутових і промислових залишків.

Технологічна суть процесу полягає в послідовному біохімічному перетворенні складних органічних сполук у метан та діоксид вуглецю – основні компоненти біогазу. Варто наголосити, що йдеться не про просту реакцію розкладу, а про цілий каскад узгоджених мікробіологічних процесів, у межах яких відбувається зміна хімічного складу речовини, її фазовий стан, а також супутні теплові та масообмінні явища. У межах анаеробного середовища мікроорганізми здійснюють трансформацію складних полімерних молекул – білків, полісахаридів і ліпідів – у простіші компоненти, які в подальшому зазнають подальших мікробіологічних змін.

Початковою фазою процесу є гідроліз – етап, який слід розглядати як критичний з точки зору ініціації всього ланцюга перетворень. У ході гідролітичної активності ферментів, таких як амілази, ліпази та протеази, відбувається розщеплення складних органічних сполук до мономерних форм – глюкози, амінокислот, гліцерину та жирних кислот. Особливістю цього етапу є значна залежність його швидкості від фізико-хімічного складу субстрату: чим вища ступінь полімеризації та структурної стабільності вихідної речовини, тим повільніше відбувається гідроліз.

У наступній фазі – ацидогенезі – гідролізовані продукти зазнають ферментативної обробки з утворенням летких жирних кислот (в основному оцтової, пропіонової, масляної), спиртів, аміаку, водню та діоксиду вуглецю. Цей етап є надзвичайно важливим у формуванні хімічного складу проміжних метаболітів, які, у свою чергу, є субстратами для подальших фаз процесу. Ацидогенез характеризується підвищеною чутливістю до коливань рН, що потребує постійного моніторингу і підтримання умов, сприятливих для життєдіяльності відповідних мікроорганізмів.

Подальше біохімічне перетворення – ацетогенез – передбачає конверсію вищезгаданих кислот і спиртів у оцтову кислоту, водень і  $\text{CO}_2$ . Цей етап вважається проміжним, проте він є критично важливим з точки зору забезпечення необхідного субстрату для фінальної стадії – метаногенезу. Варто зазначити, що ацетогенні бактерії належать до категорії облігатних анаеробів і працюють у тісному симбіотичному зв'язку з метаногенними археями, створюючи складну біоценотичну систему з внутрішньою метаболічною залежністю.

Кульмінаційним етапом технологічного процесу є метаногенез – біохімічна стадія, в якій специфічні метаногенні мікроорганізми (археї) перетворюють оцтову кислоту, водень і  $\text{CO}_2$  на метан ( $\text{CH}_4$ ), що є основним енергетичним компонентом біогазу. Саме цей етап є визначальним з точки зору ефективності біогазової установки. Метаногенез є надзвичайно чутливим до змін температурного режиму, концентрації токсичних домішок (наприклад, аміаку, сірководню), а також до коливань рН, що вимагає чіткої координації системи автоматичного керування процесом.

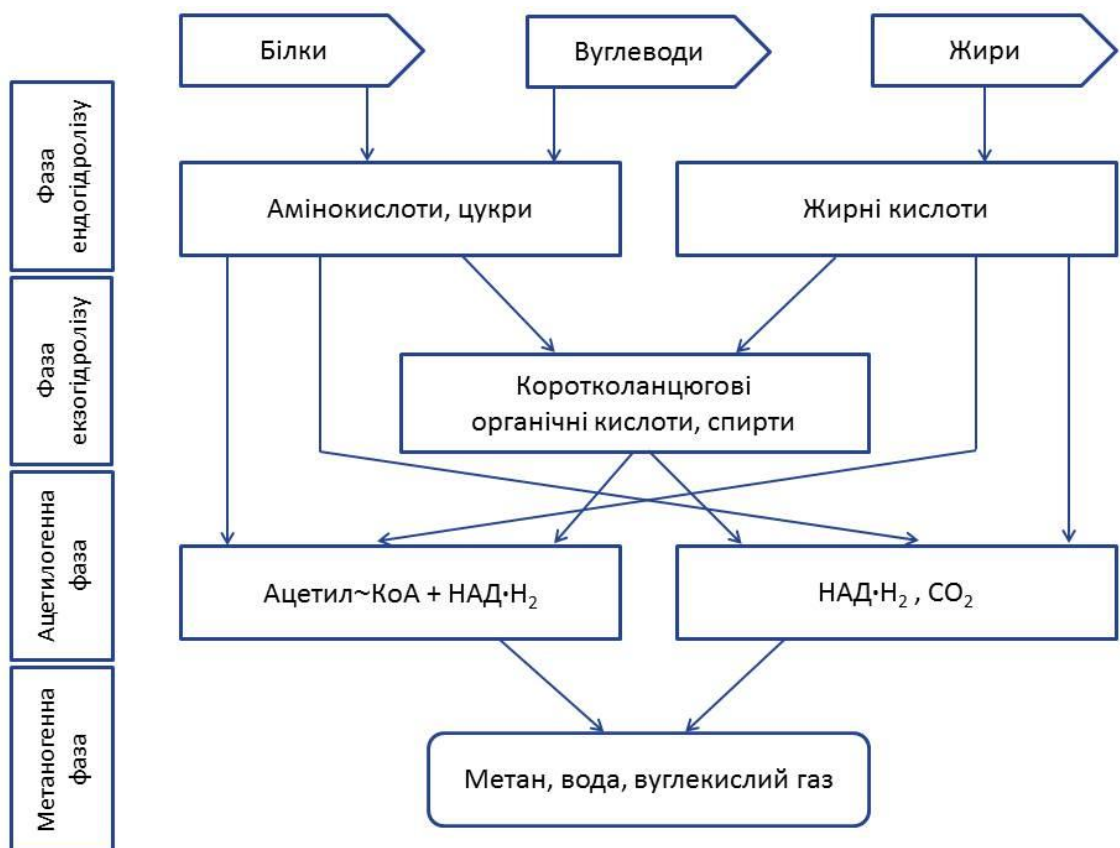


Рис 1.1. Схема фаз утворення біогазу

У сучасній інженерній практиці процес утворення біогазу реалізується у спеціалізованих біореакторах, що можуть мати різну конструкцію: горизонтальні або вертикальні, із системою мішалок або без них, з внутрішніми теплообмінниками або зовнішнім контуром підігріву. Незалежно від конструкції, основним завданням є забезпечення стабільного мікроклімату всередині реактора – зокрема температури, що для мезофільного режиму коливається у межах 35–42°C, а для термофільного – 50–55°C. Саме температурний режим є вирішальним фактором для активності мікробної біоценозу, тому його підтримання є критичним завданням систем автоматичного керування[2].

Усі перелічені фази тісно взаємопов'язані та залежать одна від одної, формуючи єдиний функціональний цикл. Дисбаланс у будь-якій з ланок – наприклад, пригнічення ацетогенезу чи зниження активності метаногенних мікроорганізмів – здатен дестабілізувати весь процес, спричинити накопичення проміжних продуктів і, як наслідок, зниження виходу метану або повне припинення утворення біогазу. Саме тому ключовим інженерним завданням є створення умов, що забезпечують оптимальні параметри перебігу кожної з фаз. Це охоплює температурне зонування біореактора, контроль за співвідношенням вуглецю до азоту, підтримання рН у межах, оптимальних для кожної групи мікроорганізмів, та забезпечення відповідної гідравлічної навантаженості.

## **1.2. Види біогазових установок**

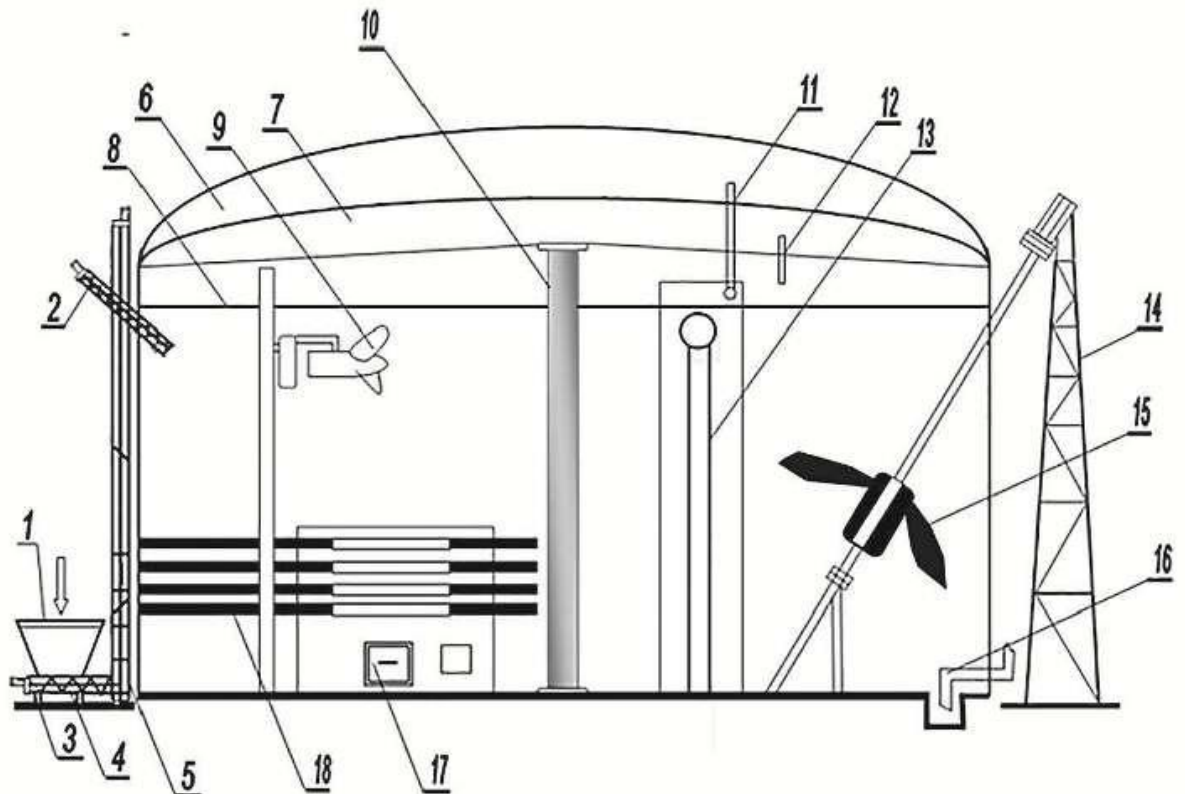
У сучасному контексті розвитку відновлюваної енергетики біогазові установки відіграють ключову роль у перетворенні органічних відходів на енергію. Залежно від технології підготовки та бродіння сировини, біогазові установки поділяються на два основні типи: рідкофазні та твердофазні.

### *Рідкофазні біогазові установки*

Рідкофазні біогазові установки функціонують у середовищі, де вологість субстрату перевищує 85%. Така концентрація води створює умови для існування псевдогомогенного рідинного середовища, в межах якого процеси гідролізу, ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу можуть відбуватися з високою просторовою рівномірністю. Це забезпечується ефективним перемішуванням, яке відіграє ключову роль не лише в збереженні гомогенності, але й у рівномірному розподілі температури та поживних речовин, зменшенні локальних концентрацій токсичних продуктів метаболізму та запобіганні

утворенню застійних зон. У термодинамічному аспекті система рідкофазного збродження характеризується високою стабільністю, що пояснює її поширення в умовах великих сільськогосподарських підприємств, харчової промисловості та очисних споруд.

У рідкофазних реакторах застосовуються як періодичні, так і безперервні режими завантаження, з можливістю використання технології plug-flow або повного перемішування. Як правило, для досягнення оптимальної продуктивності впроваджуються напівперервні режими з постійною подачею субстрату й одночасним виведенням ферментованого осаду. Обсяг рідини, що циркулює в системі, значною мірою визначає теплове навантаження установки, зумовлюючи потребу у застосуванні енергоефективних теплообмінних контурів. Температурне регулювання в таких системах здійснюється за допомогою зовнішніх або вбудованих теплообмінників, а його точність критично впливає на активність мікроорганізмів, особливо в межах термофільного режиму.



1 – бункер для сипкого субстрату; 2 – подавальний гвинтовий транспортер; 3 – вагова платформа; 4 – гвинтовий нижній транспортер; 5 – гвинтовий транспортер, що піднімає; 6 – повітряний купол; 7 – біогазовий купол; 8 – рівень наповнення; 9 – вертикальна рухома мішалка; 10 – центральна опора; 11 – труба для подачі повітря; 12 – патрубок для біогазу; 13 – труба для подачі рідкого гною; 14 – опора для мішалки; 15 – похила мішалка; 16 – патрубок для відведення біомаси; 17 – система регулювання температури; 18 – система підігріву біомаси.

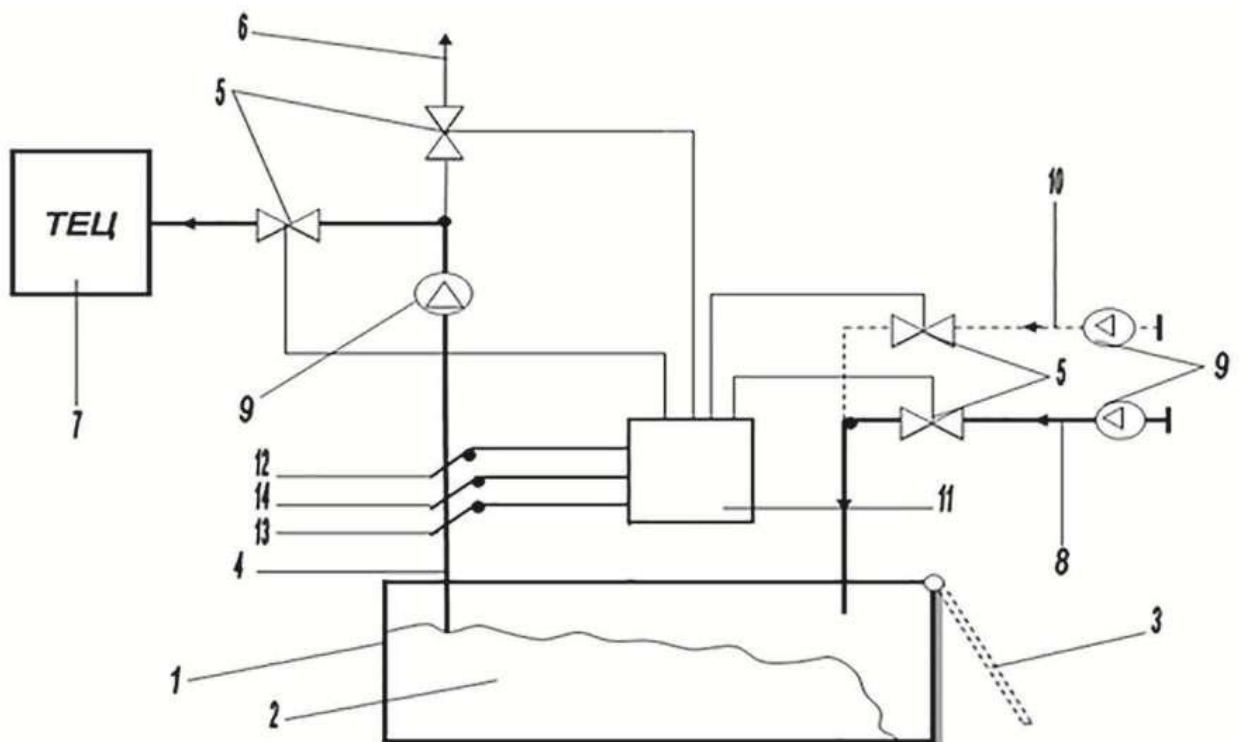
Рис 1.2. Технологічна схема рідкофазної біогазової установки

### *Твердофазні біогазові установки*

Що стосується твердофазних установок, то вони розроблені для роботи з субстратами, вологість яких коливається в межах 55–80%. Такий технологічний режим суттєво змінює фізико-хімічну природу процесу, переводячи його з рідинно-динамічного середовища у стан щільного або напівщільного компосту, в якому перемішування або відсутнє, або здійснюється періодично. У біоінженерному контексті це означає, що масообмінні процеси набувають градієнтного характеру, і розподіл параметрів, таких як температура, вологість, концентрація субстрату та продуктів метаболізму, є нерівномірним як у

просторі, так і в часі. Це вимагає принципово іншого підходу до проектування системи, де пріоритет надається дренажу, аерації (для факультативних етапів), локалізованому зрошенню та утилізації фільтрату.

У твердофазних установках особливу роль відіграє структура субстрату – щільність, пористість, наявність капілярних каналів, які забезпечують дифузію метаболітів та живильних речовин. Оскільки перемішування є обмеженим або відсутнім, забезпечення ефективного анаеробного середовища відбувається шляхом ретельного планування геометрії камери зброджування, у тому числі ухилів поверхонь, каналів відведення біогазу та рециркуляції фільтрату. Останній елемент є надзвичайно важливим для збереження вологості й тепла в масі субстрату, що, своєю чергою, підтримує активність мікробіоти. Таким чином, у твердофазних установках функції перемішування та гомогенізації фактично замінюються інженерними рішеннями щодо оптимізації пасивного масообміну[3].



1 – ферментер; 2 – біомаса; 3 – завантажувально-розвантажувальний отвір; 4 – вихід біогазу; 5 – клапан; 6 – газопровід; 7 – блок ТЕЦ; 8 – лінія відпрацьованого газу ТЕЦ; 9 – вентилятор; 10 – лінія свіжого повітря; 11 – пульт управління; 12 – датчик метану; 13 – датчик концентрації вуглекислого газу; 14 – датчик для визначення об'ємної витрати біогазу.

Рис 1.3. Технологічна схема твердофазної біогазової установки

З точки зору енергетичної ефективності, твердофазні системи мають нижче питомі витрати на механічну обробку (відсутність мішалок, насосів високої потужності), однак потребують підвищеної уваги до температурного менеджменту, оскільки теплова інерція таких систем значно вища, а швидкість прогріву й охолодження – суттєво нижча, ніж у рідкофазних реакторах. Крім того, продукти ферментації у твердофазних умовах зазвичай містять менше вільної води, що спрощує їх подальшу утилізацію або компостування, проте ускладнює виведення у режимі безперервної роботи.

З технологічної точки зору рідкофазні установки є більш гнучкими до коливань у складі сировини, що дозволяє працювати з широким спектром органічних залишків, включаючи стічні води, гноївку, силосовані культури, харчові відходи тощо. У той час як твердофазні системи зазвичай вимагають більш ретельного відбору сировини з відповідним рівнем вологи та структурною однорідністю. Відтак, твердофазні системи частіше використовуються в умовах централізованих органічних полігонів, де попереднє сортування та підготовка сировини є частиною процесу.

### **1.3. Інформаційний аналіз технологічного об'єкта керування**

Інформаційний аналіз біогазової установки, що працює на буряковому жомі, полягає в дослідженні параметрів технологічного процесу з метою побудови ефективної системи автоматичного керування. Така установка є складним динамічним об'єктом з великою інерційністю, запізненнями та нелінійністю. Основне завдання – визначити ключові змінні, що підлягають контролю, оцінити їхній вплив на стабільність процесу зброджування та сформулювати вимоги до системи керування.

Буряковий жом характеризується високим вмістом вологи (понад 80%) і значною концентрацією органічної речовини. Цей субстрат добре підходить для рідкофазного анаеробного зброджування. На вході до системи важливими є параметри: вологість, температура, концентрація летких органічних речовин, вміст інгібіторів. Сировина повинна проходити стадію змішування з дигестатом для стабілізації мікробного середовища, що вимагає точного дозування й контролю пропорцій.

В реакторі критичним є контроль температури (мезофільний режим 36–40 °C), рН (оптимально 6.8–7.4), рівня летких жирних кислот, а також тиску й складу біогазу. Температурна стабільність забезпечується системою підігріву з автоматичним регулюванням. Склад біогазу (перш за все, концентрація  $\text{CH}_4$ ) дозволяє судити про ефективність ферментації та вимагає постійного моніторингу.

#### 1.4. Розробка функціональної схеми автоматизації процесу утворення біогазу

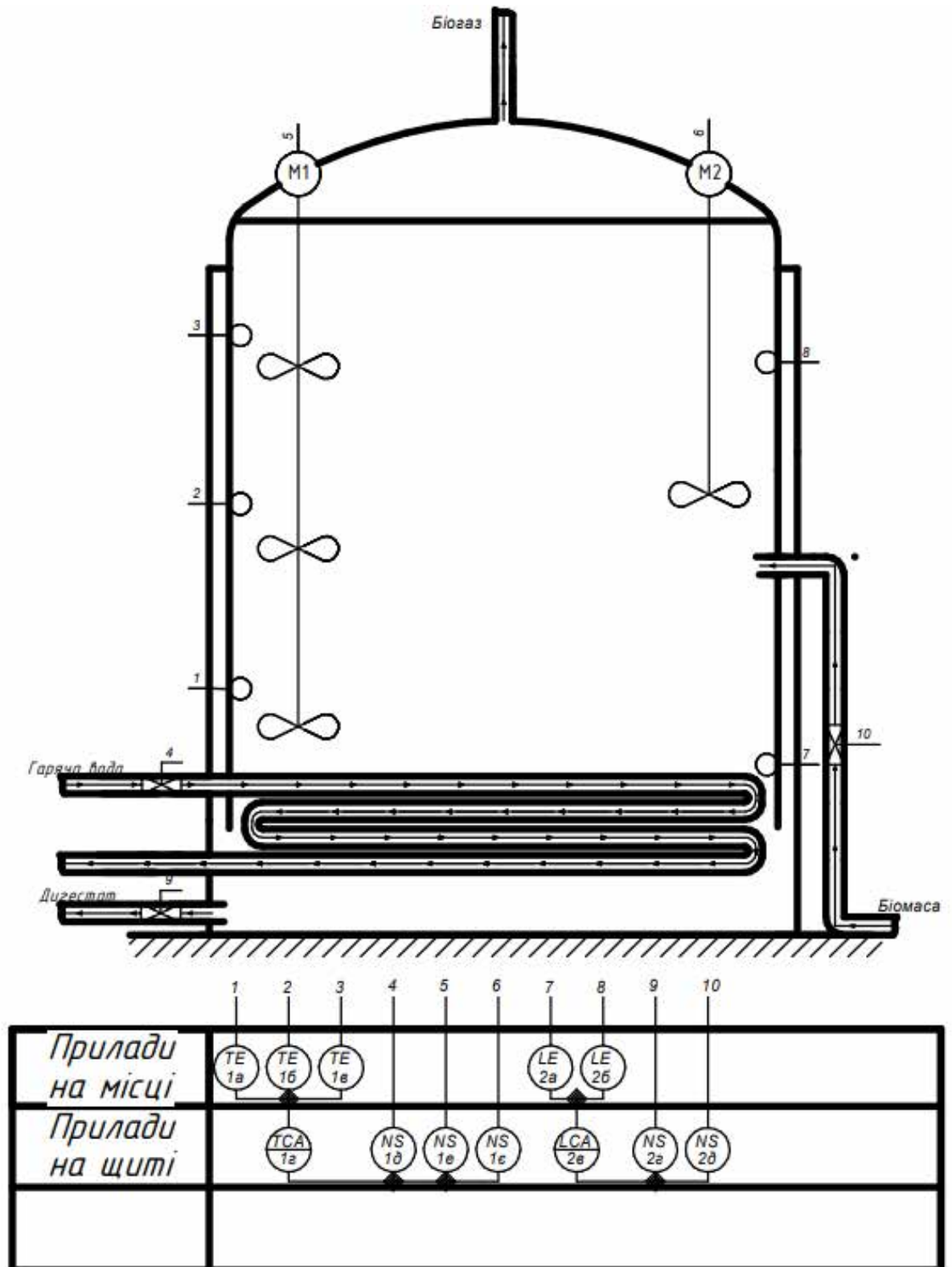


Рис 1.4. фрагмент функціональної схеми автоматизації установки попереднього бродіння

*Розшифровка елементів функціональної схеми автоматизації*

TE(1a) – Датчик температури, розташований у нижній частині ферментера. Призначений для вимірювання температури біомаси в зоні відведення дигестату.

TE(1б) – Датчик температури в середній частині реактора, забезпечує вимірювання температурного поля в зоні активного зброджування.

TE(1в) – Датчик температури у верхній частині реактора, забезпечує контроль температури в зоні скупчення біогазу. Різке підвищення температури на верхньому рівні може бути першою ознакою виходу біогазової установки з положення рівноваги

TCA(1z) – Температурний сигналізатор аварійного стану (мікроконтролер Arduino ,UNO), пов'язаний із TE(1a), TE(1б) та TE(1в). Сигналізує про перевищення допустимого температурного порогу, що є критичним для метаногенних мікроорганізмів

NS(1d) – Електромагнітний пускач клапану, що розміщений на трубі гарячої води

NS(1e; 1e) – Електромагнітний пускач мішалок M1 та M2, що розміщені у верхній частині біореактора. Використовуються для контролю обертання вертикальних мішалок, що забезпечує рівномірний розподіл температури та субстрату по об'єму.

LE(2a) – Датчик рівня біомаси, розташований у нижній частині реактора. Реєструє мінімальний рівень, необхідний для підтримання безперервного процесу ферментації.

LE(2б) – Датчик рівня біомаси у верхній частині реактора. Контролює досягнення максимально допустимого рівня заповнення ферментера.

LCA(2в) – Сигналізатор аварійного рівня біомаси (мікроконтролер Arduino ,UNO), прив'язаний до LE(2a) та LE(2б). Подає сигнал у разі критичного зниження рівня, що свідчить про витік, блокування або порушення процесу завантаження. Також подає сигнал у разі критичного підвищення рівня, що свідчить про надмірне завантаження реактору.

NS(2z) – Електромагнітний пускач клапану, що розміщений на трубі для виведення рідкого дигестату.

NS(2d) – Електромагнітний пускач клапану, що розмішений на трубі для завантаження рідкої біомаси

*Опис логіки функціонування реактора попереднього збродження на прикладі функціональної схеми автоматизації*

Після ввімкнення живлення система переходить у режим підготовки до завантаження. На першому етапі активується електромагнітний пускач NS(2д), що відкриває клапан на трубі подачі рідкої біомаси. Біомаса починає надходити у ферментер до досягнення нижнього контрольного рівня, який реєструється датчиком LE(2а). Якщо рівень не досягає мінімального значення в заданий інтервал часу, LCA(2в) формує сигнал про аварійну ситуацію (наприклад, неповне завантаження або витік).

Коли рівень у реакторі досягає робочої межі, активується пускач NS(1е), що запускає мішалку M1, а також пускач NS(1е) для мішалки M2. Обертання мішалок забезпечує рівномірний розподіл температури та субстрату, що важливо для запуску процесів гідролізу та початкового ацидогенезу.

Паралельно з цим активується електромагнітний пускач NS(1д), який відкриває клапан подачі гарячої води. Це дозволяє подати тепло до системи підігріву реактора. Температурні датчики TE(1а) (нижня зона), TE(1б) (середня зона) та TE(1в) (верхня зона) контролюють розподіл температури по висоті реактора. У разі перевищення температурного порогу на будь-якому рівні, температурний сигналізатор TCA(1г) формує аварійний сигнал, що призводить до зупинки подачі тепла та мішалок для запобігання тепловому навантаженню на мікрофлору.

У процесі ферментації рівень біомаси поступово підвищується. Якщо він досягає верхнього контрольного рівня, що фіксується датчиком LE(2б), система припиняє подачу субстрату – пускач NS(2д) переводить клапан подачі біомаси в закриті положення. Якщо ж рівень перевищує допустиму межу, LCA(2в) знову формує аварійний сигнал, який може включати аварійне скидання або блокування роботи установки.

Після завершення етапу попереднього збродження, система переходить у фазу виведення дигестату. Для цього активується пускач NS(2г), який відкриває клапан на трубопроводі виведення дигестату. Датчики рівня LE(2а) та LE(2б) контролюють зниження рівня середовища. Коли рівень досягає нижнього порогу, подача зупиняється, і цикл може бути повторений.

Увесь процес контролюється з використанням програмованого контролера або мікроконтролера типу Arduino ,UNO, до якого підключені аварійні сигналізатори ТСА(1г) та LCA(2в). Вони виконують функції швидкого реагування на відхилення параметрів і можуть передавати інформацію до SCADA-системи або локальної панелі оператора.

## РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕАКТОРА ПОПЕРЕДНЬОГО БРОДІННЯ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

### 2.1. Розв'язок диференційних рівнянь для створення математичної моделі

Температурний режим біореактора є одним з ключових факторів, що визначає ефективність перебігу процесів анаеробного збродження. Мікроорганізми, задіяні у перетворенні органічної сировини на біогаз, мають вузький діапазон температурної активності, і навіть незначне відхилення температури від оптимальних значень може призвести до пригнічення їх метаболічної активності, зниження швидкості ферментації або повної дестабілізації процесу. З огляду на це, виникає потреба у побудові математичної моделі, яка дозволить точно описати динаміку теплового стану реактора, оцінити вплив зовнішніх і внутрішніх чинників та сформуванати основу для створення системи автоматичного регулювання температури.

Формування математичної моделі базується на урахуванні всіх основних джерел і споживачів тепла в системі. Зокрема, це тепло, що надходить від зовнішньої системи підігріву через теплообмінник; теплообмін між субстратом і теплоносієм усередині реактора; втрати тепла через стінки корпусу у навколишнє середовище. Важливу роль відіграють і внутрішні теплові ефекти, пов'язані з екзотермічними біохімічними реакціями, проте в моделі вони розглядаються як складова загального теплового балансу.

Для формалізації цього процесу обрана структура, в якій температури субстрату та теплоносія розглядаються як динамічні змінні. Виходячи з теплофізичних властивостей середовищ, характеристик обладнання, площі теплообміну та швидкостей потоків, було описано систему рівнянь, що характеризує тепловий стан реактора у часі:

$$\begin{cases} M_c * C_c * \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + C_c * G_c * H \frac{\partial \theta}{\partial x} = \alpha * f * (t - \theta) - K * F * (\theta - t_3), \\ M_t * C_t * \frac{\partial t}{\partial \tau} + C_t * G_t * H \frac{\partial t}{\partial x} = a * f * (t - \theta), \end{cases} \quad (2.1)$$

Де:

$\theta, t, t_3$  – температура субстрату, теплоносія і зовнішнього середовища, °С,  
 $M_c, M_t$  – маси субстрату та теплоносія в теплообміннику, кг,  
 $C_c, C_t$  – питома теплоємність субстрату і теплоносія,  
 $G_c$  – пропускна здатність реактора, кг/с,  
 $G_t$  – теплові витрати теплоносія, кг/с,  
 $f, F$  – поверхня теплообміну теплообмінника і корпусу, м<sup>2</sup>,  
 $\alpha, K$  – коефіцієнт тепловіддачі від носія до субстрату і коефіцієнт теплопередачі через стінку корпусу.

Оскільки для стабілізації регульованих параметрів температури теплоносія і субстрату використовують їхні вихідні значення ( $t_2, \theta_2$ ), то приймаємо мінімальне значення зміни температури  $t, \theta$  в напрямку руху, тобто

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \cong \frac{\Delta \theta}{\Delta x} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{H}; \quad \frac{\partial t}{\partial x} \cong \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{t_2 - t_1}{H} \quad (2.2)$$

В такому випадку систему (2.1) можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} M_c * C_c * \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = C_c * G_c * (\theta_1 - \theta_2) + Kt * Ft * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) - Kk * Fk * (\bar{\theta}_c - t_3) \\ M_t * C_t * \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = C_t * G_t * (t_1 - t_2) - Kt * Ft * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c), \end{cases} \quad (2.3)$$

Де:

$M_c, G_c$  – маса субстрату і пропускна здатність реактора відповідно кг, кг/с відповідно;

$M_t, G_t$  – маса теплоносія в теплообміннику і його витрати кг, кг/с,

$C_c, C_t$  – питома теплоємність субстрату і теплоносія,

$Kt, Kk$  – коефіцієнт теплопередачі теплообмінника і корпусу Вт/м<sup>2</sup>\*°С,

$Ft, Fk$  – поверхня теплообміну теплообмінника і корпусу, м<sup>2</sup>,

$t_1, \theta_1$  – температура теплоносія і субстрату на вході °С,

$t_2, \theta_2$  – температура теплоносія і субстрату на виході °С,

$t_3$  – температура зовнішнього середовища °С,

$$\bar{t}_T = 0,5 * t_1 + 0,5 * t_2;$$

$$\bar{\theta}_c = 0,5 * \theta_1 + 0,5 * \theta_2 - \text{середні значення температур } ^\circ\text{C [4].}$$

**Знайдемо розв'язки для диференційних рівнянь системи (2.3):**

*Виконаємо математичні перетворення для  $\theta_2$*

$$M_c * C_c * \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = C_c * G_c * (\theta_1 - \theta_2) + K_t * F_t * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) - K_k * F_k * (\bar{\theta}_c - t_3) \quad (2.4)$$

Поділимо рівняння (2.4) на  $M_c * C_c$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = \frac{C_c * G_c}{M_c * C_c} * (\theta_1 - \theta_2) + \frac{K_t * F_t}{M_c * C_c} * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) - \frac{K_k * F_k}{M_c * C_c} * (\bar{\theta}_c - t_3) \quad (2.5)$$

Скоротимо  $C_c$  у першому доданку рівняння (2.5)

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = \frac{G_c}{M_c} * (\theta_1 - \theta_2) + \frac{K_t * F_t}{M_c * C_c} * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) - \frac{K_k * F_k}{M_c * C_c} * (\bar{\theta}_c - t_3) \quad (2.6)$$

Остаточна нормалізована форма рівняння

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = \frac{1}{M_c} \left[ G_c (\theta_1 - \theta_2) + \frac{K_t * F_t}{C_c} * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) - \frac{K_k * F_k}{C_c} * (\bar{\theta}_c - t_3) \right] \quad (2.7)$$

*Виконаємо математичні перетворення для  $t_2$*

$$M_t * C_t * \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = C_t * G_t * (t_1 - t_2) - K_t * F_t * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) \quad (2.8)$$

Поділимо рівняння на  $M_t * C_t$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \frac{C_t * G_t}{M_t * C_t} * (t_1 - t_2) - \frac{K_t * F_t}{M_t * C_t} * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) \quad (2.9)$$

Скоротимо  $C_t$  у першому доданку рівняння (2.9)

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \frac{Gt}{Mt} * (t_1 - t_2) - \frac{Kt*Ft}{Mt*Ct} * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) \quad (2.10)$$

Остаточна нормалізована форма

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \frac{1}{Mt} \left[ Gt * (t_1 - t_2) - \frac{Kt*Ft}{Ct} * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) \right] \quad (2.11)$$

Зібрані рівняння (2.7) та (2.11) в диференційному вигляді

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = \frac{1}{Mc} \left[ Gc(\theta_1 - \theta_2) + \frac{Kt*Ft}{Cc} * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) - \frac{Kk*Fk}{Cc} * (\bar{\theta}_c - t_3) \right] \\ \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \frac{1}{Mt} \left[ Gt * (t_1 - t_2) - \frac{Kt*Ft}{Ct} * (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) \right] \end{cases} \quad (2.12)$$

## 2.2. Побудова імітаційної моделі в середовищі MATLAB SIMULINK

Для візуалізації та подальшого аналізу динаміки температурного режиму біореактора розроблену математичну модель реалізовано в середовищі MATLAB Simulink. Використання цього середовища дає можливість відтворити поведінку об'єкта у реальному часі, перевірити реакцію системи на збурення, зміну вхідних параметрів та оцінити вплив кожного із факторів теплового обміну. Імітаційна модель побудована на основі системи рівнянь (2.12), яка описує зміну температури субстрату та теплоносія, і слугує базою для синтезу системи автоматичного регулювання.

## Зобразимо імітаційну модель в системі MATLAB

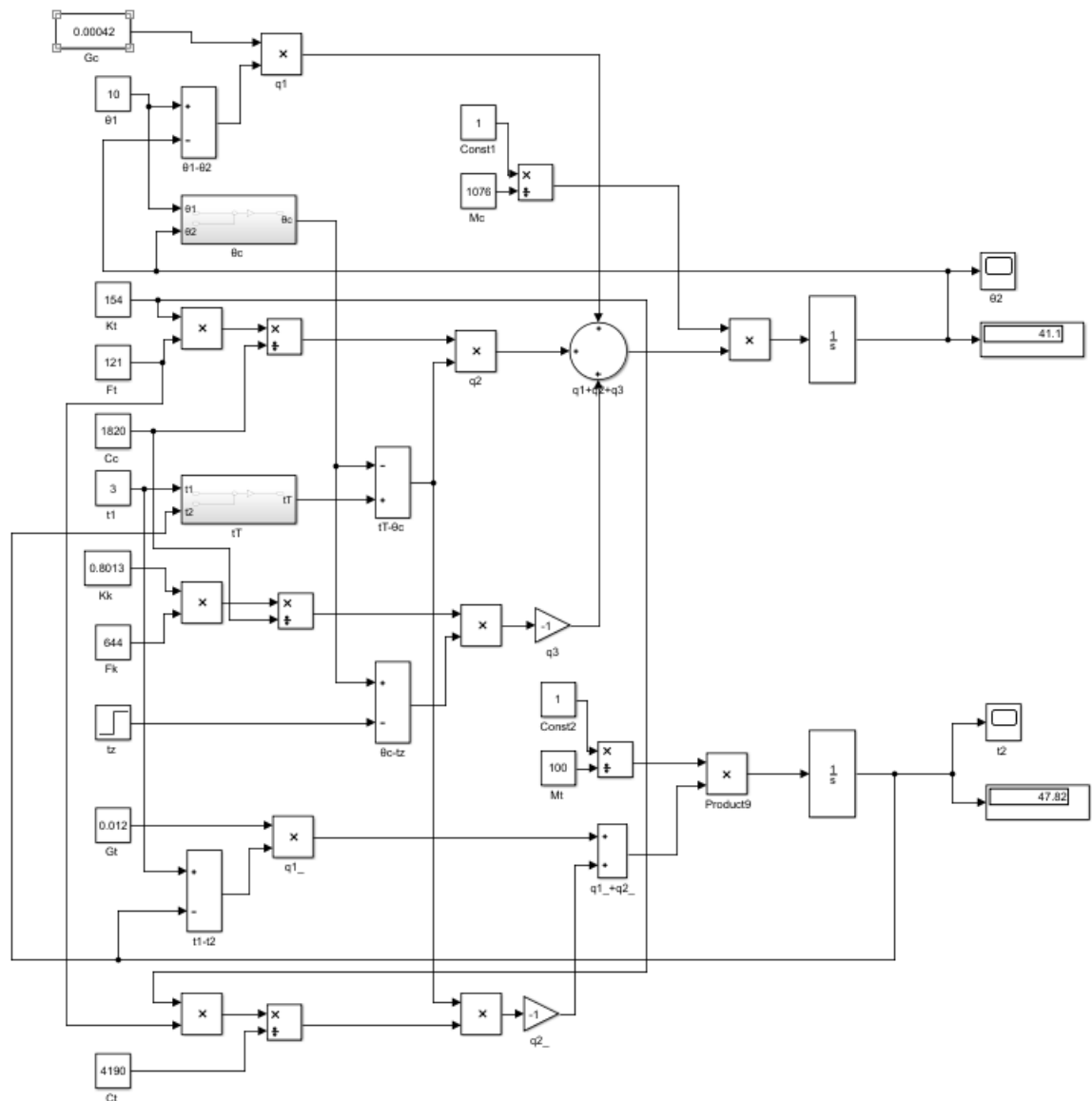


Рис 2.1. Імітаційна модель зміни температурного режиму в БГУ в системі MATLAB SIMULINK

Під час побудови імітаційної моделі температурного режиму біореактора в середовищі MATLAB Simulink основну увагу було зосереджено на дослідженні поведінки об'єкта при різних входніх впливах. З цією метою модель було доповнено блоками візуалізації, зокрема засобами Scope, що дає змогу в реальному часі спостерігати за зміною ключових параметрів системи. Особливий інтерес становить динаміка температури субстрату, оскільки саме цей параметр найбільш чутливо реагує на зміну теплового навантаження та визначає ефективність зброджування.

Розглянемо його нижче:

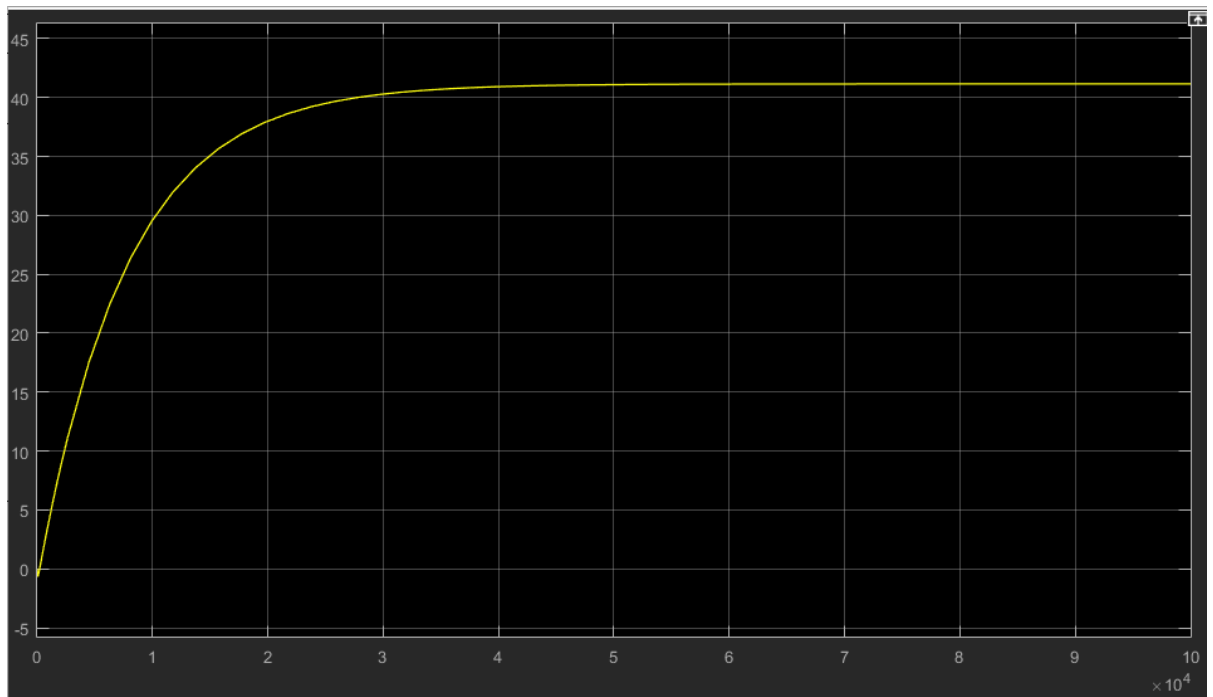


Рис 2.2. Розгінна крива зміни температурного режиму в БГУ за каналом температури

### 2.3. Виведення передатної функції об'єкта керування

Для побудови передатної функції об'єкта буде застосовано графоаналітичний метод, який ґрунтується на апроксимації реакції системи на одиничний вплив.

Такий підхід передбачає попереднє моделювання відкритої системи у середовищі MATLAB Simulink із фіксацією температурної реакції субстрату на одиничний ступінчастий сигнал теплоносія. На основі отриманої кривої буде визначено основні параметри перехідного процесу: час запізнення, сталу складову, а також характерний інтервал часу, за який система досягає 63% від усталеного значення.

Результат побудови передатної функції графоаналітичним методом буде представлено у вигляді аперіодичної ланки першого порядку – класичної форми передатної функції для інерційних об'єктів:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (2.13)$$

Де:

$W(s)$  – передатна функція системи у просторі Лапласа,

$K$  – коефіцієнт підсилення системи (визначається як сталий вихід системи при одиничному вході),

$T$  – постійна часу (визначається як час досягнення 63% від усталеного значення),

$\tau$  – час запізнення (визначається графічно за точкою відхилення вихідної кривої від нульового значення).

На основі розгінної кривої (Рис 2.2.) виведемо передатну функцію об'єкта:

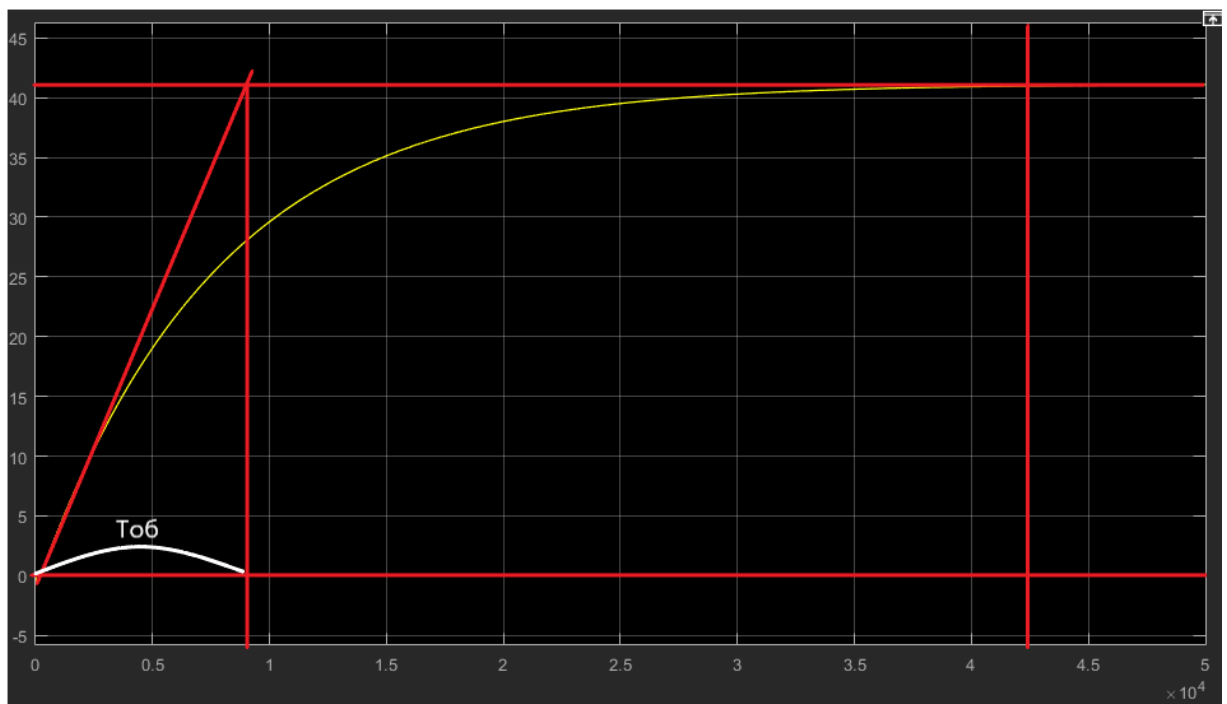


Рис 2.3. Визначення передатної функції зміни температури в БГУ графоаналітичним методом

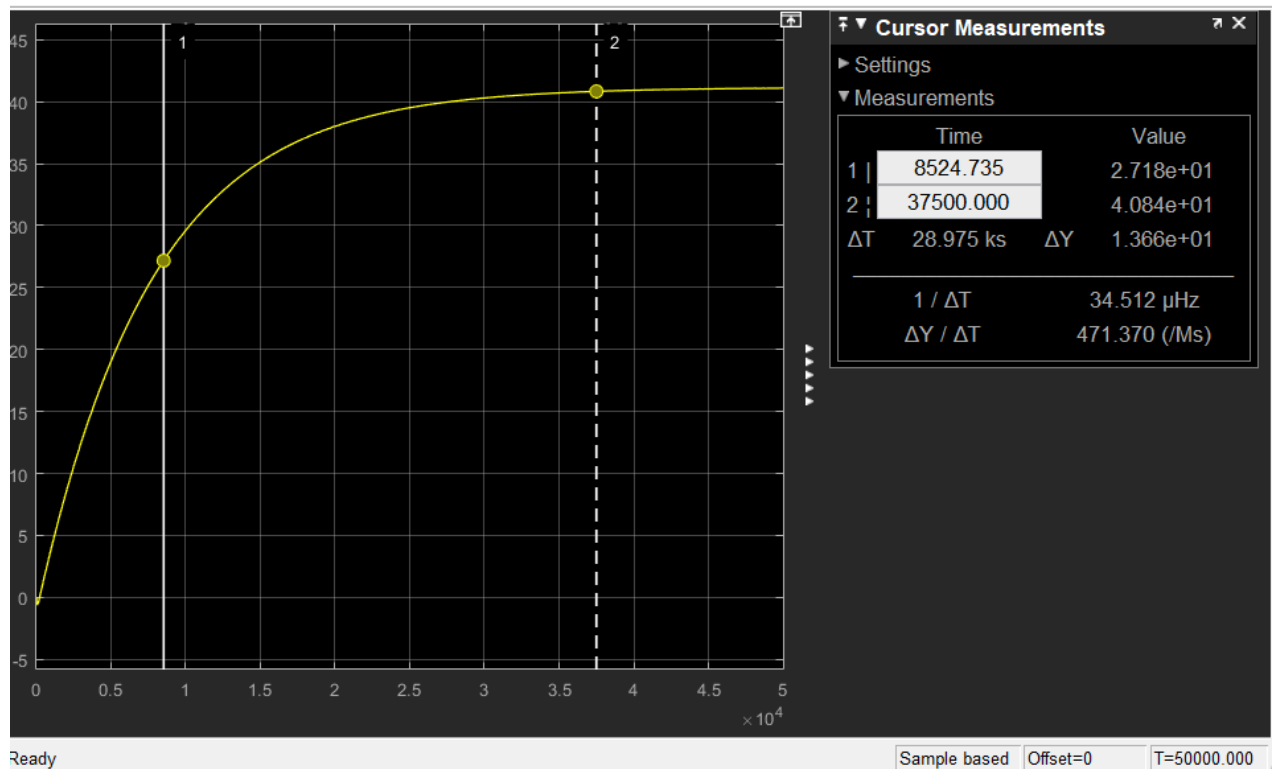


Рис 2.4. Визначення часу перехідного процесу зміни температури в БГУ

На основі отриманих результатів моделювання проведено визначення основних динамічних характеристик об'єкта. Як видно з побудови перехідної характеристики, об'єкт демонструє монотонну аперіодичну реакцію, характерну для інерційних систем першого порядку. Для графічного визначення параметрів використовувались стандартні засоби середовища MATLAB Simulink, зокрема курсори Scope, що дозволили з високою точністю зафіксувати час досягнення 63% від усталеного значення.

У результаті аналізу встановлено, що постійна часу системи становить  $T = (0.8524 * 10^4 \text{ c}) = 8524 \text{ c}$ , а коефіцієнт підсилення  $K = 41.1$ , що відповідає сталому значенню температури субстрату при одиничному впливі.

Таким чином, з урахуванням отриманих даних, передатну функцію біогазової установки можна представити у вигляді аперіодичної ланки першого порядку (2.13):

$$W(s) = \frac{41.1}{8524 * s + 1}$$

## 2.4. Розрахунок періоду квантування цифрової системи автоматичного регулювання

Після виведення передатної функції графоаналітичним методом наступним кроком є визначення критичної частоти, що необхідна для вибору оптимального періоду дискретизації системи при переході до цифрової форми регулювання.

Критичну частоту можна визначити шляхом побудови амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) системи за допомогою функції `bode(W)` в системі MATLAB. Візуалізована характеристика дозволяє ідентифікувати частоту, на якій відбувається максимальний спад амплітуди – саме він визначає верхню межу робочого частотного діапазону системи. На практиці за критичну частоту приймають частоту, що відповідає амплітудному спаду на 3 дБ або близьку до точки зламу АЧХ.

Зобразимо передатну функцію в середовищі MATLAB та визначимо критичну частоту дискретизації

```
>> W = tf(41.1, [8524, 1+41.1])
```

```
W =
```

```
      41.1
-----
8524 s + 42.1
```

```
Continuous-time transfer function.
```

```
>> bode(W)
```

Рис 2.5. Передатна функція в системі MATLAB

Визначимо критичну частоту дискретизації системи автоматичного керування

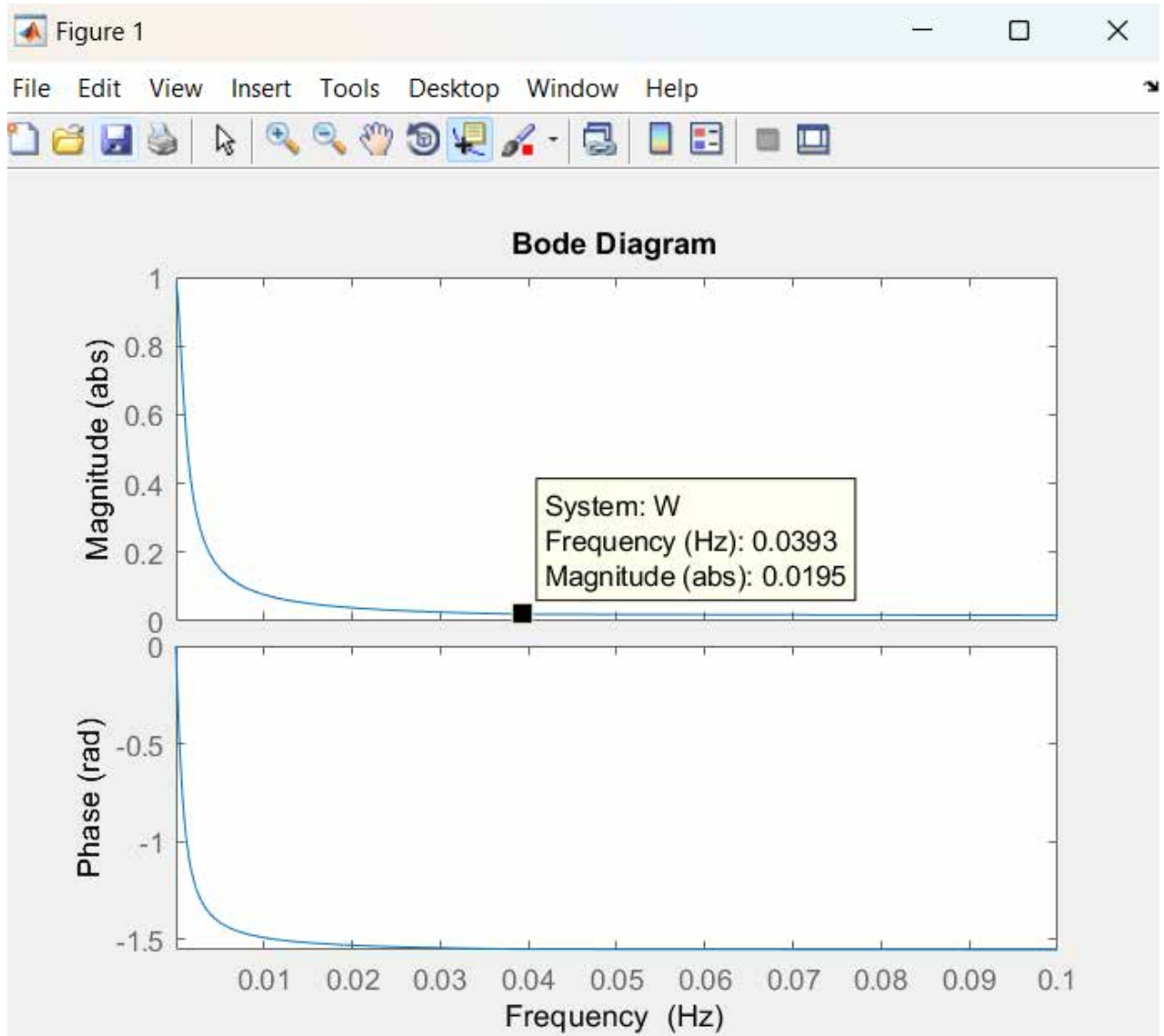


Рис 2.6. Визначення критичної частоти передатної функції системи автоматичного регулювання

На основі визначеної критичної частоти системи  $\omega_c = 0.0393$  рад/с обчислимо період квантування для цифрової системи керування.

Згідно з класичним підходом, період дискретизації визначається як:

$$T_{\text{ц}} = \frac{\pi}{\omega_c} \quad (2.14)$$

Підставивши числове значення, отримаємо:

$$T_c = \frac{\pi}{0.0393} \approx 79.94$$

## 2.5. Розрахунок параметрів ПІ-регулятора

Після визначення критичної частоти системи та відповідного періоду квантування, наступним етапом є розрахунок параметрів регулятора з подальшою його цифровізацією. Почнемо з параметрів для ПІ-регулятора

Задаємо вектор початкових значень для  $T_i$  та будуємо перший годограф АФЧХ розімкнутої системи із регулятором ( $K_p = 1$ ,  $T_i = \tau$ ), та проводимо на графіку пряму, що проходить через центр координат під кутом  $\beta$ .

Вхідні дані

$$W_o(\omega) := \frac{41.1}{8524i\omega + 1} \cdot e^{-0.1i\omega} \quad M := 1.4$$

$$W(\omega, T) := \left( 1 - i \frac{1}{T\omega} + i0.5T\omega \right) \cdot W_o(\omega) \quad y(x) := \tan\left(\arcsin\left(\frac{1}{M}\right)\right) \cdot x$$

$$T := \begin{pmatrix} 600 \\ 650 \\ 700 \\ 750 \\ 800 \\ 850 \end{pmatrix} \quad x := 0..-100 \quad \omega := 0, 0.0001..4$$

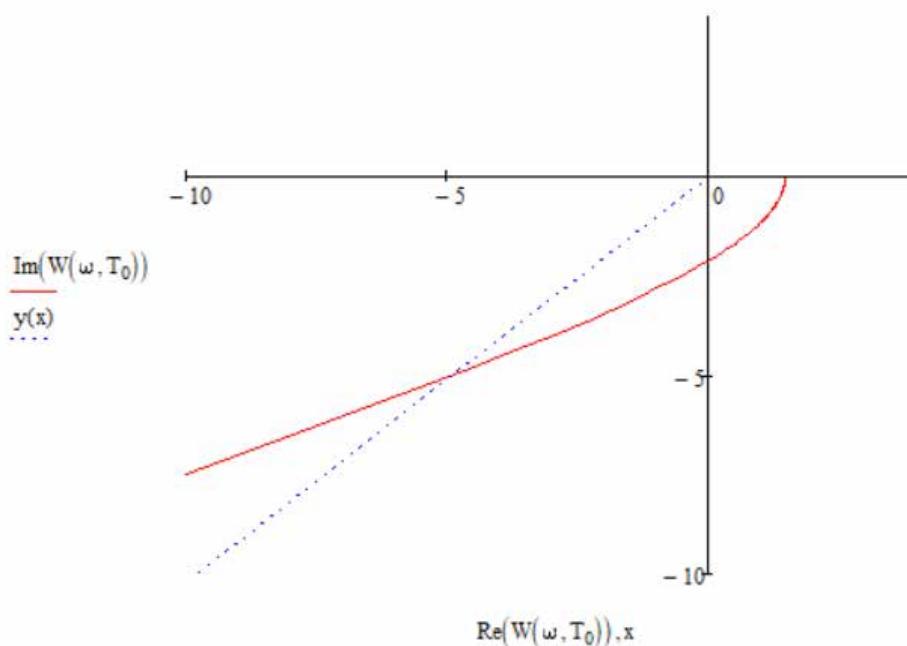


Рис 2.7. Побудова графіку прямої, що проходить через центр координат під кутом  $\beta$

Підбираємо такі параметри кола, щоб воно дотикалося і до прямої, і до годографа, а його центр знаходився на від'ємній дійсній напівосі (Примітка: аби коло у будь-якому випадку дотикалося до прямої, співвідношення між координатами центра та його радіусом мають становити  $X_0 = -M \cdot R$ ).

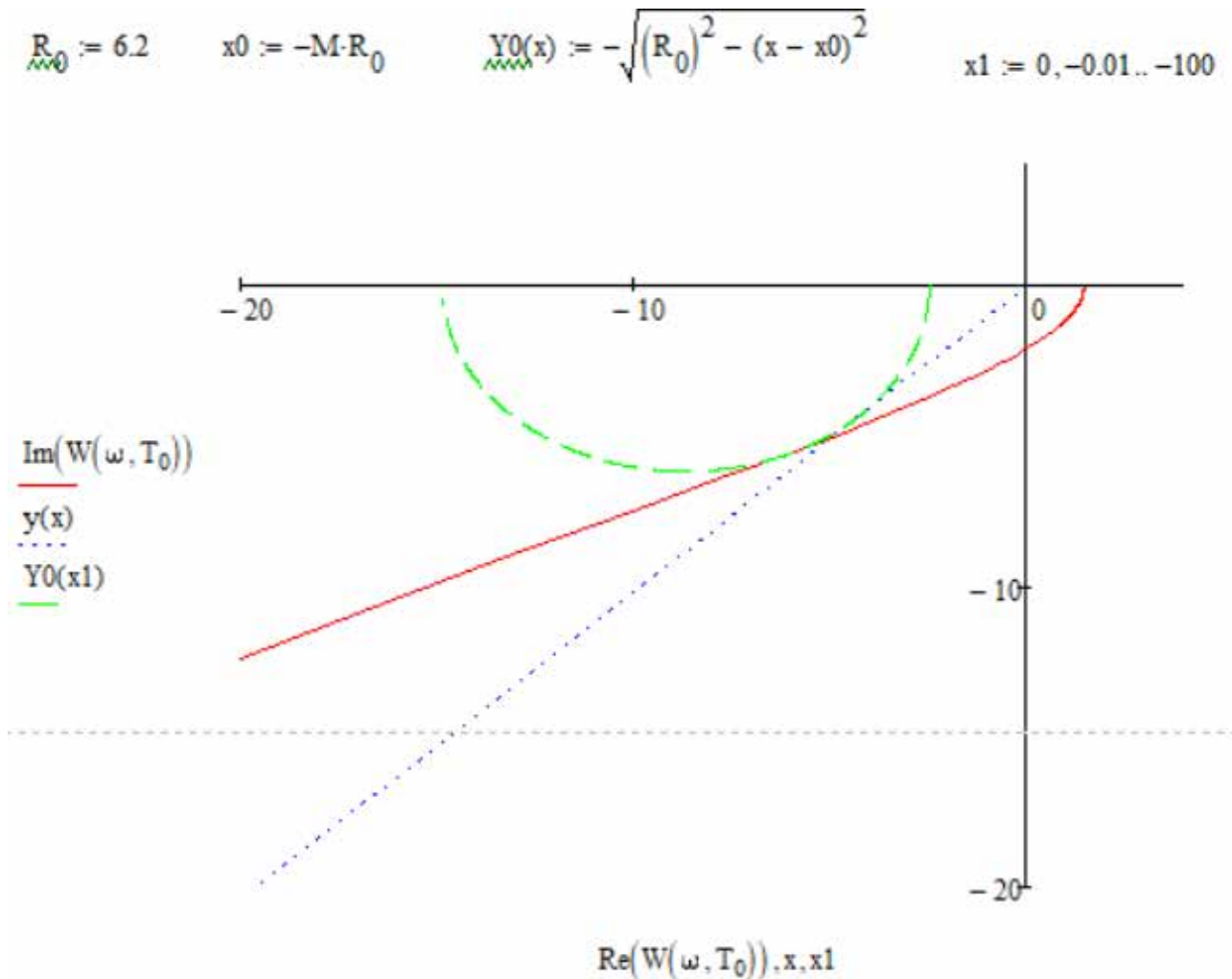


Рис 2.8. Побудова кола, що дотикається до графіку АФЧХ розімкненої системи та прямої

Повторюємо пункти 1 та 2 для всіх шести значень  $T_i$  та формуємо вектор значень радіусів кіл (Примітка: для зручності побудову можна розділити на декілька графіків).

Розрахуємо для всіх значень  $T$

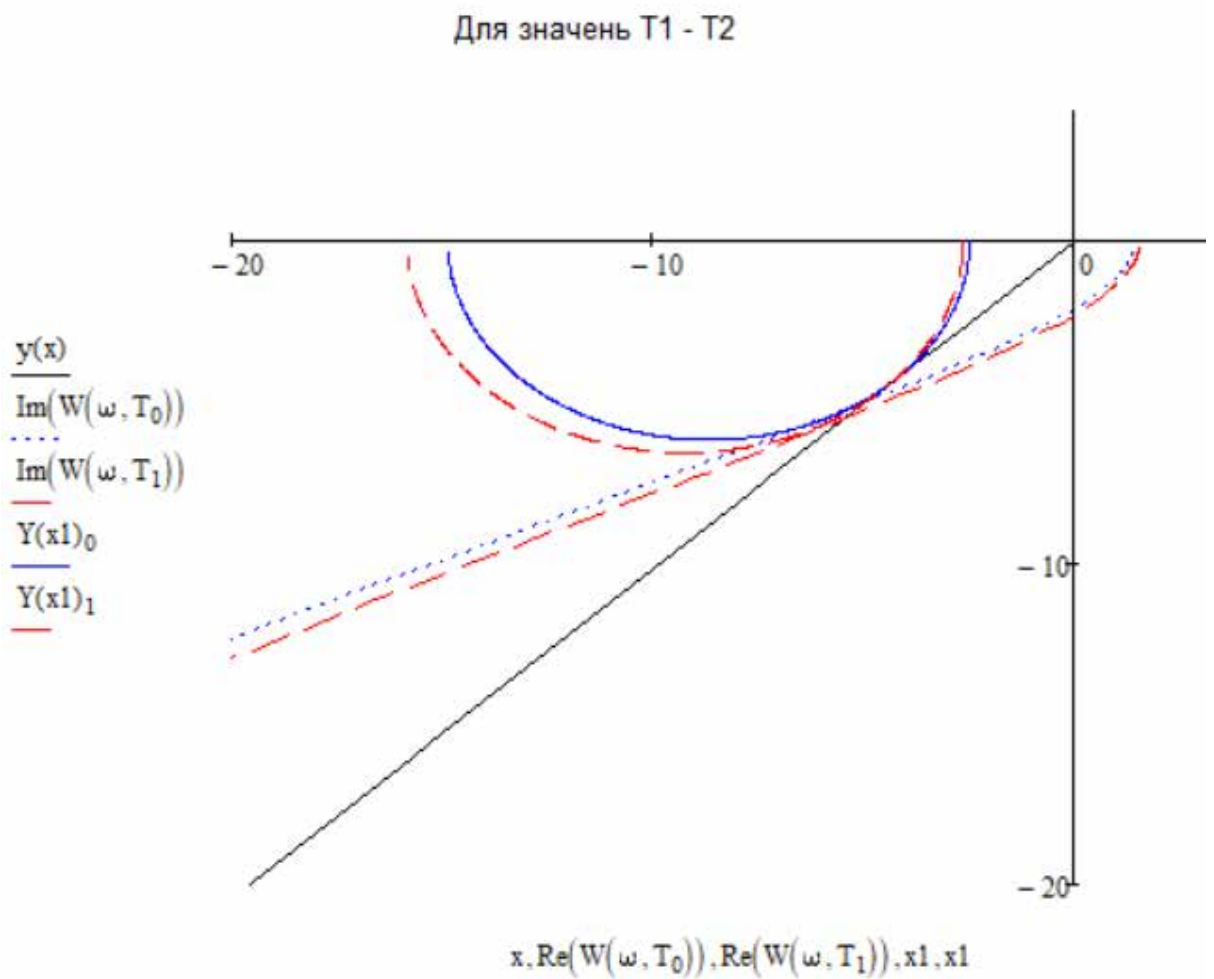
$$T = \begin{pmatrix} 600 \\ 650 \\ 700 \\ 750 \\ 800 \\ 850 \end{pmatrix}$$

$$R := \begin{pmatrix} 6.2 \\ 6.6 \\ 7.6 \\ 8.1 \\ 9.2 \\ 10 \end{pmatrix}$$

$$x0 := \begin{pmatrix} -M \cdot R_0 \\ -M \cdot R_1 \\ -M \cdot R_2 \\ -M \cdot R_3 \\ -M \cdot R_4 \\ -M \cdot R_5 \end{pmatrix}$$

$$Y(x) := \begin{pmatrix} -\sqrt{(R_0)^2 - (x - x0_0)^2} \\ -\sqrt{(R_1)^2 - (x - x0_1)^2} \\ -\sqrt{(R_2)^2 - (x - x0_2)^2} \\ -\sqrt{(R_3)^2 - (x - x0_3)^2} \\ -\sqrt{(R_4)^2 - (x - x0_4)^2} \\ -\sqrt{(R_5)^2 - (x - x0_5)^2} \end{pmatrix}$$

$$x1 := 0, -0.01 \dots -100$$

Рис 2.9. Розрахуємо радіуси кіл для всіх значень  $T$ Рис 2.10. Побудова кіл, що дотикається до графіку АФЧХ розімкненої системи зі значеннями  $T_1, T_2$  та прямої

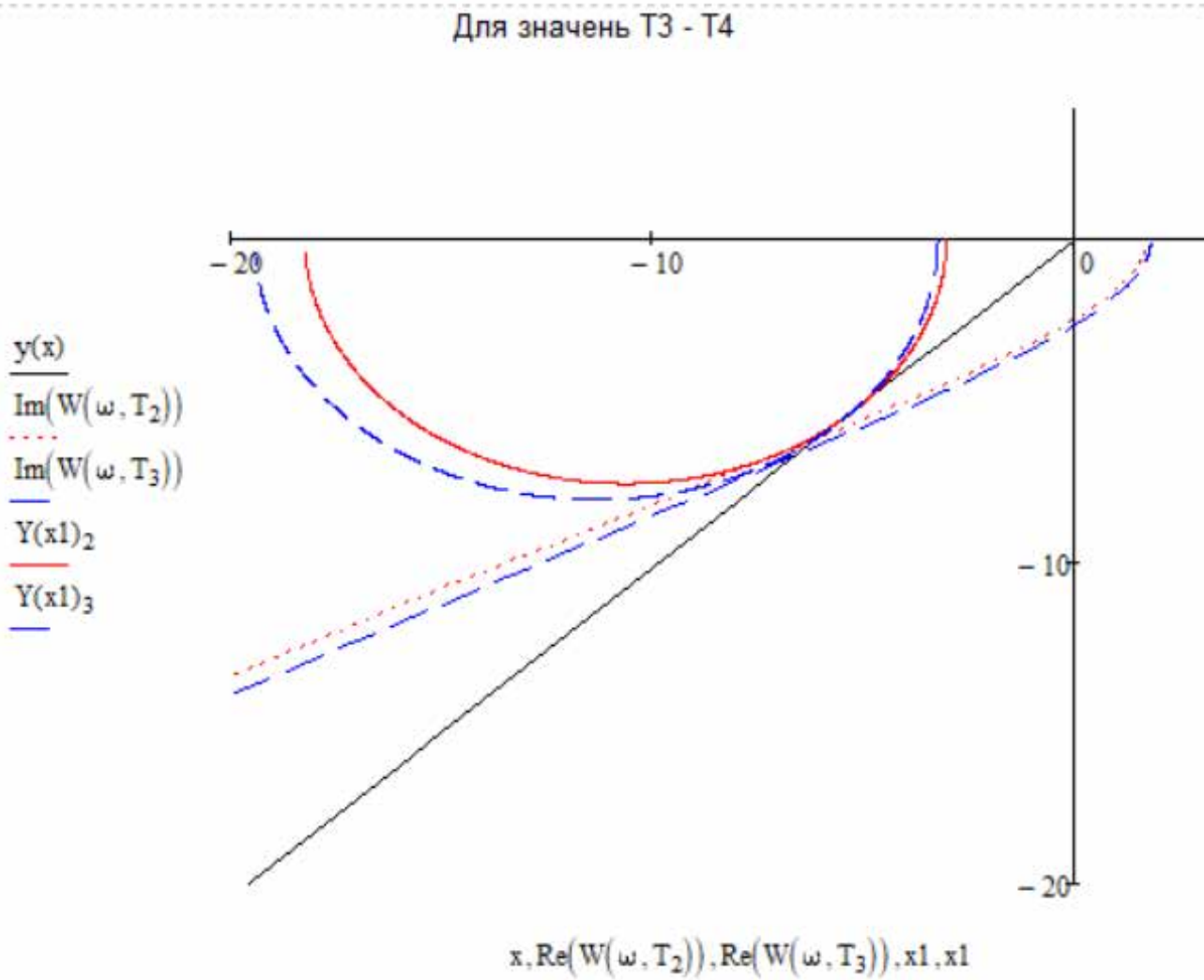


Рис 2.11. Побудова кіл, що дотикається до графіку АФЧХ розімкненої системи зі значеннями  $T_3, T_4$  та прямої

Для значень  $T_5 - T_6$

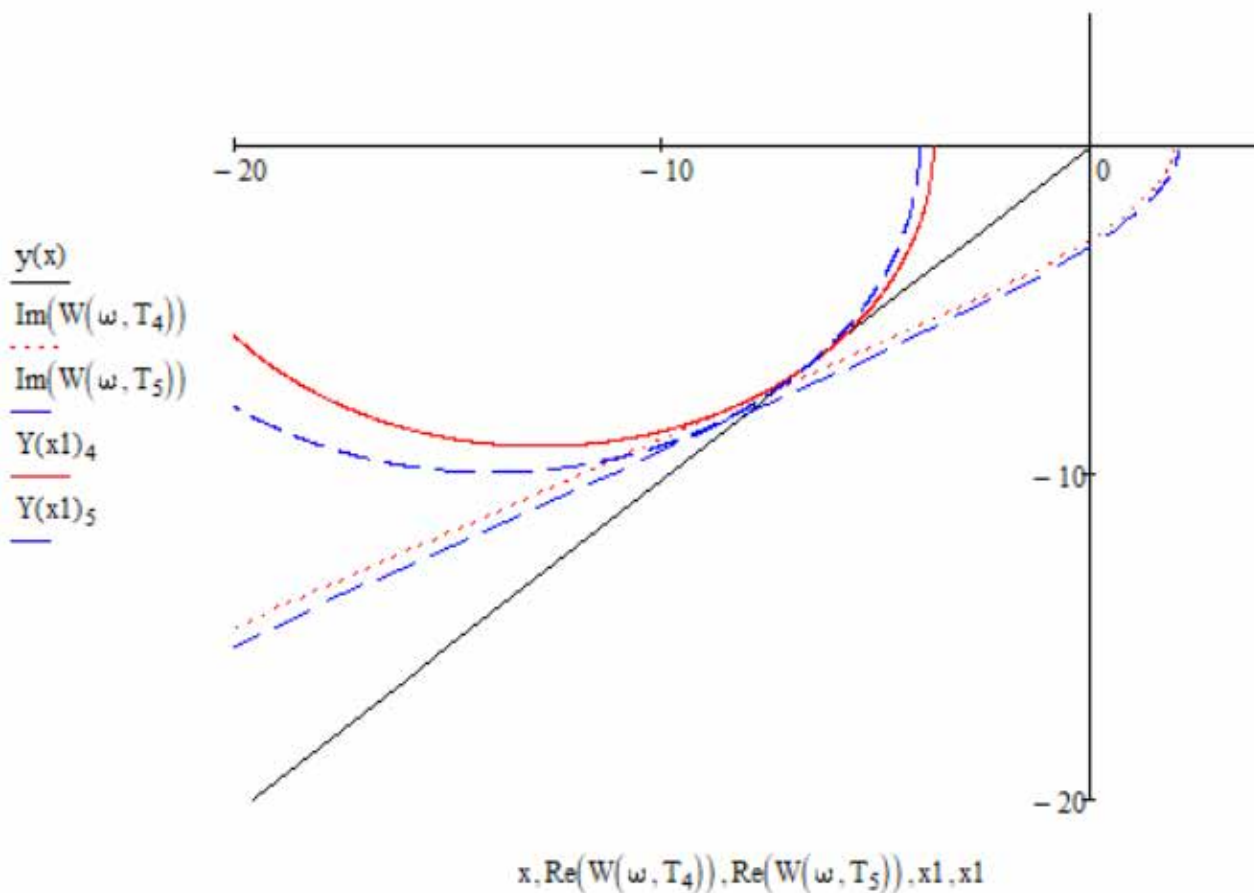


Рис 2.12. Побудова кіл, що дотикається до графіку АФЧХ розімкненої системи зі значеннями  $T_5, T_6$  та прямої

З отриманого вектора радіусів розраховуємо вектор коефіцієнтів передачі  $K_p$ , будуюмо лінію межових співвідношень, до випуклої складової отриманої кривої через центр координат проводимо дотичну. Точка дотику і визначатиме оптимальні параметри налаштування регулятора.

$$K_p := \frac{M}{M^2 - 1} \cdot \frac{1}{R} = \begin{pmatrix} 0.235 \\ 0.221 \\ 0.192 \\ 0.18 \\ 0.159 \\ 0.146 \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} 600 \\ 650 \\ 700 \\ 750 \\ 800 \\ 850 \end{pmatrix} \quad k := 0.00039$$

$$x := 0..1000$$

$$y(x) := k \cdot x$$

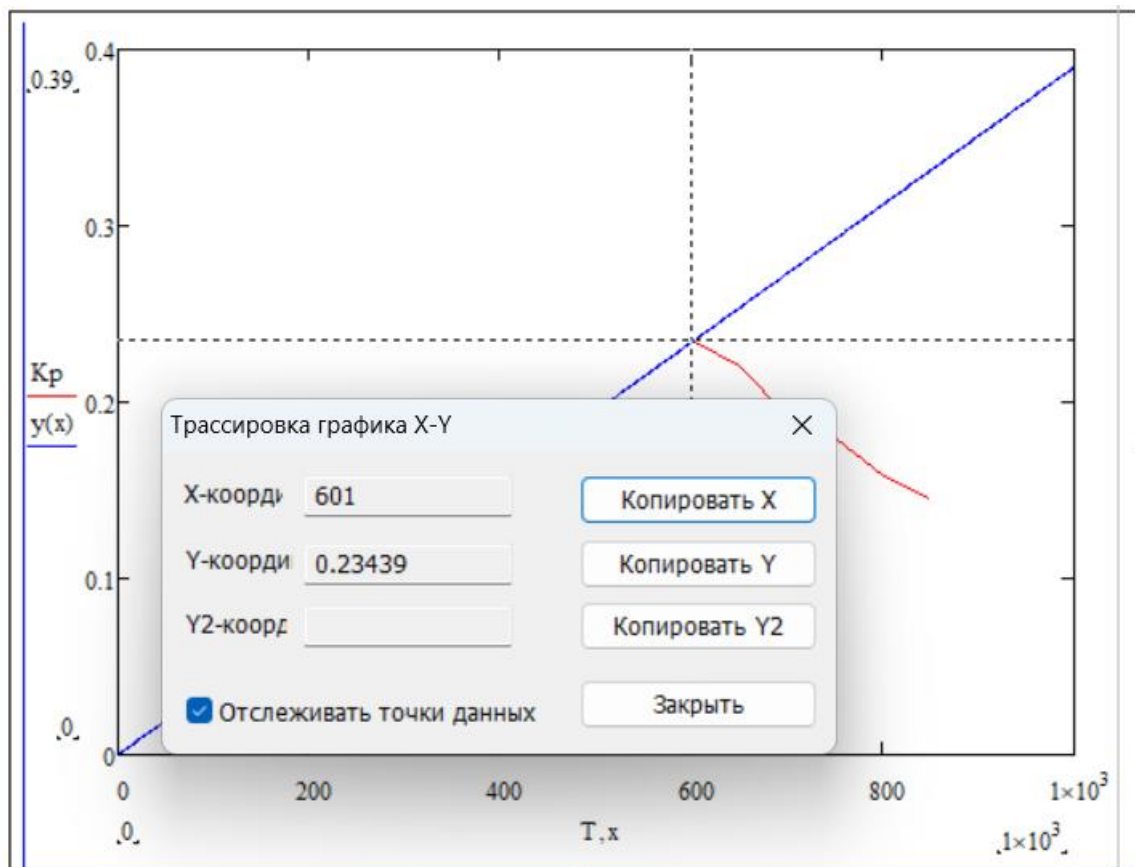


Рис 2.13. Визначення оптимальних параметрів ПІ-регулятора за допомогою графіку межових співвідношень

Будуємо графік перехідного процесу, використовуючи метод Солодовнікова.

$$\begin{aligned}
 T_i &:= 601 & K_p &:= 0.23439 & T_p &:= 0.5 \cdot T_i = 300.5 & + \\
 t &:= 0.100..15000 \\
 W(\omega) &:= K_p \cdot \left( 1 - i \cdot \frac{1}{T_i \cdot \omega} + T_p \cdot i \cdot \omega \right) \cdot \frac{41.1}{8524 \cdot i \cdot \omega + 1} \cdot e^{-0 \cdot i \cdot \omega} \\
 W_{\text{zam}}(\omega) &:= \frac{W(\omega)}{1 + W(\omega)} & 2 \cdot \int_0^1 \operatorname{Re}(W_{\text{zam}}(\omega)) \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\omega} d\omega \\
 \Delta_c &:= |(1 - x(15000)) \cdot 100| = 0.043\% & x(t) &:= \frac{\quad}{\pi}
 \end{aligned}$$

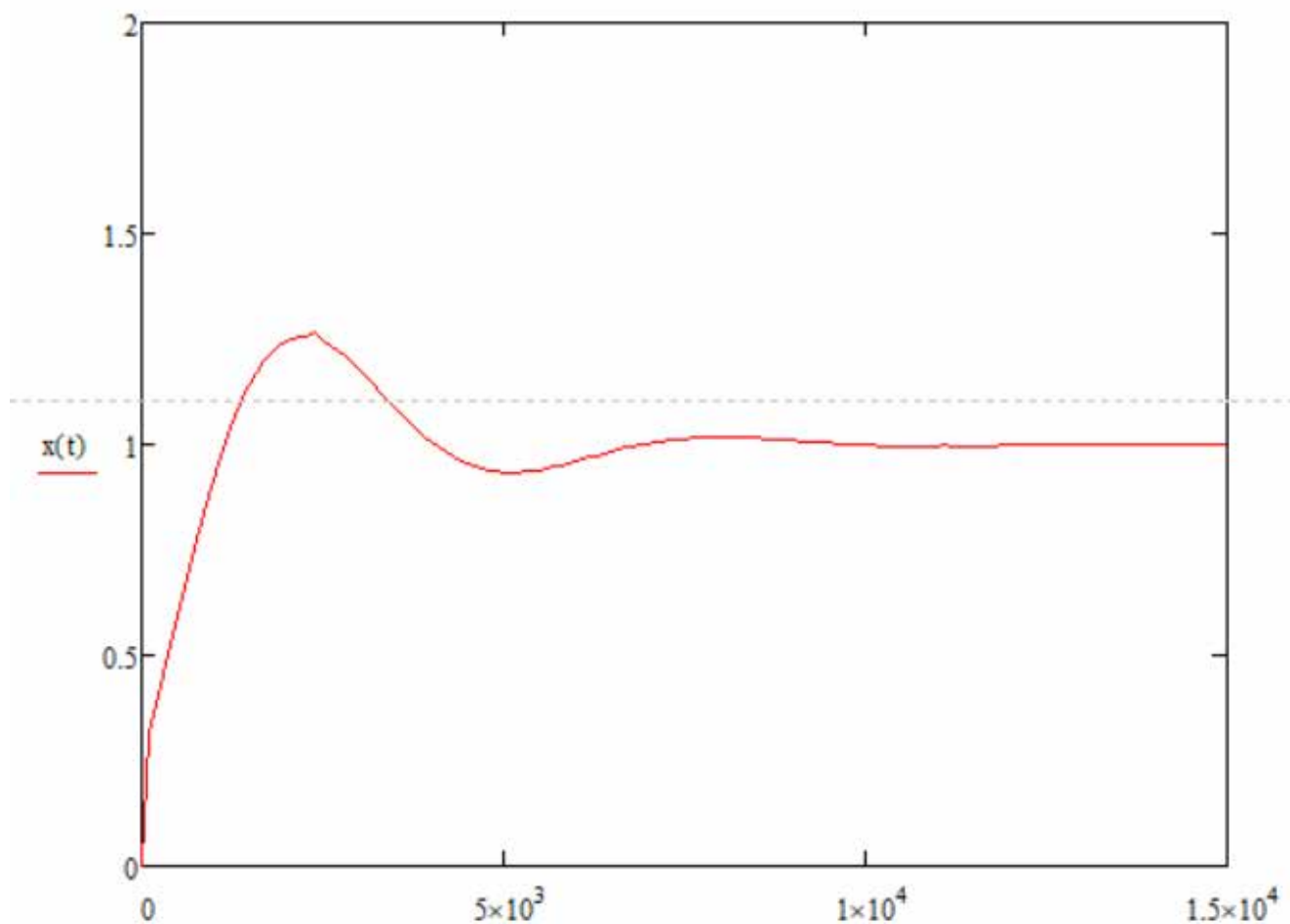


Рис 2.14. Побудова графіку перехідного процесу за допомогою методу Солодовнікова

Коефіцієнт передачі ПІ-регулятора становить  $K_p = 0.23439$ , при цьому статична похибка регулювання становить  $\Delta_c = 0.043\%$ .

Складемо схему в Simulink Matlab:

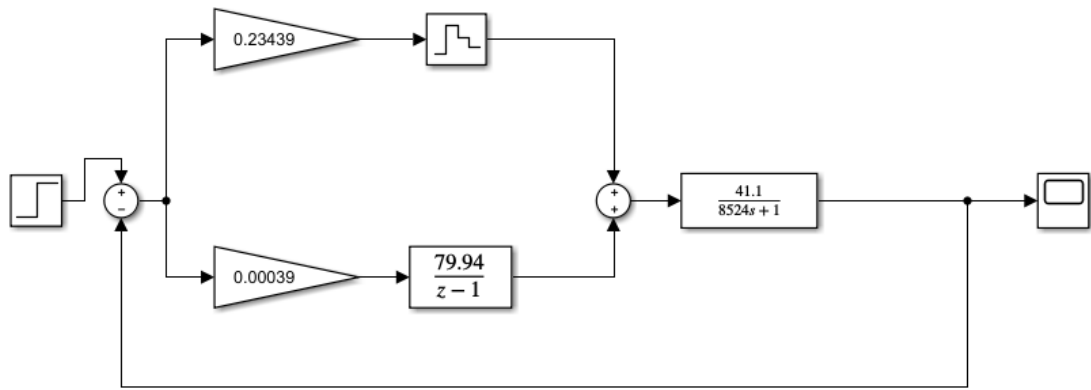


Рис 2.15. Схема ПІ-регулятора з часом дискретизації  $t_d \approx 79.94$  с.

В елементах Gain та Gain1 коефіцієнти передачі та інтегрування розраховуються відповідно за формулами:

$$K_r = K_p, \quad K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

де  $K_p$  та  $T_i$  – параметри налаштування ПІ-регулятора

$$W_{\text{ПІД}}(s) = 0.23439 * \left(1 + \frac{1}{601s}\right)$$

$$K_p = 0.23439, \quad T_i = 601,$$

Відповідно:

$$K_r = 0.23439, \quad K_i = \frac{0.23439}{601} = 0.00039$$

Для переходу до дискретної реалізації інтегратора було використано Z-перетворення, що дозволяє представити неперервний інтегруючий елемент у вигляді дискретної передатної функції. Реалізація здійснюється за допомогою блоку **Discrete Transfer Fcn**, де враховано розрахований період дискретизації  $t_d \approx 79.94$  с.

Виконаємо Z-перетворення І-складової регулятора для  $t_d \approx 79.94$  с

```
>> w1 = tf(1, [1,0])

w1 =

    1
    -
    s

Continuous-time transfer function.

>> c2d(w1, 79.94)

ans =

    79.94
    -----
    z - 1

Sample time: 79.94 seconds
```

Рис 2.16. Зображення Z-перетворення Інтегральної складової ПІ-регулятора для  $t_d \approx 79.94$  с

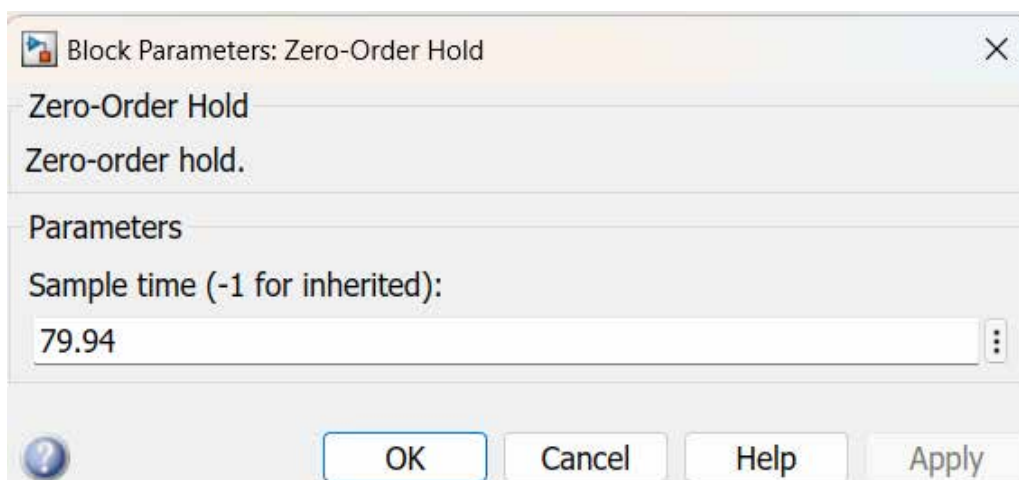


Рис 2.17. Параметри елемента Zero-Order Hold при  $t_d \approx 79.94$  с

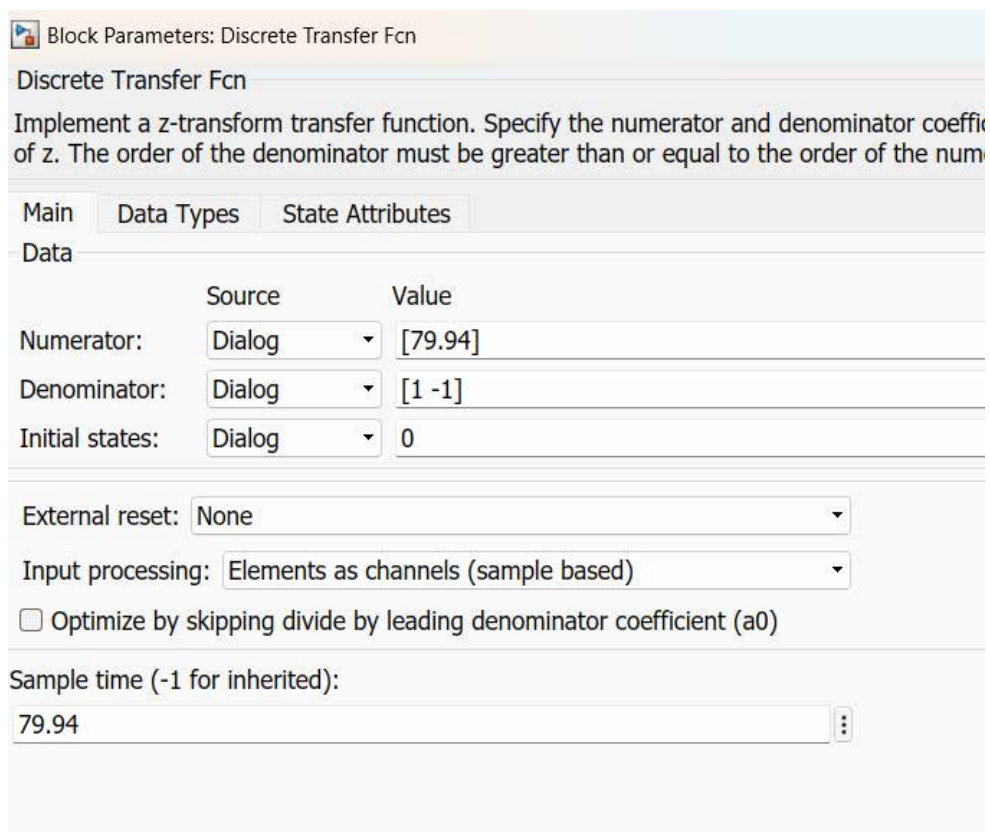


Рис 2.18. Параметри елементу Discrete Transfer Fcn при  $t_d \approx 79.94$  с

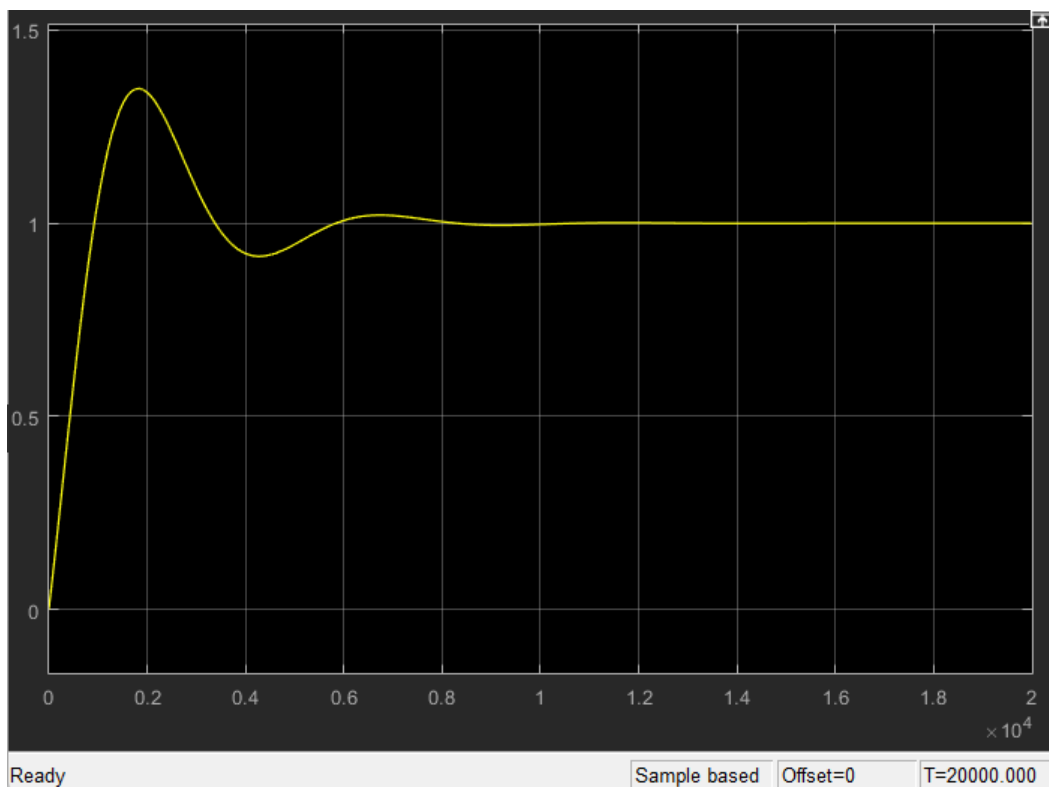


Рис 2.19. Графік перехідного процесу цифрової системи з ПІ-регулятором при  $t_d \approx 79.94$

Оцінимо якість перехідного процесу цифрової системи з ПІ-регулятором при  $t_d \approx 79.94$ :

- Статична похибка  $\delta = \frac{y_{зад} - y_{уст}}{y_{уст}} * 100 = \frac{1-1}{1} * 100 = 0\%$
- Час регулювання  $t_p = 7\,500\text{ с}$
- Перерегулювання  $\sigma = \frac{y_{max} - y_{уст}}{y_{уст}} * 100 = \frac{1.25-1}{1} * 100 = 25\%$
- Коливальність  $n = 3$

На основі оцінки якості перехідного процесу можемо сказати, що налаштування системи є не досконалими, проте знаходяться на високому рівні якості

## РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

### 3.1. Вибір силової частини електричного кола

*Вибір електродвигунів M1 та M2 мішалки біореактора*  
Розрахуємо необхідну потужність мішалки згідно з формулою

$$P = N_p * \rho * N^3 * D^5 \quad (3.1)$$

Де:

$N_p$  – коефіцієнт потужності мішалки, 4 (для якорної мішалки)

$\rho$  – щільність субстрату (кг/м<sup>3</sup>), 1000 (близька до водяної емульсії)

$N$  – кількість обертів (об/с), 0.167 (10 об/хв)

$D$  – діаметр мішалки (м), 6.5 (65% повного об'єму біореактора) [6].

Підставимо значення до (3.1)

$$P = 4 * 1000 * 0.167^3 * 6,5^5 = 216\ 160 \text{ Вт} \approx 216 \text{ кВт}$$

Оберемо 2 приводи АИР 315 S6



Рис 3.1. Зовнішній вигляд двигуна АИР 315 S6

Характеристика	Значення
Потужність	110 кВт
Частота обертання	1000 об/хв
Напруга	380 В
Номінальний струм	207 А [7]

### Вибір автоматичного вимикача QF1

Необхідно обрати автоматичний вимикач, згідно з вимогами:

Характеристика	Значення
Номінальний струм двигунів	414 А
Напруга	380 В
Пускові струми двигунів	4140 А

Оберемо автоматичний вимикач Promfactor FMC5-3U-450А



Рис 3.2. Зовнішній вигляд автоматичного вимикача Promfactor FMC5-3U-450А

Характеристика	Значення
Номінальний струм (In)	450 А
Регулювання уставки розчеплювача КЗ	$8 \times In - 12 \times In$ (3600 – 5400 А)
Номінальна напруга	380/400 В
Крива відключення	D [8]

### Вибір манітних пускачів КМ1 та КМ2

Характеристика	Значення
Номінальний струм АІР 315 S6	207 А
Напруга	380 В

## Оберемо магнітний пускач Promfactor PММ-6 250 220



Рис 3.3. Зовнішній вигляд магнітного пускача Promfactor PММ-6 250 220

Характеристика	Значення
Номінальний струм контактів	250 А
Напруга котушки	220 В
Виконання	3Р
Можливість додаткового оснащення	Блоки контактів, реле [9]

*Вибір автоматичного вимикача QF2 та QF3*

Необхідно обрати автоматичний вимикач, згідно з вимогами:

Характеристика	Значення
Номінальний струм	6 А
Напруга	220 В
Крива відключення	С

Оберемо автоматичний вимикач УЕК ВА47-29 1Р 10А 4,5кА С



Рис 3.4. Зовнішній вигляд автоматичного вимикача УЕК ВА47-29 1Р 10А 4,5кА С

Характеристика	Значення
Номінальна напруга	230 В
Крива відключення	С
Вимикаючий струм	4,5 кА
Номінальний струм	10 А
Кількість полюсів	1р [10]

### 3.2. Вибір керуючої частини електричного кола

*Вибір мікроконтролера Arduino*

Згідно з вимогами системи оберемо мікроконтролер Arduino UNO R3

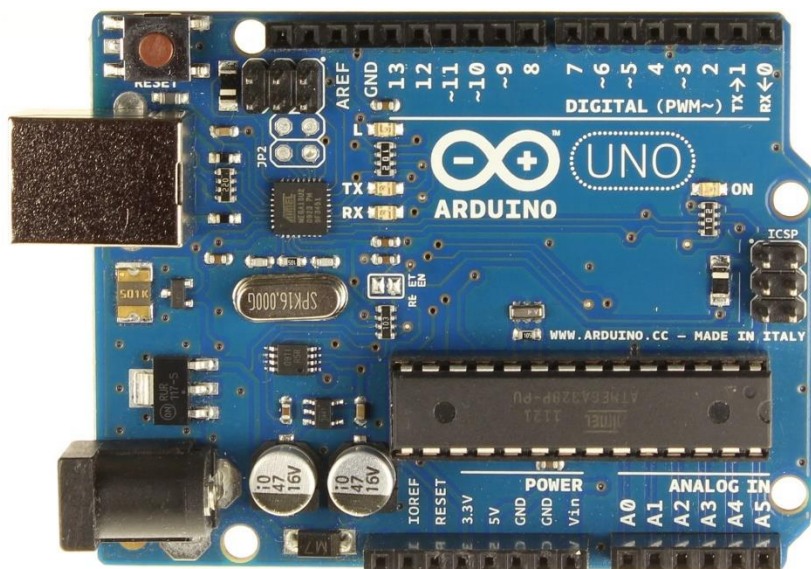


Рис 3.5. Зовнішній вигляд мікроконтролера Arduino UNO R3

Характеристика	Значення
Напруга живлення	7-12 В
Робоча напруга	5 В
Цифрові входи/виходи	14
Аналогові входи/виходи	6
Максимальний струм 1 виводу	40 мА
Flash-пам'ять	32 кБ [11]

*Вибір трансформатора напруги L1 (220/12 В)*

Згідно з вимогами Arduino UNO R3 підберемо блок живлення (трансформатор напруги L1) OEM DC12 24W 2A PL



Рис 3.5. Зовнішній вигляд блока живлення OEM DC12 24W 2A PL

Характеристика	Значення
Сила струму	2 А
Потужність	24 Вт
Вхідна напруга	220 В
Вихідна напруга	12 В [12]

*Вибір трансформатора напруги L2 (220/5 В)*

Згідно з вимогами системи автоматичного регулювання оберемо трансформатор напруги 220/5В





Рис 3.6. Зовнішній вигляд трансформатора напруги 220/5 В

Характеристика	Значення
Сила струму	0.7 А
Потужність	3.5 Вт
Вхідна напруга	220 В
Вихідна напруга	5 В [13]

*Вибір пристрою виведення інформації (LCD2004 I<sup>2</sup>C)*

Згідно з вимогами системи автоматичного регулювання оберемо рідкокристалічний дисплей LCD2004 I<sup>2</sup>C

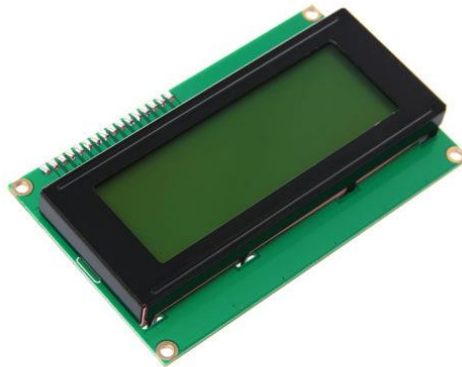


Рис 3.7. Зовнішній вигляд рідкокристалічного дисплею LCD2004 I<sup>2</sup>C

Характеристика	Значення
Кількість символів в рядку	20
Кількість рядків	4
Напруга живлення	5 В [14]

*Вибір пристроїв введення інформації (потенціометр WH148)*

Згідно з вимогами системи автоматичного регулювання оберемо  
потенціометр



Рис 3.8. Зовнішній вигляд потенціометру WH148

Характеристика	Значення
Діапазон опорів	0 – 10 кОм [15]

*Вибір електромагнітного клапану непрямої дії*

Необхідно обрати електромагнітні клапани для подачі води, субстрату та виведення дигестату, згідно з вимогами:

Характеристика	Значення
Прохідний переріз	100 мм
Максимальна температура рідини	80 °С

Оберемо електромагнітний клапан непрямої дії EV220B 100CI FL10 E NC000



Рис 3.9. Зовнішній вигляд електромагнітного клапана EV220B 100CI FL10 E NC000

Характеристика	Значення
Прохідний переріз	100 мм
Номінальна витрата	130 м <sup>3</sup> /год
Температура робочого середовища	-25 ... +90 °С
Клас захисту	IP 67 [16]

*Вибір датників температури RT1 – RT3*

Необхідно обрати датники температури, згідно з вимогами:

Характеристика	Значення
Діапазон вимірюваних температур	+ 10 ... +90°С
Точність вимірювання	± 1°С

Оберемо датник температури DS18B20 у вологозахисному виконанні



Рис 3.10. Зовнішній вигляд датників температури DS18B20

Характеристика	Значення
Діапазон вимірюваних температур	-55 ... +125°C
Точність вимірювання	± 0.5°C
Час отримання даних	750 мс
Споживаний струм при спокої	750 нА
Споживаний струм при запиті	1 мА [17]

#### *Вибір резисторів R1 – R3*

Згідно з вимогами підключення датника температури DS18B20 оберемо резистори R1 – R3



Рис 3.11. Зовнішній вигляд резистора 4.7 кОм

Характеристика	Значення
Опір	4.7 кОм
Потужність	0.25 Вт [18]

*Вибір датників рівня SL1 – SL2*

Необхідно обрати датники температури, згідно з вимогами:

Характеристика	Значення
Діапазон вимірюваних температур	+ 10 ... +90°C
Точність вимірювання	± 1°C

Оберемо датник рівня ДУ-002



Рис 3.12. Зовнішній вигляд датника рівня ДУ-002

Характеристика	Значення
Діапазон вимірюваних температур	0 ... +125°C
Точність вимірювання	± 0.5°C
Робочий тиск	0.8 МПа [19]

*Вибір проміжних реле KV1 – KV5*

Необхідно обрати датники температури, згідно з вимогами:

Характеристика	Значення
Напруга котушки керування	220/230 В
Номінальний струм	4 А



Рис 3.13. Зовнішній вигляд проміжного реле МК2Р (10А 220В АС)

Характеристика	Значення
Напруга котушки керування	220/230 В
Номінальний струм	10 А [20]

*Вибір двопозиційного перемикача SA*

Необхідно обрати 2-позиційний перемикач, згідно з вимогами:

Характеристика	Значення
Номінальний струм	10 А

Оберемо кулачковий перемикач К10А001АСН



Рис 3.14. Зовнішній вигляд кулачкового перемикача К10А001АСН

Характеристика	Значення
Кількість положень	2
Номінальний струм	10 А [21]

### Вибір кнопок SB1-SB12

Оберемо кнопочві модулі АСКО XB2-BA31



Рис 3.15. Зовнішній вигляд кнопки АСКО XB2-BA31

Характеристика	Значення
Номінальний струм	1 А
Наявність фіксації	З самоповерненням [22]

### Вибір світлосигнальної арматури HL1-HL5

Оберемо світлові індикатори AD22-22DS 220V



Рис 3.16. Зовнішній вигляд світлосигнальної арматури AD22-22DS 220V

Характеристика	Значення
Діаметр	22 см
Номінальна напруга	220 В [23]

### 3.3. Вибір кабельно-провідникової продукції

*Вибір провідників для під'єднання двигунів АИР 315 S6 та пускачів РММ-6  
250 220*

Оберемо кабель ВВГнг-LS 3х120+1х50



Рис 3.17. Зовнішній вигляд кабелю ВВГнг-LS 3х120+1х50

*Вибір провідників для під'єднання живлення клапанів та реле*

Оберемо кабель ВВГнг-LS-П 3х1.5



Рис 3.18. Зовнішній вигляд кабелю ВВГнг-LS-П 3х1.5

*Вибір провідників для під'єднання датників, Arduino, дисплеїв, кнопок та світлосигнальної продукції*

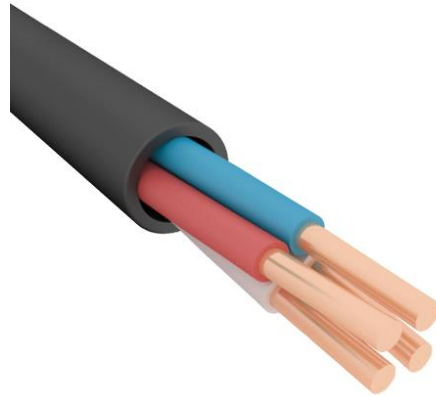


Рис 3.18. Зовнішній вигляд кабелю КВВГнг-LS 3x0.75

Призначення	Тип кабелю	Переріз
Під'єднання двигунів АИР 315 S6 та пускачів РММ-6 250 220	ВВГнг-LS	3x120 мм <sup>2</sup> + 1x50 мм <sup>2</sup> [24]
Під'єднання живлення клапанів та реле	ВВГнг-LS-П	3x1.5 мм <sup>2</sup> [25]
Під'єднання систем керування та індикації	КВВГнг-LS	3x0.75 мм <sup>2</sup> [26]

*Вибір шафи розподільчої*

Оберемо монтажну шафу КМГ-463



Рис 3.19. Зовнішній вигляд шафи розподільчої (600\*400\*300мм)

Характеристика	Значення
Габаритні розміри (В*Ш*Г)	600*400*300мм
Ступінь захисту	IP 54 [27]

### 3.4. Розробка електричної принципової схеми

Розробка електричної принципової схеми виконувалась з урахуванням структури системи автоматизованого керування, побудованої на базі мікроконтролера Arduino UNO. У схемі реалізовано керування виконавчими механізмами через електромагнітні контактори (KM1–KM5), проміжні реле (KV1–KV5), а також вхідні пристрої – кнопкові пости (SB1–SB12), сигнальні лампи (HL1–HL5) та дисплей LCD2004 з інтерфейсом I2C.

Живлення схеми організовано через автоматичний вимикач QF1, що виконує функцію захисту від перевантаження та короткого замикання. Для обмеження живлення трансформаторів низької напруги передбачено додаткові вимикачі QF2 та QF3, які забезпечують селективність захисту та можливість роздільного керування частинами кола.

Кожна кнопка (SB1–SB12) виконує окрему логічну функцію: запуск, зупинку, скидання аварії, ручне перемикання режимів тощо. Сигнали з кнопок подаються безпосередньо на цифрові входи Arduino, обробляються програмно, після чого формується логічне керування силовими реле. Проміжні реле (KV1–KV5), які керуються через транзисторні ключі, забезпечують гальванічну розв'язку та переключення контактів для запуску контакторів KM1–KM5, що безпосередньо живлять навантаження.

Інформація про стан системи виводиться на дисплей LCD2004 I2C, який підключений до Arduino через двопровідну шину SDA/SCL. Додатково передбачено світлову індикацію – сигнальні лампи HL1–HL4, що сигналізують про включення живлення, активність каналів або аварійний стан (Додаток 1).

### 3.5. Розробка схеми електричних з'єднань

Схема електричних з'єднань побудована на основі розробленої електричної принципової схеми, що реалізує логіку керування виконавчими механізмами за допомогою мікроконтролера Arduino UNO. Усі виконавчі елементи – контактори (KM1–KM5), реле (KV1–KV5), сигнальні лампи (HL1–HL5) та кнопкові пости (SB1–SB12) – мають відповідне адресне позначення згідно з ГОСТ 2.702-75 та ГОСТ 2.710-81. Це дозволяє забезпечити однозначність з'єднань і уніфікацію монтажу.

Усі силові кола моторів виконано через контактори, які керуються сигналами з цифрових виходів Arduino через проміжні реле. Такий підхід

дозволяє забезпечити гальванічну розв'язку між логічною частиною керування та виконавчими силовими ланцюгами. Кожне реле керується через транзисторний ключ і живиться від стабілізованого джерела 12 В. Сигнали від кнопкових постів та перемикачів подаються на відповідні входи мікроконтролера і програмно обробляються відповідно до логіки роботи об'єкта.

Окрему увагу приділено реалізації індикації станів роботи – сигнальні лампи HL1–HL4 показують увімкнення обладнання, стан живлення, аварійні умови тощо. Візуалізація реалізована через стандартні світлодіоди, які керуються через цифрові виходи мікроконтролера. На передній панелі щита передбачено місце для дисплея (LCD2004 I<sup>2</sup>C), що забезпечує зчитування поточних параметрів, часу роботи або повідомлень про стан системи (Додаток 2).

### **3.6. Розробка схеми електричних підключень**

Схема електричних з'єднань виконавчих механізмів включає підключення трьохфазних електродвигунів і електромагнітних клапанів до силової та керувальної частини системи автоматизації. Живлення виконавчих пристроїв здійснюється через контактори KM1–KM5, керування якими реалізовано за допомогою проміжних реле KV1–KV5, що з'єднані з цифровими виходами контролера Arduino UNO.

Двигуни підключаються до трифазної мережі змінного струму через відповідні контактори, які забезпечують безпечну комутацію. У колах живлення кожного двигуна передбачено захист від короткого замикання і перевантаження за допомогою автоматичного вимикача QF1, що встановлений на вході щита керування. Для кожного двигуна передбачено індивідуальний контактор (наприклад, KM1 для M1, KM2 для M2 тощо), що дозволяє окремо вмикати або вимикати приводи за командою з мікроконтролера.

Керування електромагнітними клапанами також здійснюється через силову комутацію – з використанням тих самих реле й контакторів. Напряга живлення для котушок клапанів подається тільки у разі активації відповідного виходу контролера Arduino, що унеможливорює їх хибне спрацювання. Таким чином, відкривання та закривання клапанів відбувається лише у чітко визначені програмною логікою моменти часу, відповідно до технологічної послідовності процесу.

Кожен виконавчий механізм (двигун або клапан) підключено відповідно до адресного принципу – усі ланцюги промарковані згідно з функціональним призначенням, що значно спрощує монтаж, перевірку та обслуговування системи. Фізично виконавчі елементи розміщуються на об'єкті, а їх підключення до шафи керування виконується через клемні ряди, де окремо виведено сигнальні та силові лінії (Додаток 3).

### **3.7. Розробка загального виду щита керування**

Щит керування є центральною ланкою системи автоматизації, яка забезпечує оператору можливість локального або віддаленого керування технологічним процесом. Його конструкція визначається виходячи з кількості встановлених апаратів, умов експлуатації, вимог ергономіки та електробезпеки. Загальний вигляд щита формується з урахуванням електричної принципової схеми, схеми електричних з'єднань і компоновки виконавчих пристроїв.

Під час проектування було прийнято рішення розмістити щит у безпосередній близькості до об'єкта керування – для зручного доступу обслуговчого персоналу та мінімізації довжини сигнальних і силових кабелів. Усередині щита передбачено монтаж усіх елементів керування, живлення, індикації, захисту та виконавчих пристроїв. Функціональна компоновка побудована за зональним принципом: окремо виділено ділянки для силових апаратів (контактори, реле, автоматичні вимикачі), слабкострумової частини (контролер, сигнальні лінії, дисплей LCD2004), а також інтерфейсних елементів (кнопки SB1–SB12, лампи HL1–HL4).

Щит розміщено у металевому корпусі із ступенем захисту IP54, що забезпечує надійний захист апаратури від пилу та бризок у промисловому середовищі. Враховуючи температурні умови експлуатації (від +5 до +40 °C) і відсутність агресивного середовища, корпус щита обрано з готової серії – зокрема, рекомендовано використати металевий щит Типу CetinkaYa Рапо (600×800×300) або аналог, відповідно до ГОСТ 36.13-76.

Усередині передбачено монтажну панель з DIN-рейками для встановлення модульного обладнання, клемних рядів для зовнішніх підключень, а також організацію кабельних трас із урахуванням зручності обслуговування. На дверцятах щита встановлюються органи оперативного керування – кнопки, перемикачі, індикатори, дисплей – що забезпечують оператору доступ до основних функцій без відкривання корпусу (Додаток 4).

## РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ

Буряковий жом – побічний продукт цукрового виробництва з вологістю понад 80% – є ефективною сировиною для анаеробного зброджування. За даними агропідприємств, з 1 тонни жому можна отримати до 100 м<sup>3</sup> біогазу, що містить до 60% метану. За сезон цукровий завод генерує понад 2500 тонн жому, що потенційно забезпечує виробництво понад 250 000 м<sup>3</sup> біогазу.

Для оцінки обсягів біогазу, який може бути отриманий із бурякового жому, використаємо узагальнену формулу:

$$V_{\text{пов}} = m_{\text{СОР}} * n_{\text{ЕК}} \quad (4.1)$$

Де:

$V_{\text{пов}}$  – повний обсяг біогазу, м<sup>3</sup>,

$m_{\text{СОР}}$  – маса сухої органічної речовини в сировині, кг,

$n_{\text{ЕК}}$  – специфічний вихід біогазу, м<sup>3</sup>/кг.

Середній вміст сухої речовини в буряковому жомі становить близько 20%, з яких до 85% — це органіка, що зброджується. Для 1 тонни сирого жому отримаємо:

$$m_{\text{СОР}} = m_{\text{жому}} * \omega_{\text{сух}} * \omega_{\text{орг}} \quad (4.2)$$

Де:

$m_{\text{жому}}$  – маса жому, кг,

$\omega_{\text{сух}}$  – частка сухої речовини,

$\omega_{\text{орг}}$  – частка органіки в сухій речовині.

Підставимо дані для розрахунку:

$$m_{\text{СОР}} = 1000 * 0.2 * 0.85 = 170 \text{ кг}$$

Приймаючи типовий вихід біогазу  $n_{\text{ЕК}} = 0.65 \text{ м}^3/\text{кг СОР}$ , маємо

$$V_{\text{пов}} = 170 * 0.65 = 110.5 \text{ м}^3$$

Якщо завод протягом сезону виробляє 2500 тонн жому, то:

$$V_{\text{сезон}} = 110.5 * 2500 = 276\,250 \text{ м}^3$$

Отриманий у результаті зброджування біогаз є сумішшю метану ( $\text{CH}_4$ ) та вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), з невеликою кількістю домішок. Енергетичну цінність визначає саме метан. За умов середнього вмісту метану **60%**, біогаз має теплотворну здатність:

$$q_{\text{БГ}} \approx 21 \text{ МДж/м}^3$$

Визначимо повну кількість енергії, що міститься в сезонному обсязі біогазу:

$$Q = V_{\text{сезон}} * q_{\text{БГ}} \quad (4.3)$$

Підставимо отримані дані:

$$Q = 276\,250 * 21 = 5\,801\,250 \text{ МДж}$$

Переведемо в більш звичні одиниці — кіловат-години:

$$Q = \frac{5\,801\,250}{3,6} = 1\,611\,458 \text{ кВт/год}$$

Для забезпечення стабільного процесу зброджування бурякового жому необхідно підігрівати біомасу до робочої температури, характерної для мезофільного режиму (близько  $39^\circ\text{C}$ ). Розрахунок теплоти, необхідної для підігріву субстрату, виконується за формулою:

$$Q_{\text{під}} = m_c * c_c * (t_{\text{роб}} - t_{\text{вх}}) \quad (4.4)$$

Де:

$m_c = 1076 \text{ кг}$  – маса завантаженого жому,

$c_c = 1820 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} * ^\circ\text{C})}$  [5] – питома теплоємність жому,

$t_{\text{роб}} = 41.1^\circ\text{C}$  – робоча температура,

$t_{\text{вх}} = 10^\circ\text{C}$  – температура завантаженого жому.

Підставивши значення, отримаємо:

$$Q_{\text{під}} = 1076 * 1820 * (41.1 - 10) = 60\,903\,752 \text{ Дж}$$

Або в кіловат-годинах:

$$Q_{\text{під}} = \frac{60\,903\,752}{3.6 * 10^6} \approx 16.91 \text{ кВт}$$

Це — разова витрата тепла на підігрів однієї завантаженої партії бурякового жому. Якщо завантаження відбувається щодня, то добові витрати на підігрів становлять:

$$Q_{\text{добове}} = Q_{\text{під}} = 16.91 \text{ кВт}$$

Місячне споживання:

$$Q_{\text{міс}} = Q_{\text{добове}} * 30 = 16.91 * 30 \approx 507,3 \text{ кВт}$$

Весь обсяг біогазу, що утворюється під час зброджування бурякового жому, умовно поділяється на дві частини:

- частина, яка використовується на власні потреби (переважно на підігрів сировини);
- частина, яка може бути спрямована на виробництво товарної енергії (тепло, електроенергія або продаж як біогаз).

Товарний біогаз визначається як різниця між загальним виходом біогазу  $V_{\text{заг}}$  та його витратами на потреби технології  $V_{\text{втрати}}$ :

$$V_{\text{тов}} = V_{\text{заг}} - V_{\text{втрати}} \quad (4.5)$$

Раніше було розраховано, що загальний обсяг біогазу з 2500 т жому становить:

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{сезон}} = 276\,250 \text{ м}^3$$

З рівняння (4.4) було визначено, що на місячний підігрів необхідно 507.3 кВт·год

Теплотворна здатність біогазу:

$$q_{\text{БГ}} = 6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^3}$$

Отже, місячна потреба в біогазі для підігріву:

$$V_{\text{втрати}} = \frac{507.3}{6} = 84,55 \text{ м}^3/\text{міс}$$

При 12 місяцях роботи:

$$V_{\text{втрати}}^{\text{рік}} = 84,55 \cdot 12 = 1014,6 \text{ м}^3$$

Відповідно:

$$V_{\text{тов}} = 276\,250 - 1014,6 = 275\,235,4 \text{ м}^3$$

Капітальні витрати на впровадження системи автоматизованого керування температурним режимом охоплюють вартість обладнання, матеріалів, проектно-монтажних робіт та налагодження. Складовими витрат виступають: контролер, виконавчі реле, датчики температури, перетворювачі сигналу, кабельно-провідникова продукція, щит керування, а також витрати на програмування та монтаж. Загальна формула розрахунку капіталовкладень має вигляд:

$$K_{\text{заг}} = \sum(C_i \cdot K_i) + Z_{\text{мон}} + Z_{\text{налаг}} + Z_{\text{рез}} \quad (4.6)$$

Де:

$C_i$  – вартість одиниці  $i$ -го елемента;

$K_i$  – кількість одиниць;

$Z_{\text{мон}}$  – витрати на монтаж;

$Z_{\text{налаг}}$  – витрати на налагодження;

$Z_{\text{рез}}$  – резерв на непередбачувані витрати

На основі комерційних пропозицій і ринкових цін (наприклад, Prom.ua), загальні витрати наведено в таблиці:

Найменування	Кількість	Ціна, грн	Вартість, грн
Двигун АИР 315 S6	2	167 194	334 388
Автоматичний вимикач Promfactor FMC5-3U-450A	1	10 362,60	10 362,60
Магнітний пускач FC6 250A 220V	2	7 531,68	15 063,36
Автоматичний вимикач УЕК ВА47-29 1P 10A 4,5кА С	2	85,32	170,64
Arduino UNO Rev3	1	397	397
Блок живлення OEM DC12 24W 2A PL	1	113	113
Блок живлення 220/12 В	1	22,44	22,44
LCD 2004 I2C	1	259	259
Потенціометр WH148	1	8	8
Клапан непрямої дії EV220B 100CI FL10 E NC000	3	162 600	487 800
Датчик температури DS18B20	3	44	132
Резистор 4.7 КОм	3	0,66	2
Датчик рівня ДУ-002	2	380	760
Реле проміжне МК2Р	5	113,45	567,25
Кулачковий вимикач Harmony K10	1	771,74	771,74
Кнопка АСКО ХВ2-ВА31	12	61,31	735,72
Світлосигнальна арматура AD22- 22DS 220V	5	45,86	229,3
Шафа розподільча КМГ-463	1	1 976	1 976
Кабель силовий ВВГнг-LS 3*120+1*50 -1кВ	250	3 011	752 750
Кабель ВВГнг-LS-П 3х1,5	300	36,44	10 932
Кабель контрольний КВВГнг-LS 4х0,75	600	37,44	22 464
<b>Загалом</b>			<b>1 639 904,05</b>

З урахуванням округлення, резерву та подорожчання передбачено загальну суму:

$$K_{\text{заг}} = 2\,000\,000 \text{ грн}$$

Оцінка річного прибутку виконується на основі обсягу товарного біогазу та його енергетичної цінності. Із попередніх розрахунків (4.5) відомо, що потенційний обсяг товарного біогазу за сезон становить:

$$V_{\text{тов}} = 275\,235,4 \text{ м}^3$$

Теплотворна здатність біогазу:

$$q_{\text{БГ}} = 6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^3}$$

Загальна кількість енергії:

$$Q_{\text{річна}} = 275\,235,4 \cdot 6 = 1\,651\,412,4 \text{ кВт}$$

За умови, що ця енергія використовується для виробництва електроенергії, і тариф за "зеленим" тарифом становить 5,8625 грн/кВт·год (умовно для ТЕЦ з біогазом), річний грошовий потік становитиме:

$$\text{ГП} = 1\,651\,412,4 \cdot 5,8625 = 9\,681\,405,195 \text{ грн/рік}$$

Навіть якщо брати консервативну оцінку, наприклад, використання лише 50% біогазу для власних потреб (тепло + електрика), ефективний дохід складе:

$$\text{ГП}_{\text{реал}} = 1651412,2 \cdot 5,8625 \approx 9\,681\,405 \text{ грн/рік}$$

У контексті загальних інвестиційних витрат на створення біогазової установки:

$$\text{ІК} = 2\,000\,000 \text{ грн}$$

Чистий прибуток у перший рік (без урахування амортизації, податків тощо):

$$\text{П} = 9\,681\,405 - 2\,000\,000 = 8\,681\,405 \text{ грн}$$

Для оцінки ефективності інвестицій у систему автоматизованого керування температурним режимом біогазової установки розрахуємо показники, які характеризують прибутковість і термін окупності.

Розрахуємо термін окупності:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{IK}{ГП_{\text{реал}}} = \frac{2\,000\,000}{9\,681\,405} \approx 0.206 \approx 76 \text{ днів}$$

Розрахуємо рентабельність інвестицій (ROI):

$$ROI = \frac{П}{IK} * 100\% = \frac{7\,681\,405}{2\,000\,000} * 100\% \approx 384\%$$

Проведений техніко-економічний аналіз доводить доцільність впровадження автоматизованої системи керування температурою біогазового процесу зброджування бурякового жому. За рахунок точного контролю температурного режиму досягається оптимізація зброджування, максимізується вихід біогазу, та зменшуються теплові втрати.

Враховуючи "зелений" тариф, інвестиції окупуються менше ніж за 3 місяці, а рентабельність перевищує 300%. Таким чином, запропонована система є не лише технологічно доцільною, але й економічно вигідною, і може бути рекомендована до впровадження на цукрових підприємствах України.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи вирішено комплексне інженерне завдання, що полягає у розробці системи автоматичного керування температурним режимом біогазової установки, яка функціонує на буряковому жомі як основній сировині. Така система дозволяє забезпечити ефективну терморегуляцію в реакторі попереднього збродження, що є ключовим фактором для стабільної життєдіяльності метаногенних мікроорганізмів та, відповідно, для високопродуктивного утворення біогазу.

На основі аналізу літературних джерел і технологічних практик було сформовано уявлення про багатофазну природу процесу анаеробного збродження, що охоплює гідроліз, ацидогенез, ацетогенез та метаногенез. Показано, що температура відіграє критичну роль у всіх зазначених фазах, особливо в межах мезофільного режиму (36–42 °C).

Здійснено інформаційне моделювання об'єкта керування, побудовано функціональну схему автоматизації з використанням температурних, рівневих і виконавчих елементів, а також реалізовано імітаційну модель у середовищі MATLAB Simulink. На її основі було виведено передатну функцію реактора, оцінено його інерційні властивості та розраховано параметри цифрового ПІ-регулятора.

Електротехнічна частина проєкту охоплює розробку електричної принципової схеми, схеми з'єднань виконавчих механізмів і загального вигляду щита керування. Основу апаратної реалізації становить мікроконтролер Arduino UNO, який забезпечує обробку сигналів, формування керуючих впливів і передачу інформації до дисплея та операторської панелі.

У техніко-економічному розділі доведено доцільність впровадження автоматизованої системи: термін окупності системи становить менш як 3 місяці, рентабельність перевищує 300%, а прогнозована економія та дохідність при використанні "зеленого" тарифу — понад 9,6 млн грн на рік. Отримані результати підтверджують як інженерну ефективність запропонованого рішення, так і його високу інвестиційну привабливість для підприємств цукрової галузі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Економіка сталого розвитку та природокористування. Видавничий дім "Інтернаука" / Internauka. URL: <https://www.inter-nauka.com/uploads/public/15567230802377.pdf> (дата звернення: 25.05.2025).
2. Процес утворення біогазу – UTC. UTC. URL: <https://utc.bio/biogazovi-kompleksy/proces-utvorennya-biogazu/> (дата звернення: 25.05.2025).
3. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок – Агробізнес сьогодні. Агробізнес сьогодні. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/idei-trendy/item/8386-suchasni-tendentsii-rozvytku-biohazovykh-ustanovok.html> (дата звернення: 25.05.2025).
4. Розроблення та дослідження системи автоматичного керування температурним режимом в БГУ. Репозитарій НУБіП України. URL: <https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/4b1b7428-dcb3-4107-be22-22fb631941a8/content> (дата звернення: 26.05.2025).
5. Сушильна установка жому у виробництві цукру з буряка. SumDU Repository. URL: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/84985/1/Levchenko\\_susharka.pdf;jsessionid=20F1E3A0B39703FC6980EC307122242C](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/84985/1/Levchenko_susharka.pdf;jsessionid=20F1E3A0B39703FC6980EC307122242C) (дата звернення: 26.05.2025).
6. Mixing of Fluids. The Engineering ToolBox. URL: <https://www.engineeringtoolbox.com/> (дата звернення: 16.06.2025).
7. АИР 315 S6 электродвигатель 110 кВт 1000 об/мин цена от завода: купить в Киеве на Системакс. Системакс. URL: <https://systemax.ua/elektrodvigateli/trehfaznye-obshepromyshlennye-elektrodvigateli/air/air315s6--110-kvt-1000-ob-min-.html> (дата звернення: 16.06.2025).
8. Автоматичний вимикач Промфактор FMC5/3U 450A 8-12In ( FMC53U0450 ). Амперок. URL: [https://amperok.com.ua/avtomatychnyj\\_vumykach\\_promfaktor\\_fmc5\\_3u\\_450a\\_8-12in\\_fmc53u0450](https://amperok.com.ua/avtomatychnyj_vumykach_promfaktor_fmc5_3u_450a_8-12in_fmc53u0450) (дата звернення: 16.06.2025).
9. Магнітний пускач FC6 250A 220V Промфактор. Амперок. URL: [https://amperok.com.ua/magnitnyj\\_puskach\\_promfaktor\\_pmm\\_6\\_250\\_220\\_6\\_250\\_220\\_42?gclid=EAIaIQobChMI49Pz17r0jQMV\\_JCDBx3Mhgd0EAQYBSABEGlcuvD\\_BwE&utm\\_source=google&utm\\_medium=сpc&utm\\_campaign=PMax\\_vid1000&utm\\_term=&utm\\_content=](https://amperok.com.ua/magnitnyj_puskach_promfaktor_pmm_6_250_220_6_250_220_42?gclid=EAIaIQobChMI49Pz17r0jQMV_JCDBx3Mhgd0EAQYBSABEGlcuvD_BwE&utm_source=google&utm_medium=сpc&utm_campaign=PMax_vid1000&utm_term=&utm_content=) (дата звернення: 16.06.2025).
10. Автоматичний вимикач УЕК ВА47-29 1P 10A 4,5кА С (MVA20-1-010-С) • Краща ціна в Києві, Україні • Купити в Епіцентр. epicentrk.ua. URL: <https://epicentrk.ua/ua/shop/mplc-avtomatichnij-vimikac-uek-va47-29-1r-10a-4->

5ka-s-mva20-1-010-c-1ee56f0e-13ca-6a32-82bf-41262d173dd3.html?utm\_source=google&utm\_medium=cpc&adtype=pla&product\_channel=online&gad\_source=1&gad\_campaignid=22079283820&gbraid=0AAAAADLIb1O2pEDE-Q3s1vnHaDcykg\_Ca&gclid=EAIaIQobChMIpaXViLz0jQMVe5SDBx28-DrkEAQYViABEgKim\_D\_BwE (дата звернення: 16.06.2025).

11. Uno Платы Ардуино. Ардуино в Украине.

URL: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno> (дата звернення: 16.06.2025).

12. Блок питания OEM DC12 24W 2A PL купить в Украине, цена в Киеве: характеристики, отзывы | Интернет-магазин 5WATT. 5WATT.

URL: <https://5watt.ua/blok-pitaniya-oem-dc12-24w-2a-pl-233.html> (дата звернення: 16.06.2025).

13. AC 220V Zu 5V DC Step Down Buck Transformator Netzteil Modul Für Arduino AC-DC 5V 700mA 3,5 W Spannung Regler Konverter - AliExpress

13. aliexpress. URL: <https://www.aliexpress.com/item/> (дата звернення: 16.06.2025).

14. LCD 2004 I2C символный дисплей 20x4 (желтый) купить в Киеве и Украине. Arduino в Україні. URL: [https://arduino.ua/ru/prod1932-lcd-2004-i2c-simvolnii-displei-20x4-jeltii?srsltid=AfmBOoqJ1U3bjnujp4133WSmXF2vF3fjgWRhK\\_any0qGUpSQ4\\_hZef90](https://arduino.ua/ru/prod1932-lcd-2004-i2c-simvolnii-displei-20x4-jeltii?srsltid=AfmBOoqJ1U3bjnujp4133WSmXF2vF3fjgWRhK_any0qGUpSQ4_hZef90) (дата звернення: 16.06.2025).

15. Резистор змінний B10K потенціометр WH148 15мм Ардуїно URL: [https://arduinokit.com.ua/ua/p1411446299-rezistor-peremennyj-b10k.html?srsltid=AfmBOop1NkHm-dgrgM2Hc-gLflUIPCRgnhJ8P5\\_8F3hGJ-9tQyFHed](https://arduinokit.com.ua/ua/p1411446299-rezistor-peremennyj-b10k.html?srsltid=AfmBOop1NkHm-dgrgM2Hc-gLflUIPCRgnhJ8P5_8F3hGJ-9tQyFHed) (дата звернення: 16.06.2025).

16. Клапан непрямої дії EV220B 100CI FL10 E NC000 URL:

<https://ianv.com.ua/category/category-danfoss/promyshlennaya-avtomatika/promishlennie-klapani-i-katushki/klapani-nepryamogo-deystviya/ev220b-100-ci-016d6100>

17. Датчик температуры DS18B20, влагозащищенный: продажа, цена в Черновцах. Реле температуры от "RadioCron - магазин для радиолюбителя" - 1063029103. "RadioCron - магазин для радиолюбителя" - контакты, товары, услуги, ціни. URL: [https://radiocron.com.ua/p1063029103-datchik-temperature-ds18b20.html?source=merchant\\_center&gad\\_source=1&gad\\_campaignid=18250127172&gbraid=0AAAAACgrYwxs7j2RWPHIRP3D1xfuLi\\_Ah&gclid=EAIaIQobChMIpeSDqf71jQMVCWIBAh0cgRN-EAQYVCABEgLvD\\_BwE](https://radiocron.com.ua/p1063029103-datchik-temperature-ds18b20.html?source=merchant_center&gad_source=1&gad_campaignid=18250127172&gbraid=0AAAAACgrYwxs7j2RWPHIRP3D1xfuLi_Ah&gclid=EAIaIQobChMIpeSDqf71jQMVCWIBAh0cgRN-EAQYVCABEgLvD_BwE) (дата звернення: 16.06.2025).

18. Резистор 4,7 кОм 4к7 0,25W купить в Киеве и Украине. Arduino в Україні. URL: <https://arduino.ua/ru/prod1968-rezistor-4-7-kom-5->

shtyk?srsltid=AfmBOooJZV37CXgFEczjluVoTO8EPdVmhSKsrsKa107-6E4M7UvJv3mK (дата звернення: 16.06.2025).

19. Датчик рівня ДУ-002 (довжина електрода 100 мм), ціна: 380 ₴, купити на Prom.ua. prom.ua. URL: [https://prom.ua/p2113290385-datchik-urovnya-002.html?utm\\_source=google\\_product&utm\\_medium=cpc&utm\\_content=pla&utm\\_campaign=КТ\\_cpc\\_1\\_5297199152&utm\\_gad\\_source=1&utm\\_gad\\_campaignid=20983226771&utm\\_gbraid=0AAAAADBxJSXj5bRsbHGHyZmwUwXh4UCB5&utm\\_gclid=EAIaIQobChMIxbORi6v0jQMVyEBBAh09Mg0IEAQYAiABEgLkXPD\\_BwE](https://prom.ua/p2113290385-datchik-urovnya-002.html?utm_source=google_product&utm_medium=cpc&utm_content=pla&utm_campaign=КТ_cpc_1_5297199152&utm_gad_source=1&utm_gad_campaignid=20983226771&utm_gbraid=0AAAAADBxJSXj5bRsbHGHyZmwUwXh4UCB5&utm_gclid=EAIaIQobChMIxbORi6v0jQMVyEBBAh09Mg0IEAQYAiABEgLkXPD_BwE) (дата звернення: 16.06.2025).

20. Реле проміжне МК2Р (10А 220В АС), АСКО-УКРЕМ | 001.com.ua. 001.com.ua. URL: <https://001.com.ua/uk/rele-promizhne-mk2r-10a-220v-ac-asko-ukrem> (дата звернення: 16.06.2025).

21. Кулачковий вимикач 10а 2 позиції. Schneider Electric. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/K10A001ACH/%D0%BA%D1%83%D0%BB%D0%B0%D1%87%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9-%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%87-10%D0%B0-2-%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D1%86%D1%96%D1%97/>

22. Кнопка АСКО ХВ2-ВА31. АМПЕРОК. URL: [https://amperok.com.ua/knopka\\_asko\\_xb2-ba31\\_start\\_a0140010002?gclid=EAIaIQobChMI-rWjs8j0jQMVdJeDBx0Vug6GEAYYASABEgJvffd\\_BwE&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=PMax\\_do100&utm\\_term=&utm\\_content=\](https://amperok.com.ua/knopka_asko_xb2-ba31_start_a0140010002?gclid=EAIaIQobChMI-rWjs8j0jQMVdJeDBx0Vug6GEAYYASABEgJvffd_BwE&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=PMax_do100&utm_term=&utm_content=\)

23. Світлосигнальна арматура AD22-22DS 220V. АМПЕРОК. URL: [https://amperok.com.ua/svitlosygnalna\\_armatura\\_asko\\_ad16-22ds\\_220v\\_%D0%B00140030038?gclid=EAIaIQobChMI\\_MnIjsz0jQMVb4ODBx16CyAbEAQYAiABEgLxufD\\_BwE&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=PMax\\_do100&utm\\_term=&utm\\_content=](https://amperok.com.ua/svitlosygnalna_armatura_asko_ad16-22ds_220v_%D0%B00140030038?gclid=EAIaIQobChMI_MnIjsz0jQMVb4ODBx16CyAbEAQYAiABEgLxufD_BwE&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=PMax_do100&utm_term=&utm_content=)

24. Кабель ВВГнг-LS 3\*120+1\*50 -1кВ. ПАТ"ОДЕСКАБЕЛЬ", ціна: 3011 ₴, купити на Prom.ua. prom.ua. URL: [https://prom.ua/p2136126405-kabel-silovoj-vvgng.html?utm\\_source=google\\_pmax&utm\\_medium=cpc&utm\\_content=pmax&utm\\_campaign=Pmax\\_cpa\\_silovoj\\_kabel\\_121207376&utm\\_gad\\_source=1&utm\\_gad\\_campaignid=21574860857&utm\\_gbraid=0AAAAADBxJSVCqAYCKsxoqpEIf1CFhITKS&utm\\_gclid=EAIaIQobChMIqt3SwJX2jQMVoQsGAB0AkSbkEAQYAiABEgK-fPD\\_BwE](https://prom.ua/p2136126405-kabel-silovoj-vvgng.html?utm_source=google_pmax&utm_medium=cpc&utm_content=pmax&utm_campaign=Pmax_cpa_silovoj_kabel_121207376&utm_gad_source=1&utm_gad_campaignid=21574860857&utm_gbraid=0AAAAADBxJSVCqAYCKsxoqpEIf1CFhITKS&utm_gclid=EAIaIQobChMIqt3SwJX2jQMVoQsGAB0AkSbkEAQYAiABEgK-fPD_BwE) (дата звернення: 16.06.2025).

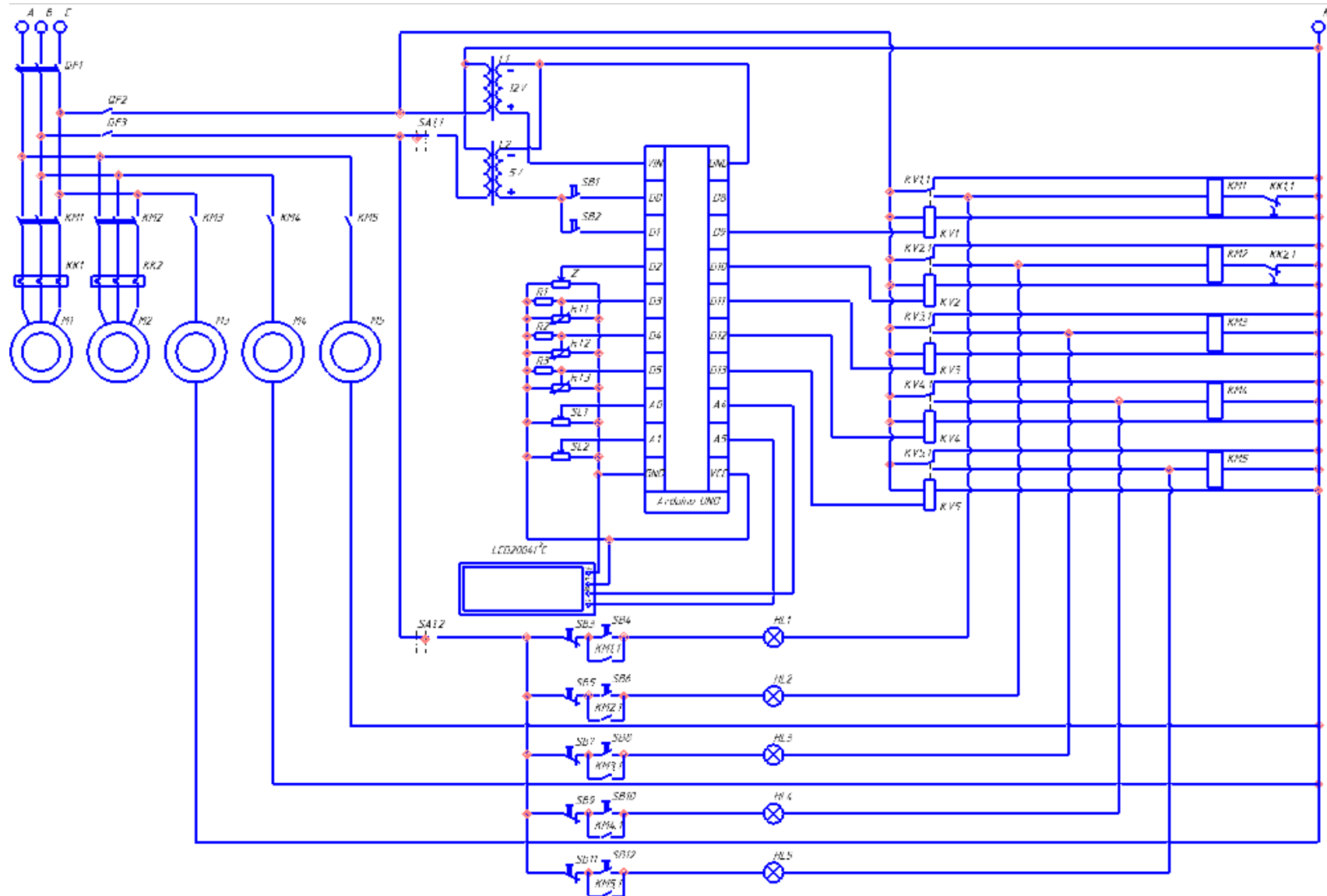
25. Кабель ВВГнг-LS-П 3х1,5 Одескабель. Захищена сторінка. URL: <https://cabel-opt.com.ua/vvgpngd/vvgng-ls-p-3-1-5-odeskabel.html> (дата звернення: 16.06.2025).

26. Кабель контрольный КВВГнг-LS 4x0,75 | Люкс Кабель. Люкс Кабель. URL: <https://luxkabel.od.ua/ru/product/6313016/> (дата звернення: 16.06.2025).

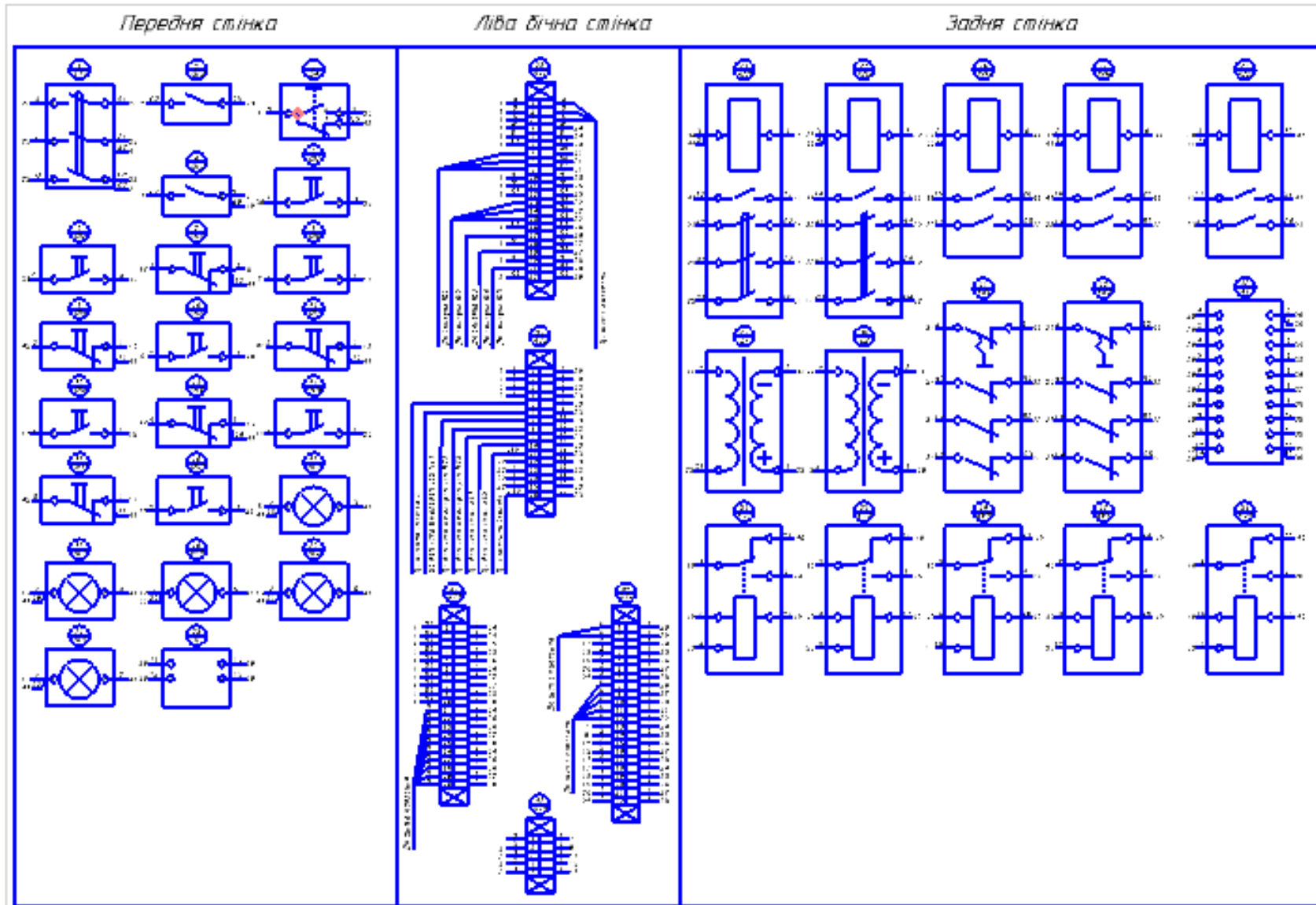
27. Монтажный металлический корпус герметичный IP54 (600\*400\*300мм) КМГ-463, ціна: 1976 ₴, купити на Prom.ua. prom.ua. URL: [https://prom.ua/p1575034221-montazhnyj-korpus-metallicheskij.html?utm\\_source=google\\_pmax&utm\\_medium=cpc&utm\\_content=pmax&utm\\_campaign=Pmax\\_cpa\\_50\\_elektrooborudovanie&gad\\_source=1&gad\\_campaignid=19838557823&gbraid=0AAAAADBxJSWxQScwDh7bdJDg76IvvRGs5&gclid=EAIaIQobChMI2p6c-6H2jQMVnBSiAx0BQTr0EAQYASABEgLzy\\_D\\_BwE](https://prom.ua/p1575034221-montazhnyj-korpus-metallicheskij.html?utm_source=google_pmax&utm_medium=cpc&utm_content=pmax&utm_campaign=Pmax_cpa_50_elektrooborudovanie&gad_source=1&gad_campaignid=19838557823&gbraid=0AAAAADBxJSWxQScwDh7bdJDg76IvvRGs5&gclid=EAIaIQobChMI2p6c-6H2jQMVnBSiAx0BQTr0EAQYASABEgLzy_D_BwE) (дата звернення: 16.06.2025).

## ДОДАТКИ

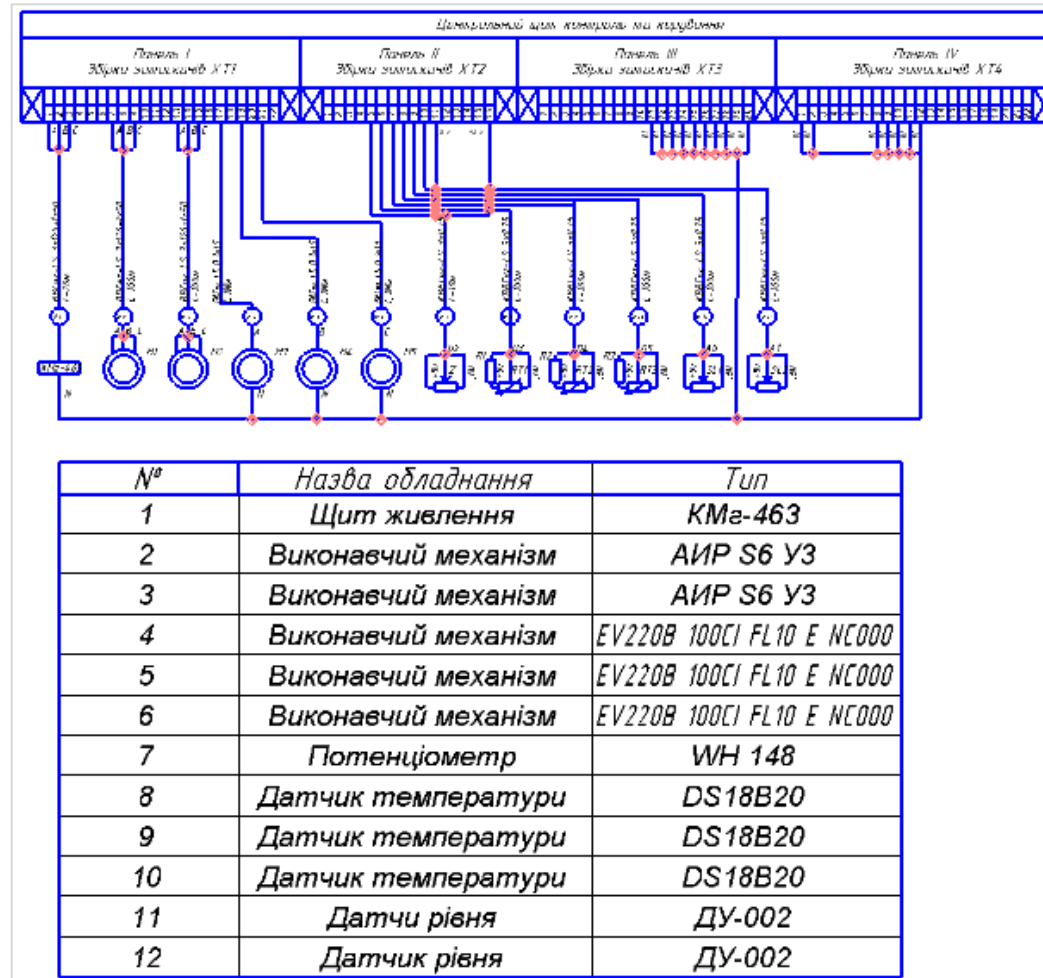
## Додаток 1. Фрагмент схеми електричної принципової



## Додаток 2. Фрагмент схеми електричних з'єднань

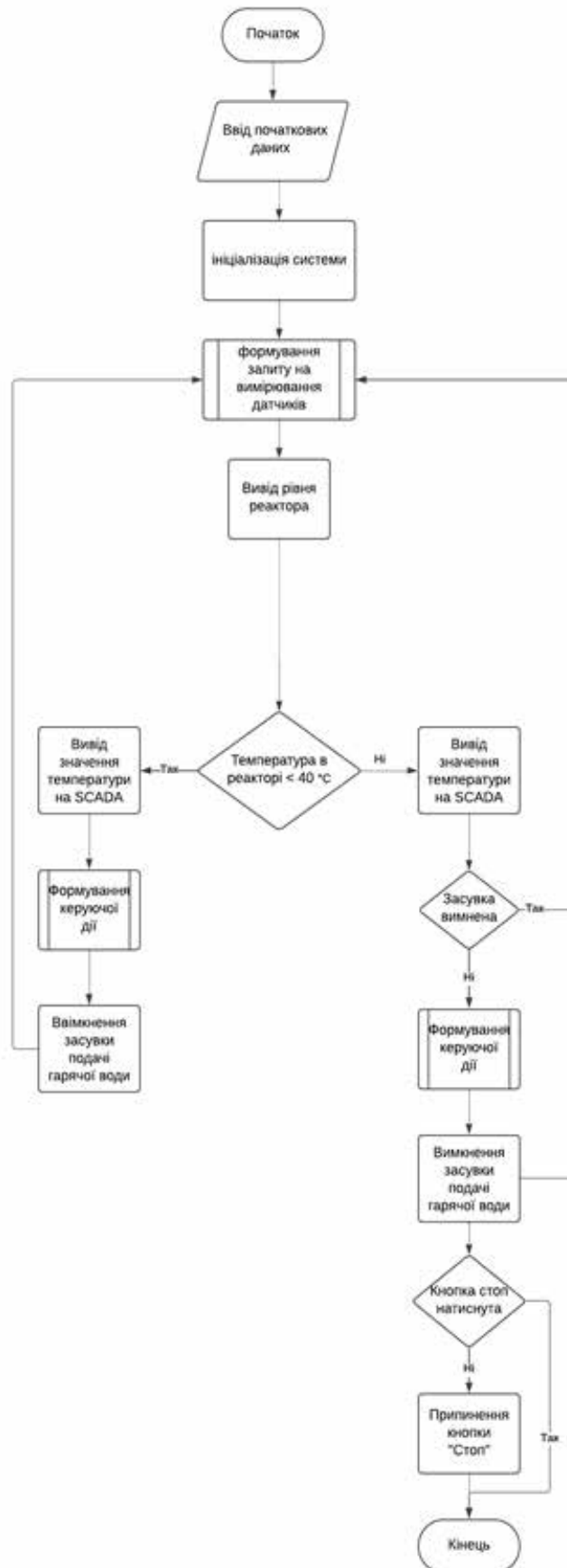


### Додаток 3. Фрагмент схеми електричних підключень

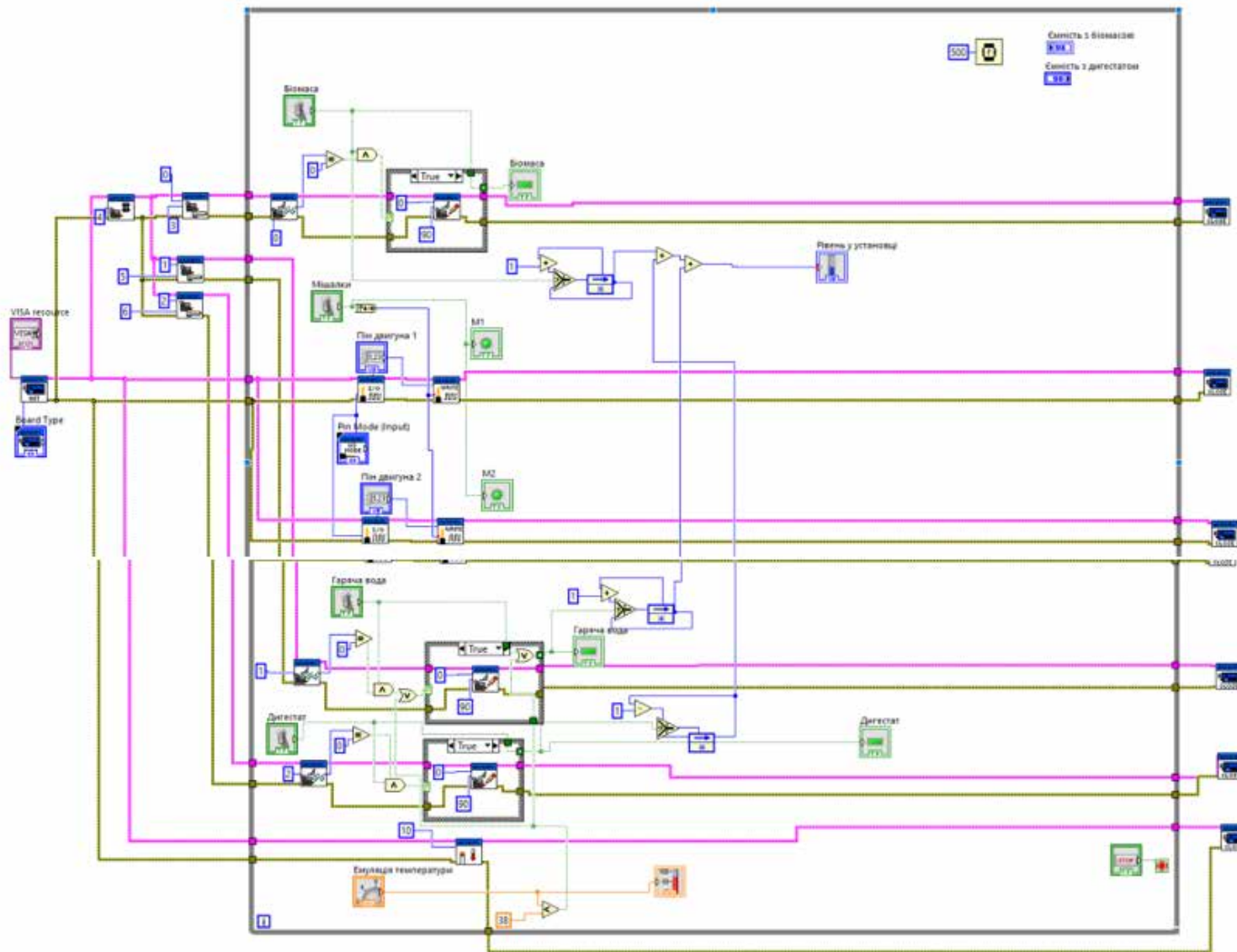


Додаток 4.

## Додаток 5. Блок-схема алгоритму роботи SCADA



## Додаток 6. Блок діаграм SCADA-системи в середовищі LabVIEW



## Додаток 7. Блок діаграм SCADA-системи в середовищі LabVIEW

