

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 621.62-66:67.08

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Сергій БОЙЧЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2026 р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг інтелектуальних
електротехнічних та мехатронних комплексів»

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

на тему: «Автоматизація технологічного процесу культивування
мікробіодоростей у фотобіореакторі для отримання біопалива»

Виконав:

Студент IV курсу, групи ОА-21 Курганський Д.В. _____
(шифр групи) (прізвище та ініціали) (підпис)

Науковий керівник к. т. н., ст.дослідник Яковлєва А.В. _____
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Нормоконтролер к. т. н., доцент Кулаковський Л.Я. _____
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«Київський політехнічний інститут

Імені Ігоря Сікорського»

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти – перший (бакалавр)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій БОЙЧЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ на дипломний проект

студенту _____ Курганський Денис Вікторович
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Тема дипломного проекту **«Автоматизація технологічного процесу
культивування мікроводоростей у фотобіореакторі для отримання
біопалива»**

науковий керівник дисертації Яковлева Анна Валеріївна, к. т. н., доцент
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання, посада)

затверджені наказом № 1910-с по університету від «26» травня 2026 р.

1. Термін подання студентом диплому «16» червня 2026 р.

2. Зміст пояснювальної записки:

а) **Загально-технічна частина** — аналіз використання мікроводоростей для отримання біопалива, огляд систем культивування, обґрунтування вибору плоскопанельного фотобіореактора та культури *Arthrospira platensis* DHR 20.

б) **Технологічна частина** — опис установки FPBR-500, розрахунок її основних параметрів, матеріального балансу та вибір технологічного обладнання.

в) **Електропостачання** — визначення категорії надійності, розрахунок навантажень, розробка двотрансформаторної схеми, вибір кабелів, захисних апаратів, уставок і заходів енергозбереження.

г) **Спеціальна частина** — розробка автоматизованої системи керування, вибір датчиків і виконавчих механізмів, формування карти сигналів ПЛК, алгоритмів керування та моделювання роботи САК.

д) **Охорона праці** — аналіз умов праці, визначення небезпечних факторів, розробка заходів біологічної, хімічної, електричної та пожежної безпеки.

3 Орієнтовний перелік графічного матеріалу:

1 аркуш — Технологічна схема установки культивування мікродоростей FPBR-500.

2 аркуш — Двотрансформаторна схема електропостачання фотобіореакторної установки.

3 аркуш — План приміщення з розміщенням фотобіореакторів, LED-панелей, технологічного обладнання та кабельних трас.

4 аркуш — Схема електрична принципова автоматизації фотобіореакторної установки FPBR-500.

4. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Дата, підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
2.Електропостачання	К.т.н., доцент, Мейта О.В.		
5. Охорона праці	К.т.н., доцент Мітюк Л.О.		

5. Дата видачі завдання: «16» березня 2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів дипломного проєкту	Примітка
1.	Вибір і затвердження теми	16.03.26	виконано
2.	Літературний пошук	16.03.26-30.03.26	виконано
3.	Складання плану, розробка індивідуального завдання	01.04.26-10.04.26	виконано
4.	Поглиблене вивчення літературних джерел і написання теоретичної частини	16.04.26-28.04.26	виконано
5.	Збір і аналітична обробка матеріалу з теми дослідження	28.04.26-06.05.26	виконано
6.	Написання диплому та його оформлення	07.05.26-10.06.26	виконано
7.	Подання роботи до екзаменаційної комісії та її захист	10.06.26-16.06.26	виконано

Студент

(підпис)

Денис КУРГАНСЬКИЙ

(ім'я, прізвище)

Науковий керівник

(підпис)

Анна ЯКОВЛІЄВА

(ім'я, прізвище)

Пояснювальна записка
до дипломного проекту
на тему: «Автоматизація технологічного процесу культивування
мікроводоростей у фотобіореакторі для отримання біопалива»

Київ – 2026

						Арк.
						1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячено розробленню автоматизованої системи керування технологічним процесом культивування мікроводоростей у плоскопанельному фотобіореакторі для отримання біопалива. Як базовий технологічний об'єкт прийнято пілотну установку робочим об'ємом 500 л: 10 плоскопанельних фотобіореакторів по 35 л та резервуар поживного середовища 150 л.

У роботі обґрунтовано вибір *Arthrospira platensis* DHR20 як культури, що культивується на анаеробно оброблених стічних водах тваринництва та формує біомасу з потенціалом для виробництва FAME-біодизеля. Розраховано очікуваний вихід сухої біомаси, ліпідів і біодизеля, а також добову біофіксацію CO₂. Розроблено структуру автоматизованої системи керування на базі ПЛК Siemens S7-1200 із контурами регулювання температури, рН, рівня, оптичної густини та аварійного захисту.

Окремий розділ присвячено електропостачанню: запропоновано схему живлення з вибором кабелів, автоматичних вимикачів та уставок захисту. Розроблено рекомендації з охорони праці, електробезпеки, біобезпеки та екологічного контролю.

Ключові слова: мікроводорості, фотобіореактор, автоматизація, ПЛК, SCADA, біопаливо, біодизель, електропостачання.

						Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

The diploma project is devoted to the development of an automated control system for the microalgae cultivation process in a flat-panel photobioreactor for biofuel production. The selected technological object is a pilot-scale facility with a working volume of 500 L, consisting of 10 flat-panel photobioreactors of 35 L each and a 150 L nutrient medium tank.

The study substantiates the selection of *Arthrospira platensis* DHR20 as the cultivated microorganism, grown on anaerobically treated livestock wastewater and producing biomass with potential for FAME biodiesel production. The expected yields of dry biomass, lipids, and biodiesel, as well as the daily biofixation rate, were calculated. An automated control system structure based on the Siemens S7-1200 programmable logic controller was developed, incorporating control loops for temperature, pH, level, optical density, and emergency protection.

A separate section is dedicated to the power supply system, proposing a power distribution scheme with the selection of cables, circuit breakers, and protection settings. Recommendations on occupational safety, electrical safety, biosafety, and environmental monitoring were also developed.

Keywords: microalgae, photobioreactor, automation, PLC, SCADA, biofuel, biodiesel, power supply.

						Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБ’ЄКТА	
АВТОМАТИЗАЦІЇ	9
1.1. Передумови використання мікроводоростей для виробництва біопалива	9
1.2. Вибір культури мікроводоростей та критерії продуктивності	10
1.3. Порівняння конструкцій фотобіореакторів	12
1.4. Керовані фактори росту та вимоги до автоматизації	13
1.5. Висновки до розділу	15
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	16
2.1. Опис технологічної схеми установки культивування	16
2.2. Розрахунок фотобіореакторної установки 500 л	19
2.3. Матеріальний баланс процесу отримання біопалива	20
2.4. Вибір основного технологічного обладнання	21
2.5. Висновки до розділу	23
РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	24
3.1. Категорія надійності та структура живлення	24
3.2. Розрахунок електричних навантажень	24
3.3. Двотрансформаторна схема та розподіл навантаження.....	26
3.4. Розрахунок освітлення та план приміщення	28
3.5. Вибір кабелів, захисних апаратів і уставок	29
3.6. Розрахунок струмів короткого замикання.....	30
3.7. Вибір електричних апаратів після розрахунку струмів короткого замикання	31
3.8. Енергетичні показники і заходи енергозбереження	34
3.9. Висновки до розділу	35
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	36
4.1. Функціональні вимоги до САК.....	36
4.2. Структура системи автоматизації.....	36
4.3. Вибір датчиків і виконавчих механізмів.....	37
4.4. Контури регулювання та алгоритми керування.....	38
4.5. PLC/SCADA, сигнали, аварії та архівування.....	41
4.6. Програмна реалізація автоматичного керування.....	42
4.7. Імітаційне моделювання роботи контурів САК.....	45

4.8. Висновки до розділу	48
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	51
5.1. Загальна характеристика умов праці оператора.....	51
5.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	52
5.3. Біологічні небезпеки та санітарні заходи.....	56
5.4. Хімічні небезпеки та поводження з реагентами.....	57
5.5. Засоби індивідуального захисту оператора.....	58
5.6. Електробезпека.....	61
5.7. Пожежна безпека.....	62
5.8. Організаційні заходи безпеки та допуск персоналу.....	64
Висновки до розділу	65
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТКИ.....	72

						Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ACWW – Anaerobically Digested Cattle Wastewater – анаеробно оброблені стічні води тваринництва;

CO₂ – вуглекислий газ;

РК – розчинений кисень;

FAME – Fatty Acid Methyl Esters – метилові ефіри жирних кислот;

ПФБР – плоскопанельний фотобіореактор;

ФАВ – фотосинтетично активне випромінювання;

PID - пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

ПЛК – програмований логічний контролер;

SCADA – диспетчерське керування та збір даних;

ПЧ – частотний перетворювач електропривода;

САК – система автоматизованого керування.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Актуальність теми. Біоенергетика розглядається як один із напрямів зменшення залежності від викопного палива, оскільки дозволяє перетворювати відновлювану біомасу в моторні або енергетичні палива. Серед різних джерел біомаси особливе місце займають мікроводорості: вони швидко ростуть, не потребують родючих сільськогосподарських земель, можуть утилізувати CO₂ та поживні речовини зі стічних вод, а отримана біомаса може бути сировиною для ліпідів, біогазу, біодобрив і кормових компонентів.

Технологічна проблема полягає в тому, що високі показники росту культури зберігаються лише за одночасного підтримання багатьох взаємопов'язаних параметрів: освітленості, спектра і фотоперіоду, температури, рН, наявності CO₂, інтенсивності перемішування, рівня розчиненого кисню, оптичної щільності, санітарного стану середовища. Нерегульоване відхилення одного параметра може знизити продуктивність, спричинити фотопригнічення, надлишкове накопичення кисню, седиментацію клітин або контамінацію культури.

Для закритого плоскопанельного фотобіореактора автоматика є не допоміжною, а ключовою складовою технології. Вона забезпечує відтворюваність процесу, стабілізує гідродинаміку, дозує CO₂, керує LED-освітленням, підтримує температурний режим, формує технологічні блокування та реєструє дані для аналізу біомаси. Саме тому тема автоматизації культивування мікроводоростей у фотобіореакторі є актуальною для сучасної біоенергетики та електротехнічної автоматизації.

Мета проєкту – розробити інженерно обґрунтоване рішення автоматизації технологічного процесу культивування мікроводоростей у плоскопанельному фотобіореакторі пілотного об'єму 500 л для отримання біопалива, включно з технологічним описом, електропостачанням, двотрансформаторною схемою, вибором електрообладнання, датчиків, виконавчих механізмів і заходів безпеки.

						Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єкт дослідження – технологічний процес культивування мікроводоростей у фотобіореакторі для отримання біопалива.

Предмет дослідження – система автоматизованого керування технологічним процесом культивування мікроводоростей у фотобіореакторі, зокрема керування освітленням, температурою, рН, подачею CO₂, аерацією, циркуляцією середовища та збором біомаси.

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

- Проаналізувати технологічний процес культивування мікроводоростей у плоскостанельних фотобіореакторах та визначити основні параметри, що підлягають автоматизованому керуванню;
- Визначити склад основного технологічного та електротехнічного обладнання пілотної фотобіореакторної установки робочим об'ємом 500 л та розробити систему електропостачання;
- Розробити структуру та алгоритми автоматизованої системи керування процесом культивування мікроводоростей на базі ПЛК ОВЕН ПЛК200;
- Реалізувати програмне забезпечення системи керування у середовищі CODESYS 3.5 та змодельовати роботу основних контурів регулювання;
- Розробити заходи з охорони праці та безпечної експлуатації фотобіореакторної установки.

Наукова новизна даного дослідження полягає в розробці автоматизованої системи керування процесом культивування мікроводоростей у плоскостанельному фотобіореакторі, що враховує специфіку біотехнологічного виробництва біопалива з використанням сучасних засобів автоматизації на базі вітчизняного програмованого логічного контролера.

						Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практична значимість дослідження полягає в тому, що розроблена система може бути використана для вдосконалення існуючих та створення нових автоматизованих фотобіореакторних установок для виробництва біодизелю. Це дозволить підвищити продуктивність культивування мікроводоростей, забезпечити стабільність технологічних параметрів, знизити витрати на обслуговування установки, а також сприятиме розвитку відновлюваної енергетики та біоремедіації стічних вод тваринництва.

						Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Передумови використання мікроводоростей для виробництва біопалива

Мікроводорості є фотосинтезуючими мікроорганізмами, що перетворюють світлову енергію, CO₂ та поживні речовини в органічну біомасу. На відміну від наземних олійних культур, вони можуть культивуватися у технічних або солонуватих водах, на непридатних для землеробства площах, у промислових приміщеннях чи закритих реакторних модулях. Біомаса мікроводоростей містить білки, вуглеводи, пігменти, поліненасичені жирні кислоти та ліпіди. Останні є основою для синтезу FAME-біодизеля шляхом переестерифікації.

Додаткова перевага мікроводоростей полягає у можливості поєднання культивування з біоремедіацією стічних вод. У такому режимі поживні речовини, які в традиційній схемі водоочищення розглядаються як забрудники, стають субстратом росту культури. Це зменшує витрати на мінеральне середовище і одночасно знижує навантаження за азотом, фосфором та органічними речовинами. У роботі Mattos et al. для *Arthrospira platensis* DHR 20 у вертикальних плоскопанельний фотобіореактор на анаеробно оброблені стічні води тваринництва отримано високу біомасу, видалення поживних речовин і ліпідну фракцію, придатну для біодизельного напрямку [4].

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

З технічного погляду мікрководоростева біоенергетика залишається складною через витрати на освітлення, перемішування, подачу газу, охолодження, збір і зневоднення біомаси. Огляд Hashmi et al. показує, що економічні обмеження пов'язані не лише з біологічною продуктивністю, а й із масштабуванням, енергоспоживанням, очищенням поверхонь, накопиченням кисню, масопереносом CO₂ і вартістю збору біомаси [2].

Саме тому автоматизація повинна бути спрямована не тільки на підтримання уставок, а й на мінімізацію енерговитрат при збереженні продуктивності.

1.2. Вибір культури мікрководоростей та критерії продуктивності

Для проєкту обрано *Arthrospira platensis* DHR 20. Цей вибір обумовлений тим, що дана культура дозволяє вирощувати її у вертикальних плоскопанельних фотобіореакторах на анаеробно оброблених стічних водах тваринництва, тобто в умовах, близьких до прийнятої технологічної схеми. Для цієї культури характерні лужний режим середовища, висока здатність до біоремедіації та накопичення біомаси. У разі заміни культури на *Chlorella vulgaris* або *Scenedesmus* sp. уставки рН, температури, освітлення та газообміну мають бути змінені у SCADA-рецепті.

Критеріями вибору штаму є: стабільний ріст у заданому середовищі; толерантність до коливань рН і температури; відсутність жорстких стерильних вимог для пілотного масштабу; достатня продуктивність сухої біомаси; придатний склад жирних кислот; можливість використання післяліпідного залишку як біодобрива або кормового компонента після санітарної оцінки.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

За даними Mattos et al., при зміні об'єму внесення анаеробно оброблені стічні води тваринництва у плоскопанельний фотобіореактор суха біомаса досягала 5,72 г/л, а максимальна об'ємна продуктивність становила 0,74 г/(л·добу) на фазі IV. Максимальна біофіксація CO₂ була 1213,5 мг/(л·добу), а найвища продукція ліпідів - 0,172 г/(л·добу) [4]. Ці показники прийнято як базові для розрахунків пілотної установки з розумінням, що реальний результат залежить від локального складу ACWW, світлового режиму, культури та санітарного стану системи. У таблиці 1.1 наведено узагальнені продуктивні показники культури *Arthrospira platensis* DHR 20 у плоскопанельному фотобіореакторі за різних фаз внесення анаеробно оброблених стічних вод тваринництва.

Таблиця 1.1 – Узагальнені продуктивні показники Arthrospira platensis DHR 20 у FPBR за даними [4]

Фаза	Внесення ACWW	$\mu_{\max}$, доб ⁻¹	Td, доба	Суха біомаса, г/л	P _v , г/(л·добу)	RCO ₂ , мг/(л·добу)
I	1 л	0,42	1,66	1,46	0,09	109,9
II	5 л	0,40	1,75	3,20	0,32	492,5
III	10 л	0,25	2,78	4,29	0,39	557,7
IV	15 л	0,20	3,51	5,15	0,74	1213,5
V	20 л	0,14	5,03	5,72	0,36	419,5

1.3. Порівняння конструкцій фотобіореакторів

Фотобіореактори поділяються на відкриті системи та закриті реакторні апарати. Відкритий канал-ставок для культивування дешевші й простіші, але мають високий ризик контамінації, випаровування, нестабільного освітлення та втрат CO₂. Закриті системи дорожчі, але дозволяють підтримувати параметри росту, вести монокультуру, зменшити втрати води та реалізувати повну автоматизацію.

Для дипломного проєкту важливим є саме керованість процесу, тому базовим типом обрано закритий плоскопанельний фотобіореактор.

Плоскопанельний фотобіореактор має короткий оптичний шлях, високий коефіцієнт площі освітлення до об'єму та придатний для модульного масштабування. Його недоліками є ризик обростання прозорих стінок, необхідність рівномірного освітлення, підвищені вимоги до мийки та чутливість до локального перегріву LED-панелями. Ці недоліки безпосередньо трансформуються у вимоги до автоматизації: необхідні вимірювання PAR, температури, циркуляції та регламент CIP-очищення.

Барботажні колони та ерліфтні реактори мають високий масообмін, але забезпечують гірший оптичний шлях у великому діаметрі. У статті Singh et al. експериментально показано, що середній діаметр 10 см у барботажній колоні краще балансує між змішуванням, газоутриманням та проникненням світла, ніж 5 або 15 см [3].

Цей висновок використано в проєкті як гідродинамічний принцип: інтенсивність аерації і циркуляції має бути достатньою для запобігання осіданню, але не надмірною для уникнення пошкодження клітин і енерговитрат.

						Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика систем культивування мікроводоростей

Критерій	Відкритий каналовий басейн	Трубчастий ФБР	Плоскопанельний ФБР	Барботажна колона
Ризик контамінації	Високий	Низький	Дуже низький	Низький
Керованість параметрів	Обмежена	Висока	Висока	Висока
Світловий шлях	Залежить від глибини	Залежить від діаметра труби	Короткий, зручний для LED	Залежить від діаметра
Масообмін CO ₂ /O ₂	Невисокий	Середній	Високий за правильної циркуляції	Високий через барботаж
Масштабування	Велика площа	Складні контури	Модульні панелі	Модульні колони
Типові недоліки	Випаровування, клімат	O ₂ , біообростання, промивка	Обростання стінок, нагрів	Зони застою або надмірна турбулентність
Доцільність для автоматизації	Низька/середня	Висока	Найвища для обраної задачі	Висока

1.4. Керовані фактори росту та вимоги до автоматизації

Світло є головним енергетичним чинником у перебігу процесу. Для більшості культур фотосинтетично активне випромінювання має підтримуватися в діапазоні, у якому клітини не перебувають у темновому дефіциті й не входять у фотопригнічення. Огляд Hashmi et al. узагальнює, що типові оптимальні значення фотосинтетично активного випромінювання становлять приблизно 100–300 мкмоль/(м²·с), а надмірна освітленість може викликати утворення активних форм кисню та фотопошкодження [2]. У проєкті застосовано регульовані LED-драйвери з плавною зміною потужності та контролем фотосинтетично активного випромінювання біля поверхні панелей.

Температура визначає швидкість ферментативних реакцій і метаболічний баланс. Для *Arthrospira platensis* прийнято робочий діапазон 24–32 °С, а технологічну установку — 28 °С для пілотного приміщення. Контроль термостатування має дві дії: нагрів через ТО-1 та охолодження через ХМ-1. Одночасна робота нагріву та охолодження блокується ПЛК.

рН пов'язаний із доступністю неорганічного вуглецю та станом середовища. Для *Arthrospira* прийнято лужний режим 8,5–10,0; за даними статті Mattos et al. рН у процесі підтримувався в межах 8–10,1, що є сприятливим для *S. platensis* [4]. Подача СО₂ використовується як регулятивна дія для зниження рН та забезпечення вуглецю. При аварійному зниженні рН клапан СО₂ закривається, а система переходить у режим продування повітрям.

Гідродинаміка впливає на масоперенос СО₂, видалення О₂, рівномірність температури та освітлення, а також на седиментацію клітин. Для уникнення застійних зон у кожній панелі передбачено циркуляцію суспензії та аераційне перемішування. Автоматизація контролює витрату газу, тиск, струм компресора, стан резервного агрегату та час роботи насосів.

						Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптична щільність оптичної густини є непрямым показником концентрації клітин. Вона використовується для визначення моменту збору біомаси, перемикання у напівбезперервний режим і формування трендів продуктивності.

Для достовірності оптичної густини-контроль має бути доповнений лабораторним визначенням сухої маси під час налаштування рецепту.

Таблиця 1.3 – Технологічні параметри, що підлягають автоматичному контролю

Параметр	Робочий діапазон	Датчик	Керувальна дія	Аварійна межа
Температура суспензії	24-32 °C, уставка 28 °C	TE-1, 4-20 мА	ТО-1/ХМ-1, насос Н-4	<20 або >35 °C
рН	8,5-10,0	рН-1, промисловий електрод	ЕМ-СО ₂ , аерація	<7,8 або >10,5
РАР біля панелей	150-250 мкмоль/(м ² ·с)	РАР-1	LED-драйвери 0-10 В	>500 мкмоль/(м ² ·с)
Розчинений кисень DO	4-12 мг/л	DO-1	Зміна аерації/циркуляції	<2 або >16 мг/л
Рівень Е-1/FPBR	Lmin-Lmax	LE-1, LE-2	Н-1, зупинка насосів	сухий хід
Оптична щільність OD	за рецептом культури	OD-1	Запуск збору/розведення	OD вище допустимої каламутності
Витрата газу	25-100 л/хв для 500 л	FT-1	ПЧ/клапан компресора	відсутність потоку

1.5. Висновки до розділу

У розділі встановлено, що для теми дипломного проєкту доцільно використовувати закритий плоскопанельний фотобіореактор, оскільки він забезпечує найкращу керованість освітлення, температури, рН, газообміну та санітарного стану культури.

Базовою культурою прийнято *Arthrospira platensis* DHR 20, оскільки обрана стаття містить експериментальні дані саме для FPBR на ACWW з оцінкою біомаси, ліпідів, CO₂-фіксації та біоре mediaції. Автоматизація повинна підтримувати не лише біологічні уставки, а й енергоефективний режим роботи насосів, компресорів, LED-панелей і термостатування.

						Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Опис технологічної схеми установки культивування

Пілотна установка FPBR-500 складається з резервуара ACWW E-1, дозувального насоса Н-1, блока з десяти плоскопанельних фотобіореакторів ПФБР -1... ПФБР -10, двох груп LED-освітлення ОС-1/ОС-2, системи аерації з основним і резервним компресорами КА-1/КА-2, циркуляційних насосів Н-2/Н-3, контуру теплоносія з насосом Н-4, теплообмінника ТО-1, чилера ХМ-1, центрифуги ЦФ-1, сушарки СШ-1, екстрактора ЕК-1 та шафи автоматики ША-1.

Стічна вода після анаеробного оброблення надходить у резервуар E-1. Насос Н-1 дозує підживлення в реакторний контур. Суспензія циркулює через панелі ПФБР, де під дією LED-випромінювання, CO₂ та поживних речовин відбувається фотосинтетичний ріст культури. Аерація забезпечує перемішування, подачу вуглецю та десорбцію надлишку O₂. Після досягнення заданої оптичної густини частину суспензії відбирають для центрифугування. Фугат може повертатися в систему після контролю якості, а концентрована біомаса висушується і спрямовується на екстракцію ліпідів.

Подальший етап отримання біопалива включає екстракцію олійної фракції та переестерифікацію тригліцеридів метанолом у присутності каталізатора. У межах цього проєкту детально автоматизуються стадія культивування і підготовчий downstream-блок, а хімічна стадія синтезу FAME описується як технологічне продовження.

						Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

m

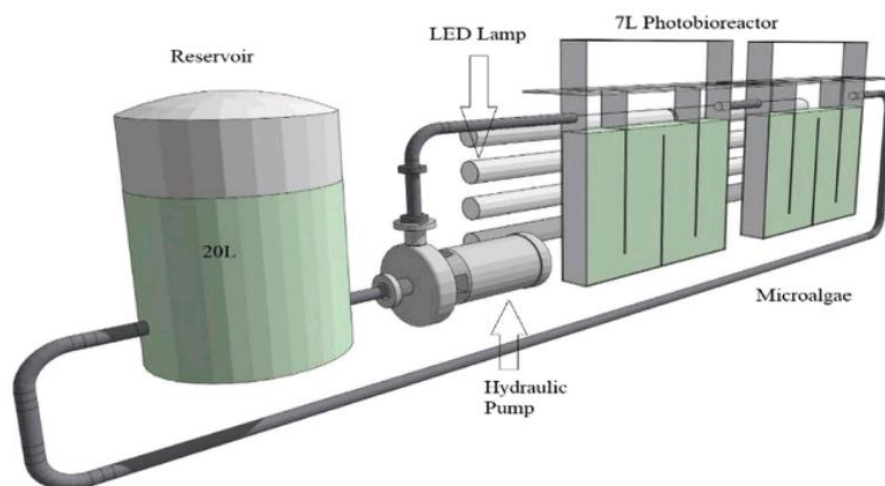


Рисунок 2.1 – Приклад лабораторного контуру культивування: резервуар, насос, LED-лампи та фотобіореактор

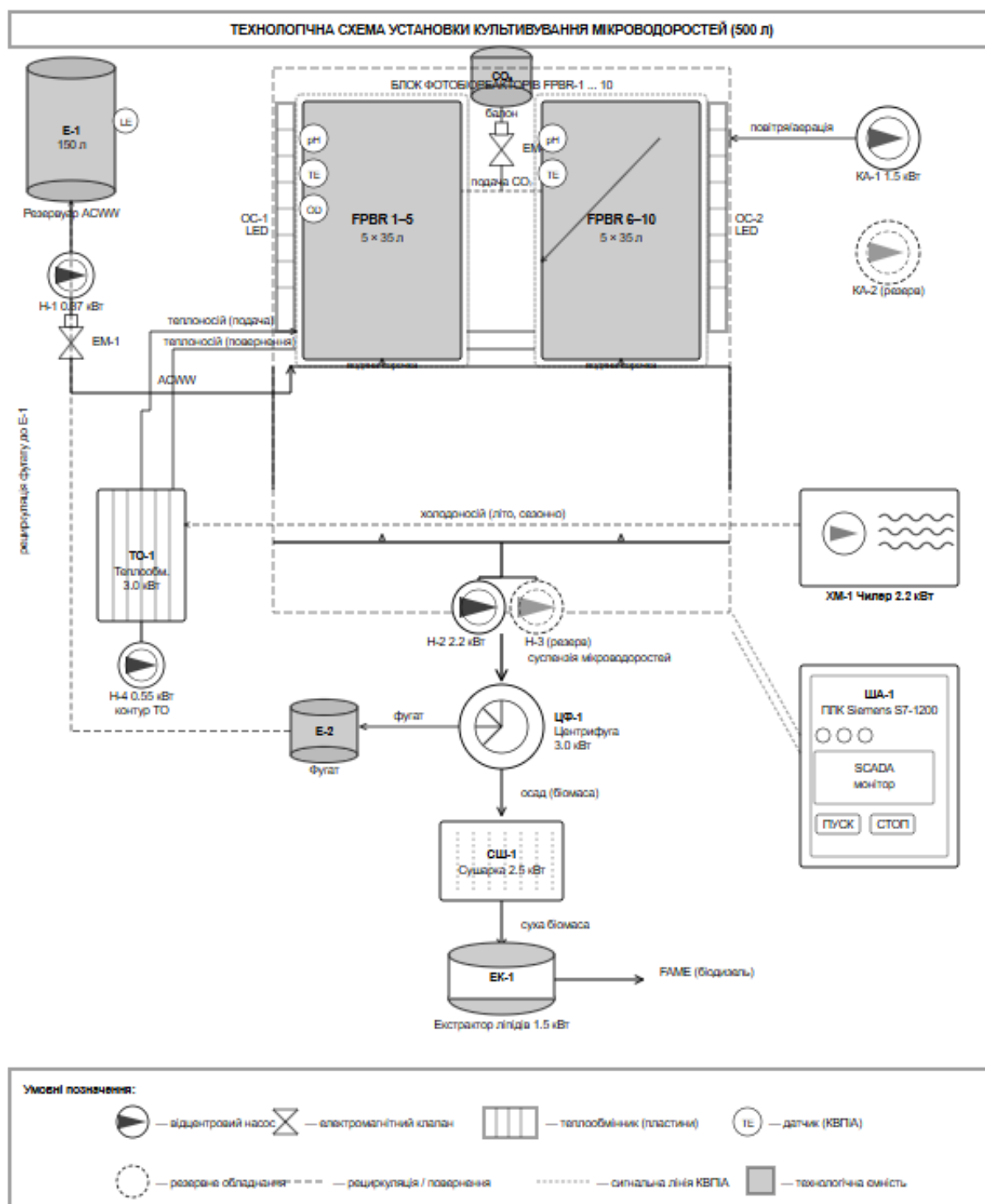


Рисунок 2.2 – Технологічна схема установки культивування мікробіодоростей 500 л, використана як базова схема проекту

2.2. Розрахунок фотобіореакторної установки 500 л

Згідно з вихідною технологічною схемою, масштабування прийнято від дослідного модуля до пілотної установки: 10 панелей ПФБР по 35 л і резервуар на 150 л. Загальний робочий об'єм: $V_{\text{заг}} = 10 \cdot 35 + 150 = 500 \text{ л} = 0,5 \text{ м}^3$. Робочий об'єм реакторних панелей становить 350 л, що дорівнює 70 % загального об'єму. Резервуар виконує функції буферного об'єму, змішування підживлення, компенсації випаровування та гідравлічного згладжування.

Якщо прийняти напівбезперервний режим із добовим підживленням 15 % від загального об'єму, то добова подача АСWW становитиме $Q_{\text{доб}} = 0,15 \cdot 500 = 75 \text{ л/добу}$. Такий режим є помірним для пілотної установки й не виходить за межі логіки статті Mattos et al., де вивчали різні фази внесення субстрату [4].

Питомий газовий режим для фотобіореакторів часто задають у **vvm** (*volume of gas per volume of liquid per minute*) — тобто як кількість об'ємів газу, що подається за одну хвилину на один об'єм культуральної рідини. Для пілотної фотобіореакторної установки приймається діапазон **0,05–0,2 vvm**, що відповідає м'якому режиму аерації та подачі CO₂ без надмірного механічного впливу на клітини мікроводоростей. Тоді витрата газу становить $Q_{\text{газ}} = 0,05 \dots 0,2 \cdot 500 = 25 \dots 100 \text{ л/хв}$. Основний компресор КА-1 має забезпечувати робочу витрату, а КА-2 встановлюється як резервний і підключається до іншої секції шин.

Циркуляція має забезпечувати щонайменше 1–2 повні обміни реакторного об'єму за годину. Для $V_{\text{заг}} = 500 \text{ л}$ це становить 0,5–1,0 м³/год. Насос Н-2 прийнято основним, Н-3 - резервним. Частотне регулювання дозволяє зменшувати витрати електроенергії в нічному або підтримувальному режимах.

						Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Розрахункові параметри пілотної установки FPBR-500

Показник	Формула/прийняте значення	Результат
Об'єм панелей FPBR	$10 \cdot 35$ л	350 л
Об'єм резервуара	Е-1	150 л
Загальний робочий об'єм	$350 + 150$	500 л
Частка реакторного блока	$350/500$	70 %
Добове підживлення у напівбезперервному режимі	$0,15 \cdot 500$	75 л/добу
Витрата аераційного газу	$0,05-0,2$ vvm	25-100 л/хв
Циркуляція суспензії	1-2 об'єми/год	0,5-1,0 м³/год
Уставка температури	прийнято для приміщення	28 °C
Уставка PAR	за даними огляду та статті	150-250 мкмоль/(м²·с)

2.3. Матеріальний баланс процесу отримання біопалива

Матеріальний баланс виконано для пілотної установки об'ємом 500 л. За базову об'ємну продуктивність прийнято $P_v = 0,74$ г/(л·добу), що відповідає найбільш продуктивній фазі IV у статті Mattos et al. [4]. Тоді теоретичний добовий приріст сухої біомаси становить: $G_{\text{біом}} = P_v \cdot V = 0,74 \cdot 500 = 370$ г/добу.

Максимальна концентрація сухої біомаси у статті становила 5,72 г/л. Для об'єму 500 л це відповідає партійному запасу сухої біомаси $G_{\text{max}} = 5,72 \cdot 500 = 2860$ г. У реальній установці значення буде нижчим або вищим залежно від ступеня розведення, режиму відбору, прозорості середовища та стану культури.

Для ліпідної продуктивності приймається 0,172 г/(л·добу). Тоді добове утворення ліпідної фракції становить $G_{\text{ліп}} = 0,172 \cdot 500 = 86$ г/добу. При коефіцієнті перетворення ліпідів у FAME $\eta = 0,95$ очікувана маса біодизеля становить $G_{\text{fame}} = 81,7$ г/добу. Це не промисловий показник, а пілотний розрахунок для демонстрації технології та налаштування автоматизованого процесу.

Біофіксація CO₂ за показником 1213,5 мг/(л·добу) становить $G_{CO_2} = 1,2135 \cdot 500 = 606,8$ г/добу. Цей параметр важливий для оцінки ефективності газової системи та її екологічного впливу. Автоматика повинна не просто подавати CO₂, а дозувати його залежно від pH та газового балансу, щоб уникнути втрат у вихідному газі.

Таблиця 2.2 – Матеріальний баланс пілотного процесу за добу

Потік/продукт	Розрахунок	Значення	Призначення/коментар
Підживлення ACWW	$0,15 \cdot 500$ л	75 л/добу	Подача насосом Н-1 за рецептом
Приріст сухої біомаси	$0,74 \cdot 500$ г	0,370 кг/добу	Потенційна сировина для downstream-блока
Максимальний запас біомаси в партії	$5,72 \cdot 500$ г	2,86 кг	Оцінка партійного збору
Ліпідна фракція	$0,172 \cdot 500$ г	0,086 кг/добу	Сировина для FAME
FAME-біодизель	$0,086 \cdot 0,95$ кг	0,082 кг/добу	Пілотний вихід
Знежирений залишок	$0,370 - 0,086$ кг	0,284 кг/добу	Біодобриво/утилізація після контролю
Біофіксація CO ₂	$1,2135 \cdot 500$ г	0,607 кг/добу	Оцінка газового балансу
Фугат після ЦФ-1	залежить від концентрації	повернення або утилізація	Потрібний контроль якості

2.4. Вибір основного технологічного обладнання

Вибір обладнання виконано з урахуванням наданої технологічної схеми та необхідності рівномірного розподілу електричного навантаження. Основні агрегати мають резервні пари або технологічні заміни. Компресор КА-2 і насос Н-3 у нормальному режимі перебувають у резерві, але підключені до іншої секції шин, щоб відмова секції I не зупинила мінімальну аерацію та циркуляцію.

Освітлення є найбільшим електричним навантаженням і головним технологічним чинником. Тому LED-панелі поділено на дві групи: ОС-1 і ОС-2, по 5 панелей. У нормальному режимі обидві групи працюють за уставкою PAR, а при аварійному живленні може бути залишена половинна освітленість для підтримання культури.

Центрифуга, сушарка та екстрактор є періодичними споживачами. Їх роботу доцільно блокувати з аварійним режимом живлення, щоб у разі відмови одного трансформатора пріоритет отримували культура, аерація, циркуляція, температура і автоматика.

Таблиця 2.3 – Перелік основного електрифікованого технологічного обладнання

№	Поз.	Найменування	К-ть	Рном, кВт	cosφ	Режим
1	ОС-1, ОС-2	LED-фітопанелі освітлення	10	1,50	0,95	цілодобово/ регульовано
2	КА-1	Компресор аерації основний	1	1,50	0,80	цілодобово
3	КА-2	Компресор аерації резервний	1	1,50	0,80	резерв
4	Н-1	Дозувальний насос АСWW	1	0,37	0,82	періодично
5	Н-2	Циркуляційний насос основний	1	2,20	0,82	цілодобово
6	Н-3	Циркуляційний насос резервний	1	2,20	0,82	резерв
7	Н-4	Насос контуру теплоносія	1	0,55	0,82	цілодобово
8	ТО-1	Теплообмінник/електро нагрів	1	3,00	0,95	сезонно
9	ХМ-1	Чилер	1	2,20	0,82	сезонно
10	ЦФ-1	Центрифуга сепарації	1	3,00	0,85	періодично
11	СШ-1	Сушарка ліофільна	1	2,50	0,95	періодично
12	ЕК-1	Екстрактор ліпідів	1	1,50	0,85	періодично
13	ША-1	Шафа автоматики	1	0,50	0,85	цілодобово
14	ЕМ-1...ЕМ-4	Електромагнітні клапани	4	0,05	0,70	періодично
-	-	Встановлена потужність	-	36,22	-	-

2.5. Висновки до розділу

Розроблено технологічний опис пілотної установки FPBR-500 та встановлено основні розрахункові параметри: робочий об'єм — 500 л, реакторний блок — 350 л, резервуар — 150 л, добове підживлення — 75 л/добу, витрата аераційного газу — 25–100 л/хв, циркуляція — 0,5–1,0 м³/год.

За експериментальними даними статті Mattos et al., очікуваний добовий приріст сухої біомаси становить близько 0,37 кг/добу, ліпідна фракція — 0,086 кг/добу, FAME — близько 0,082 кг/добу, а біофіксація CO₂ — близько 0,607 кг/добу. Отримані значення використовуються як базові для оцінки технологічної ефективності автоматизованого режиму.

						Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

3.1. Категорія надійності та структура живлення

Фотобіореакторна установка не належить до споживачів, відключення яких створює безпосередню небезпеку для життя людей, але перерва живлення може призвести до втрати культури, порушення біоремедіації, анаеробних процесів у середовищі та втрат дослідних даних. Тому для критичних споживачів — ПЛК/SCADA, датчиків, компресора, циркуляційного насоса та частини освітлення — передбачається підвищена надійність живлення за схемою двох трансформаторів і АВР.

Нормальний режим: трансформатор Т1 живить секцію І шин 0,4 кВ, трансформатор Т2 — секцію ІІ. Секційний вимикач QВ розімкнений. У разі відмови одного трансформатора автоматика АВР вимикає пошкоджену секцію, закриває технологічно некритичні лінії і дозволяє живлення критичних споживачів від справного трансформатора через секційний вимикач. Повна одночасна робота всіх downstream-споживачів у аварійному режимі не передбачається.

Для встановлення приймається КТП 10/0,4 кВ із двома сухими або масляними трансформаторами по 40 кВА. Така потужність забезпечує робоче навантаження кожної секції близько 20 кВА з резервом на пускові струми, старіння обладнання і подальше розширення системи.

3.2. Розрахунок електричних навантажень

Розрахунок виконується за встановленою потужністю та коефіцієнтом потужності. Для кожного електроприймача: $S = P/\cos\varphi$, $Q = P \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\cos\varphi))$. Для груп, які працюють у резерві або сезонно, у таблиці наведено встановлені значення; експлуатаційне навантаження уточнюється коефіцієнтом одночасності у SCADA-регламенті.

						Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Розподіл електричних навантажень між двома секціями шин

Секція	Електроприймач	Розрахунок Р	Р, кВт	cosφ	S, кВА
I	ОС-1 LED 1-5	5·1,5	7,50	0,95	7,89
I	КА-1 основний компресор	1·1,5	1,50	0,80	1,88
I	Н-2 основний циркуляційний насос	1·2,2	2,20	0,82	2,68
I	Н-1 дозування АСWW	1·0,37	0,37	0,82	0,45
I	ТО-1 нагрів	1·3,0	3,00	0,95	3,16
I	ЦФ-1 центрифуга	1·3,0	3,00	0,85	3,53
I	ЕМ-1/ЕМ-2 та 1/2 ША	0,10+0,25	0,35	0,80	0,44
I	Разом по секції I	-	17,92	0,904	19,83
II	ОС-2 LED 6-10	5·1,5	7,50	0,95	7,89
II	КА-2 резервний компресор	1·1,5	1,50	0,80	1,88
II	Н-3 резервний насос	1·2,2	2,20	0,82	2,68
II	Н-4 насос теплоносія	1·0,55	0,55	0,82	0,67
II	ХМ-1 чилер	1·2,2	2,20	0,82	2,68
II	СШ-1 сушарка	1·2,5	2,50	0,95	2,63
II	ЕК-1 екстрактор	1·1,5	1,50	0,85	1,76
II	ЕМ-3/ЕМ-4 та 1/2 ША	0,10+0,25	0,35	0,80	0,44
II	Разом по секції II	-	18,30	0,896	20,42
Σ	Загалом	-	36,22	0,900	40,24

Отриманий розподіл є практично симетричним: секція I має 17,92 кВт і 19,83 кВА, секція II - 18,30 кВт і 20,42 кВА. Різниця за активною потужністю становить 0,38 кВт, тобто приблизно 1,05 % від сумарної встановленої потужності. Це відповідає вимозі рівномірного розподілу навантажень.

Номинальний струм трансформатора 40 кВА на стороні 0,4 кВ: $I_n = S/(\sqrt{3} \cdot U) = 40\,000/(1,732 \cdot 400) = 57,7$ А. Розрахункові струми секцій: $I_{\text{сек.I}} = 19,83 \cdot 1000/(1,732 \cdot 400) = 28,6$ А; $I_{\text{сек.II}} = 20,42 \cdot 1000/(1,732 \cdot 400) = 29,5$ А. Нормальне завантаження кожного трансформатора не перевищує 52 %, що забезпечує резерв для пусків і додаткових датчиків.

3.3. Двотрансформаторна схема та розподіл навантаження

Для забезпечення підвищеної надійності електропостачання фотобіореакторної установки прийнято двотрансформаторну схему живлення з двома секціями шин 0,4 кВ. У нормальному режимі кожна секція живиться від окремого трансформатора, а секційний вимикач перебуває у розімкненому стані. Основні та резервні електроприймачі розподілено між секціями таким чином, щоб у разі відмови одного трансформатора зберігалася можливість підтримання мінімально необхідних технологічних функцій: циркуляції, аерації, часткового освітлення та роботи системи автоматизації.

Прийнята двотрансформаторна схема електропостачання з рівномірним розподілом навантаження між секціями наведена на рисунку 3.1.

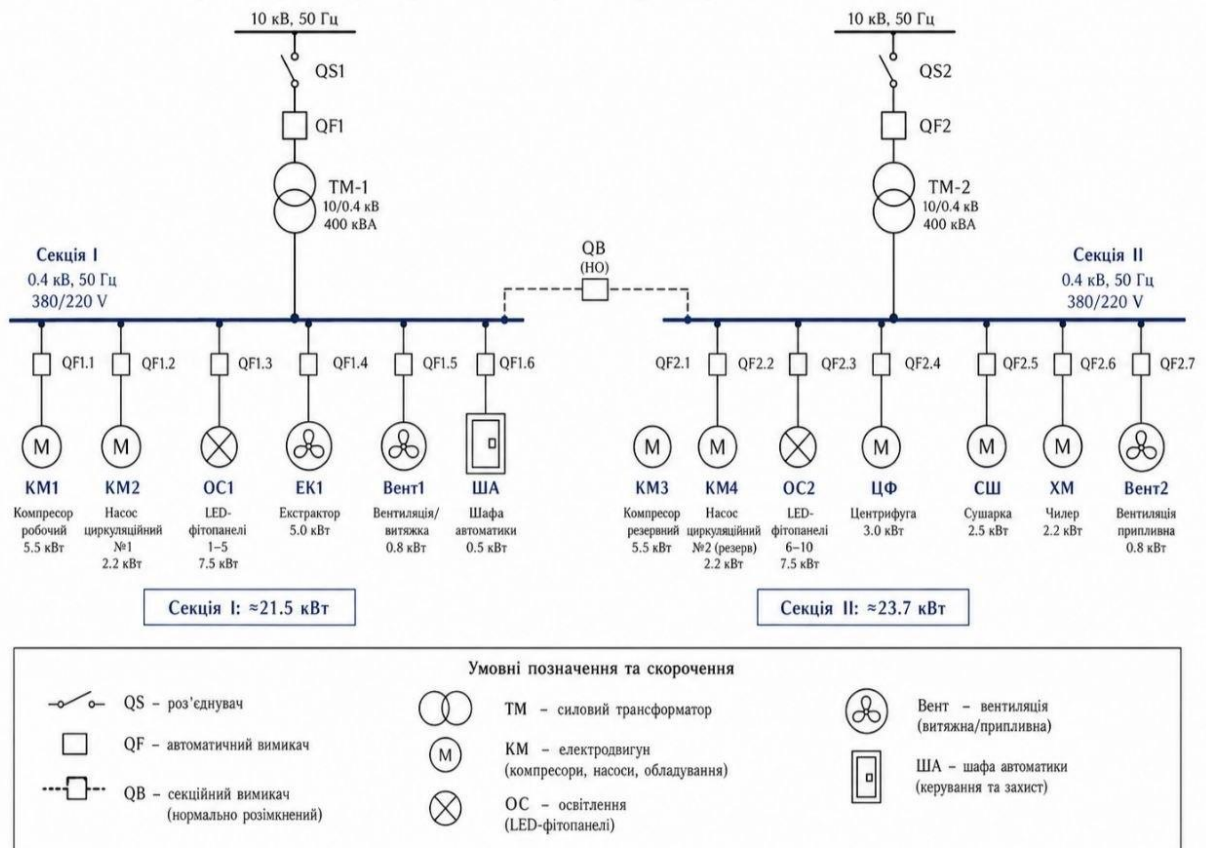


Рисунок 3.1 – Двотрансформаторна схема електропостачання FPBR-500 з рівномірним розподілом навантаження

На рисунку 3.1 наведено прийняту однолінійну схему. Вона відповідає принципу, заданому у вихідному ескізі: живлення від двох трансформаторів, секціонування шин 0,4 кВ, окремі відхідні лінії до електроприймачів та рівномірне розміщення технологічних агрегатів між секціями.

Ключове проєктне рішення полягає у рознесенні основних і резервних механізмів: КА-1 та Н-2 підключено до секції I, КА-2 та Н-3 - до секції II. Якщо основний компресор або насос втрачає живлення разом із секцією I, резервний агрегат фізично залишається на іншій секції. LED-освітлення поділено на дві групи по 7,5 кВт, що зменшує перекид і дозволяє підтримувати половинне освітлення у аварійному режимі. Шафа автоматики підключається через UPS 1 кВА з подвійним живленням або через АВР малого навантаження від двох секцій. Це забезпечує коректне завершення технологічного циклу, реєстрацію аварії та керування блокуваннями навіть за короткочасної просадки напруги.

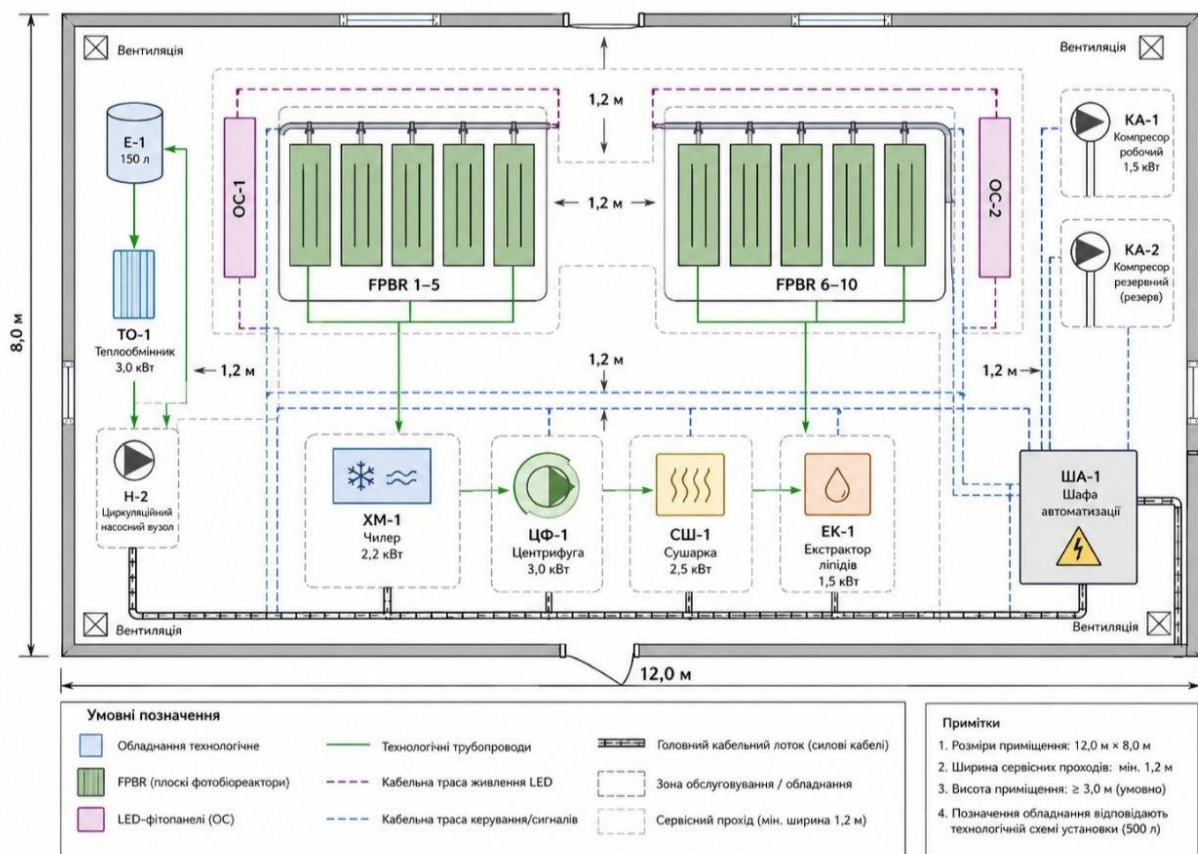
3.4. Розрахунок освітлення та план приміщення

Приміщення для пілотної установки прийнято розмірами 12 м x 8 м x 3,2 м. Реакторний блок розміщено в центральній частині з проходами для обслуговування не менше 1 м. LED-панелі розміщуються з двох боків кожного FPBR, що зменшує світлову тінь і забезпечує регульовану інтенсивність. Живлення груп ОС-1 і ОС-2 виконано з різних секцій шин.

Електрична потужність освітлення становить $10 \cdot 1,5 = 15$ кВт. При поділі на дві трифазні групи по 7,5 кВт розрахунковий струм однієї групи: $I = 7500 / (\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,95) = 11,4$ А. Для групового живлення приймаються мідний кабель ВВГнг-LS $5 \times 2,5$ мм² та автоматичний вимикач С16 А. Регулювання яскравості здійснюється через драйвери 0–10 В або DALI/Modbus-шину з обмеженням максимального PAR.

						Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Біологічно освітлення може працювати у фотоперіоді 16:8 або 18:6. Електричне обладнання розраховане на тривалий режим, оскільки в пусковий і дослідний період можливий цілодобовий режим або зміщення фотоперіоду.



29

Рисунок 3.2 – План приміщення, розміщення ПФБР, LED-панелей і кабельних трас

3.5. Вибір кабелів, захисних апаратів і уставок

Кабелі вибираються за допустимим тривалим струмом, умовами прокладання, механічною міцністю, падінням напруги і вимогами пожежної безпеки. Для приміщення з біотехнологічним обладнанням приймаються кабелі з негорючою оболонкою типу ВВГнг-LS або еквівалентними. Силові та сигнальні кабелі прокладаються в окремих лотках із перетином під прямим кутом і заземленням металевих конструкцій.

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	30

Для електродвигунів насосів і компресорів доцільно використовувати автоматичні вимикачі захисту двигуна або частотні перетворювачі з тепловою моделлю двигуна. Для LED-груп — автоматичні вимикачі характеристик С.

Для шафи автоматики — окремий автомат В6, UPS і захист від імпульсних перенапруг. Прийняті типи кабелів, номінали автоматичних вимикачів та уставки захисту наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Вибір кабельних ліній та захисних апаратів

Лінія	Р, кВт	Ірозр, А	Довжина, м	Кабель	Захист	ΔU , %
Т1 - секція І ГРЩ	20 кВА	29	18	ВВГнг-LS 5х6 мм ²	МССВ 80 А, Ir=63 А	0,9
Т2 - секція ІІ ГРЩ	20 кВА	30	18	ВВГнг-LS 5х6 мм ²	МССВ 80 А, Ir=63 А	0,9
ОС-1 LED 1-5	7,5	11,4	22	ВВГнг-LS 5х2,5 мм ²	МСВ С16	1,3
ОС-2 LED 6-10	7,5	11,4	22	ВВГнг-LS 5х2,5 мм ²	МСВ С16	1,3
КА-1/КА-2	1,5	3,4	25	ВВГнг-LS 5х1,5 мм ²	МРСВ 4-6,3 А	0,7
Н-2/Н-3	2,2	4,7	25	ВВГнг-LS 5х2,5 мм ²	МРСВ 6,3-10 А або ПЧ	0,5
ТО-1 нагрів	3,0	4,6	20	ВВГнг-LS 5х2,5 мм ²	МСВ С16 + термостат	0,4
ХМ-1 чилер	2,2	4,7	26	ВВГнг-LS 5х2,5 мм ²	МСВ С16/МРСВ	0,6
ЦФ-1	3,0	6,0	18	ВВГнг-LS 5х2,5 мм ²	МСВ С16 + блокування кришки	0,5
ША-1	0,5	2,3	15	ВВГнг-LS 3х1,5 мм ²	МСВ В6 + UPS	0,2

3.6. Розрахунок струмів короткого замикання

Орієнтовний струм трифазного короткого замикання на шинах 0,4 кВ одного трансформатора визначимо за відносною напругою короткого замикання $u_k = 4 \%$.

Номінальний струм трансформатора: $I_n = 57,7 \text{ А}$. Тоді $I_{k3} \approx I_n / u_k = 57,7 / 0,04 = 1443 \text{ А}$. У нормальному режимі секційний вимикач розімкнений, тому кожна секція живиться від одного трансформатора.

З урахуванням зменшення струму на кінцях кабельних ліній через опір провідників струми КЗ будуть нижчими. Для забезпечення надійного вимкнення приймаються автоматичні вимикачі з граничною вимикальною здатністю не менше 6 кА для відхідних ліній і 25 кА для ввідних вимикачів ГРЩ. Обрані значення мають достатній запас відносно розрахункового I_{k3} .

Перевірка чутливості захисту для довгих ліній виконується на стадії робочого проекту з урахуванням фактичних довжин, схеми заземлення та петлі «фаза–нуль». У цьому дипломному проєкті довжини прийняті за планом приміщення, тому результати мають навчально-проєктний характер.

Таблиця 3.3 – Орієнтовні параметри короткого замикання та вибір вимикачів

Вузол	Стр, кВА	U, В	u_k , %	I_{k3} , кА	Прийнята вимикальна здатність
Шини секції I	40	400	4	1,44	МССВ 25 кА
Шини секції II	40	400	4	1,44	МССВ 25 кА
Групи LED	-	400	-	<1,44	МСВ 6 кА
Насоси/компресори	-	400	-	<1,44	МРСВ/МСВ 6 кА
ША-1	-	230	-	<1,0	МСВ 6 кА + UPS

3.7. Вибір електричних апаратів після розрахунку струмів короткого замикання

Після визначення орієнтовного струму короткого замикання на шинах 0,4 кВ виконують остаточний вибір комутаційних і захисних апаратів. Для проєкту прийнято, що максимальний струм трифазного КЗ на шинах секцій становить $I_{k3} \approx 1,44$ кА. З урахуванням запасу для відвідних і секційних автоматичних вимикачів приймається гранична вимикальна здатність не менше 25 кА, а для відхідних ліній — не менше 6 кА. Такі значення перевищують розрахункові струми КЗ і відповідають вимогам вибору автоматичних вимикачів за вимикальною здатністю [23; 25].

Номінальні струми апаратів приймаються за умовою $I_p \leq I_n \leq I_{доп}$, де I_p - розрахунковий струм навантаження, I_n - номінальний струм апарата, $I_{доп}$ - допустимий тривалий струм кабелю. Для двигунів насосів, компресорів і центрифуг додатково враховано пускові струми, тепловий захист електродвигуна та можливість частотного регулювання. Для ліній керування і шафи автоматики передбачено окремий автоматичний вимикач, UPS та захист від імпульсних перенапруг [14; 15; 16; 17; 24; 26; 27].

Ввідні апарати Т1 і Т2 обрано з урахуванням номінального струму трансформатора 57,7 А. Приймається автоматичний вимикач МССВ 3Р на 80 А з регульованою тепловою уставкою $I_r = 63$ А і вимикальною здатністю I_{cu} не менше 25 кА. Секційний вимикач QВ приймається аналогічного класу, оскільки в аварійному режимі через нього може житися частина критичних споживачів іншої секції. Для груп LED, насосів, компресорів і допоміжного обладнання прийнято апарати, наведені у таблиці 3.4.

Прийняті апарати є типовими для навчально-проєктного рішення. У робочому проєкті їх марка та точні уставки уточнюються за каталогами виробників після перевірки фактичних довжин кабелів, схеми заземлення, температурних умов, селективності та паспортних струмів електродвигунів.

						Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.4 – Вибір електричних апаратів після розрахунку струмів короткого замикання

№	Лінія / апарат	Розрахункова умова	Прийнятий апарат	Обґрунтування вибору
1	Ввід Т1, ввід Т2 0,4 кВ	$I_{тр} = 57,7 \text{ А}; I_{k3} \approx 1,44 \text{ кА}$	МССВ 3Р 80 А, $I_r = 63 \text{ А}, I_{cu} \geq 25 \text{ кА}$	I_n апарата більший за номінальний струм трансформатора, I_{cu} має запас відносно I_{k3} .
2	Секційний вимикач QB	Аварійне живлення критичних споживачів секції; $I_{k3} \approx 1,44 \text{ кА}$	МССВ 3Р 80 А, $I_{cu} \geq 25 \text{ кА}$, виконання для АВР	Забезпечує секціонування шин і резервне живлення без перевищення допустимого струму.
3	Групи LED ОС-1, ОС-2	$P = 7,5 \text{ кВт}; I_p \approx 11,4 \text{ А};$ кабель 5х2,5 мм ²	МСВ 3Р С16, $I_{cn} \geq 6 \text{ кА}$	Виконується умова $I_p \leq I_n \leq I_{доп}$; характеристика С враховує пускові струми LED-драйверів.
4	Компресори КА-1, КА-2	$P = 1,5 \text{ кВт}; I_p \approx 3,4\text{-}3,6 \text{ А};$ двигуновий режим	Автомат захисту двигуна 2,5-4 А або ПЧ з вхідним МСВ С10, $I_{cu}/I_{cn} \geq 6 \text{ кА}$	Налаштування теплового захисту виконується за паспортним струмом двигуна.
5	Насоси Н-2, Н-3	$P = 2,2 \text{ кВт}; I_p \approx 4,7\text{-}4,9 \text{ А};$ тривалий режим	Автомат захисту двигуна 4-6,3 А або ПЧ з вхідним МСВ С10, $I_{cu}/I_{cn} \geq 6 \text{ кА}$	Захист обирається з урахуванням пуску, перевантаження та роботи у тривалому режимі.
6	Центрифуга ЦФ-1	$P = 3,0 \text{ кВт}; I_p \approx 6,0\text{-}6,2 \text{ А}$	Автомат захисту двигуна 6,3-10 А, $I_{cu} \geq 6 \text{ кА}$	Діапазон уставки перекиває робочий струм і дозволяє налаштувати тепловий захист.
7	ХМ-1, СШ-1, ЕК-1	$P = 1,5\text{-}2,5 \text{ кВт};$ періодичний режим	МСВ С10-С16, $I_{cn} \geq 6 \text{ кА}$	Номінал уточнюється за паспортним струмом агрегату та перерізом кабелю.
8	ША-1, PLC, SCADA, UPS	$P \approx 0,5 \text{ кВт};$ критичне керування	МСВ В6 1Р+N, UPS 1 кВА, SPD тип 2	Окреме живлення підвищує надійність керування, аварійного завершення циклу й архівування даних.

3.8. Енергетичні показники і заходи енергозбереження

Найбільшу частку енергоспоживання формує LED-освітлення. При повній потужності 15 кВт і тривалості 24 год добове споживання становить 360 кВт·год. Якщо застосувати фотоперіод 16:8 і димування в середньому до 70 %, добове споживання зменшується до $15 \cdot 16 \cdot 0,70 = 168$ кВт·год, тобто більш ніж удвічі. Тому регульоване освітлення з PAR-зворотним зв'язком є основним заходом енергозбереження.

Другий напрям — частотне регулювання насосів і компресорів. Зменшення частоти обертання електродвигуна суттєво знижує потужність вентилятора або насоса. У біологічному процесі не завжди потрібна максимальна витрата газу: за стабільного рН і DO ПЛК може перейти в підтримувальний режим із нижчою витратою.

Третій напрям — теплотехнічна оптимізація. Одночасна робота нагріву та охолодження забороняється логікою ПЛК. LED-панелі встановлюються з Вентиляційним зазором тепло від драйверів відводиться, а уставки температури мають гістерезис і обмеження швидкості перемикання.

Оцінку добового енергоспоживання LED-освітлення у різних режимах наведено в таблиці 3.5.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Таблиця 3.5 – Оцінка добового енергоспоживання у різних режимах

Споживач	Потужність, кВт	Тривалість /коефіцієнт	Енергія, кВт·год/добу	Коментар
LED повна потужність	15,0	24 год	360	Максимальний електричний розрахунок
LED економний режим	15,0	16 год · 0,70	168	ФАВ-регулювання та фотоперіод
КА-1 або КА-2	1,5	24 год · 0,75	27	ПЧ або циклічна робота
Н-2 або Н-3	2,2	24 год · 0,70	37	Циркуляція за рецептом
Н-4, термоконтур	0,55	12 год	6,6	Лише при активному теплообміні
ТО-1/ХМ-1	3,0/2,2	сезонно	10-30	Залежить від приміщення
Downstream-блок	7,0	2 год	14	Періодично, не щодня
ША-1	0,5	24 год	12	Постійно

3.9. Висновки до розділу

Розроблено двотрансформаторну схему 10/0,4 кВ з двома трансформаторами по 40 кВА, секційними шинами та АВР. Навантаження розподілено рівномірно: секція І - 17,92 кВт, секція ІІ - 18,30 кВт.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1. Функціональні вимоги до САК

Система автоматизованого керування (САК) фотобіореактора має підтримувати технологічні параметри у межах, необхідних для росту культури, і водночас захищати обладнання та персонал. Основні функції: автоматичний пуск і зупинка установки; контроль рівня та захист від сухого ходу; стабілізація температури; регулювання рН через CO₂; керування фотосинтетично активне випромінювання та фотоперіодом; контроль концентрація розчиненого кисню і витрати газу; керування основними та резервними насосами/компресорами; запуск збору біомаси за оптичною густиною або таймером; аварійне блокування downstream-блока; архівування трендів і подій.

Система повинна мати режими: «Ручний», «Автоматичний», «Пуск», «Зупинка», «Мийка/CIP», «Аварійна підтримка культури». У ручному режимі оператор може керувати окремими механізмами з екрана НМІ, але критичні блокування - сухий хід, відкрита кришка центрифуги, перегрів, аварійний стоп, мінімальний рівень - залишаються активними.

Оскільки процес є біотехнологічним, важливе архівування даних. Тренди температури, рН, фотосинтетично активне випромінювання, оптична щільність суспензії, концентрація розчиненого кисню, витрати газу, стану насосів і споживання електроенергії дають змогу аналізувати причини зростання або зниження продуктивності та коригувати рецепти культивування. Узагальнену структуру САК фотобіореакторної установки наведено на рисунку 4.1.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

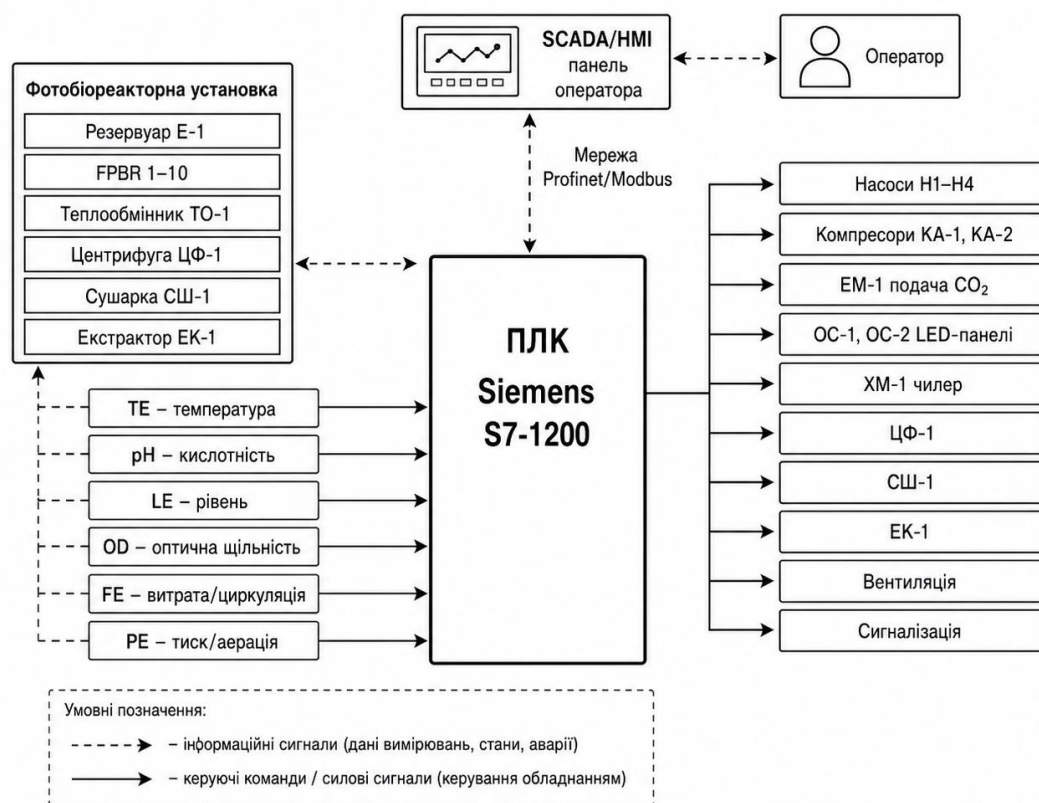


Рисунок 4.1 – Структурна схема САК фотобіореакторної установки

4.2. Структура системи автоматизації

Центральним елементом системи є ПЛК Siemens S7-1200 або еквівалентний контролер з достатньою кількістю аналогових і дискретних модулів. Вимірювальні сигнали 4–20 мА надходять від датчиків температури, рН, концентрація розчиненого кисню, оптична густина, рівня, витрати та тиску. Виконавчі сигнали подаються на частотні перетворювачі насосів і компресорів, LED-драйвери, електромагнітні клапани, пускачі центрифуги, сушарки та екстрактора.

SCADA/HMI забезпечує візуалізацію мнемосхеми, введення уставок, вибір рецепту культури, налаштування фотоперіоду, перегляд аварій, трендів і журналів. Для навчально-пілотного проекту достатньо локальної панелі оператора та ПК з SCADA; для промислового об'єкта доцільне підключення до мережі підприємства з розмежуванням прав доступу.

4.3. Вибір датчиків і виконавчих механізмів

Для забезпечення автоматичного контролю технологічного процесу культивування мікроводоростей необхідно вибрати датчики, які відповідають основним контрольованим параметрам фотобіореакторної установки. До таких параметрів належать температура культуральної суспензії, рН середовища, рівень у резервуарі та реакторному контурі, витрата газової суміші, тиск у лінії аерації, оптична густина культури, концентрація розчиненого кисню та інтенсивність фотосинтетично активного випромінювання.

Вибрані датчики повинні забезпечувати передавання сигналів до ПЛК у стандартних промислових форматах, зокрема 4–20 мА, 0–10 В або у вигляді дискретних сигналів. Це дозволяє підключити їх до аналогових і дискретних входів контролера та використовувати отримані дані для регулювання температури, рН, аерації, циркуляції, освітлення і запуску процесу збору біомаси. Вибір датчиків системи автоматизованого керування наведено у таблиці 4.1.

Після вибору вимірювальних засобів необхідно визначити виконавчі механізми, за допомогою яких система автоматизованого керування впливає на технологічний процес. До основних виконавчих механізмів фотобіореакторної установки належать LED-драйвери освітлення, компресори аерації, дозувальний і циркуляційні насоси, нагрівач, чилер, центрифуга, електромагнітні клапани подачі CO₂ та дренажу.

Керування виконавчими механізмами здійснюється від ПЛК за допомогою дискретних, аналогових або імпульсних сигналів, а також через частотні перетворювачі, пускачі, контактори та промислові інтерфейси зв'язку. Для безпечної роботи установки передбачаються сигнали зворотного зв'язку про стан обладнання та технологічні блокування, які запобігають роботі механізмів у небезпечних або недопустимих режимах. Виконавчі механізми та сигнали керування наведено у таблиці 4.2.

						Арк. 40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1 – Вибір датчиків САК

Позиція	Вимірювана величина	Діапазон	Сигнал	Місце встановлення	Функція
TE-1	Температура суспензії	0-50 °C	4-20 мА	Резервуар/вихід FPBR	PID температури, аварії
pH-1	pH середовища	4-12 pH	4-20 мА/Modbus	Рециркуляційна лінія	Дозування CO ₂ , контроль культури
DO-1	Розчинений O ₂	0-20 мг/л	4-20 мА	Резервуар/контур	Оцінка фотосинтезу та аерації
OD-1	Оптична щільність	0-4 OD	4-20 мА	Байпасна комірка	Запуск збору біомаси
LE-1	Рівень E-1	0-1 м	4-20 мА	Резервуар ACWW	Захист від сухого ходу
PAR-1	Освітленість PAR	0-1000 мкмоль/(м ² ·с)	0-10 В/RS-485	Біля панелей	Регулювання LED
FT-1	Витрата газу	0-150 л/хв	4-20 мА	Лінія аерації	Контроль КА-1/КА-2
PT-1	Тиск повітря/CO ₂	0-0,4 МПа	4-20 мА	Колектор газу	Аварія засмічення/виток у

4.4. Контури регулювання та алгоритми керування

Контур температури реалізується як PID з двома керувальними виходами: нагрівання та охолодження. Для запобігання частим перемиканням передбачено нейтральну зону $\pm 0,5$ °C і мінімальний час роботи агрегату. У разі відмови TE-1 система переходить у безпечний режим: нагрів і охолодження вимикаються, а оператор отримує аварійне повідомлення.

Таблиця 4.2 – Виконавчі механізми та сигнали керування

Позиція	Механізм	Сигнал керування	Зворотний зв'язок	Блокування
ОС-1/ОС-2	LED-драйвери	0-10 В/DALI/Modbus	струм, аварія драйвера	ФАВ >max, перегрів
КА-1/КА-2	Компресори	ПЧ/пускач	робота, аварія, струм	високий тиск у лінії аерації; недостатня витрата газу
Н-1	Дозувальний насос	імпульсний/ПЧ	робота, аварія	мінімальний рівень у резервуарі Е-1; переповнення реакторного контуру
Н-2/Н-3	Циркуляційні насоси	ПЧ/пускач	робота, аварія, струм	мінімальний рівень у контурі; закриті запірні клапани
ТО-1	Нагрів	твердотільне реле/контактор	температура, струм	перевищення температури; відсутність потоку теплоносія
ХМ-1	Чилер	Дискретний / аналоговий	аварія, температура	зниження температури нижче допустимої межі; відсутність потоку теплоносія
ЦФ-1	Центрифуга	пускач	швидкість/аварія	кришка, дисбаланс
ЕМ-1/ЕМ-2	Клапани СО ₂ /дренажу	24 В DC	кінцевий стан	зниження рН нижче допустимої межі; аварія системи подачі газу

Контур рН/CO₂ використовує рН-1 як основний датчик. Якщо рН перевищує встановлений рівень, відкривається клапан подачі CO₂ або збільшується частка CO₂ у газовій суміші. Якщо рН нижче нижньої межі, клапан CO₂ закривається, а подача повітря продовжується для перемішування. Додатково контролюється витрата FT-1, щоб команда CO₂ відповідала фактичному потоку.

Контур ФАВ керує LED-драйверами за сигналом PAR-1 та розкладом фотоперіоду. У період «день» підтримується уставка 150–250 мкмоль/(м²·с). У період «ніч» рівень може бути знижений до 0–10 % для технічного підсвічування або повністю вимкнений. Якщо ФАВ перевищує верхню аварійну межу, драйвери знижують потужність незалежно від ручних команд.

Контур оптичної густини є дискретно-аналітичним. Коли оптична густина перевищує уставку або завершується заданий час культивування, ПЛК пропонує оператору збір або автоматично запускає цикл відбору: зупинка підживлення, стабілізація циркуляції, відкриття лінії на ЦФ-1, центрифугування, повернення фугату, промивка лінії. Рішення про повністю автоматичний відбір залежить від вимог біобезпеки та якості культури.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

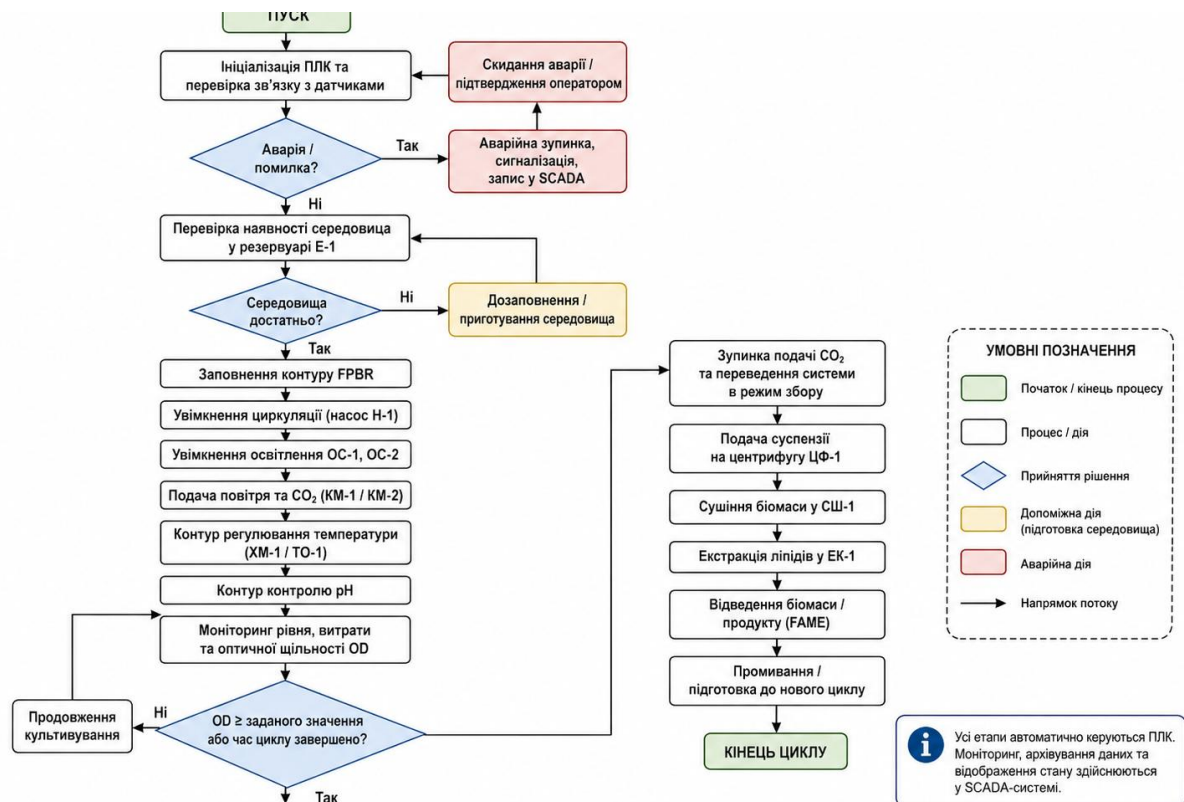


Рисунок 4.2 – Алгоритм автоматичного циклу культивування та збору біомаси

4.5. PLC/SCADA, сигнали, аварії та архівування

Для практичної реалізації САК формується карта вхідних і вихідних сигналів ПЛК. Вона визначає кількість аналогових і дискретних каналів, типи сигналів, адресацію модулів вводу/виводу та аварійні дії, які мають виконуватися незалежно від режиму роботи оператора.

Для реалізації автоматизованого керування технологічним процесом культивування мікроводоростей усі вимірювальні, дискретні та керувальні сигнали повинні бути заведені до ПЛК. Формування карти сигналів необхідне для визначення кількості аналогових і дискретних входів/виходів, вибору модулів розширення, побудови алгоритмів керування та організації відображення параметрів у SCADA-системі. До вхідних сигналів належать дані від датчиків температури, pH, рівня, витрати, тиску, оптичної густини, розчиненого кисню та освітленості.

Вихідні сигнали ПЛК використовуються для керування насосами, компресорами, електромагнітним клапаном CO₂, LED-драйверами, чилером, центрифугою, сушаркою та екстрактором. Орієнтовну карту сигналів ПЛК для фотобіореакторної установки FPBR-500 наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Орієнтовна карта сигналів ПЛК

Тип сигналу	Кількість	Приклади	Резерв	Модуль
AI 4-20 мА	8	TE, pH, DO, OD, LE, FT, PT, провідність	2	SM 1231 AI
AO 0-10 В/4-20 мА	4	LED, клапан CO ₂ , ПЧ насоса, ПЧ компресора	1	SM 1232 AO
DI 24 В	24	стан QF, аварії ПЧ, рівневі реле, аварійний стоп, кришка ЦФ	6	SM 1221 DI
DO 24 В/реле	20	пускатчі, клапани, сигнальні лампи, сирена	4	SM 1222 DO
Ethernet/RS-485	2	SCADA, LED/DALI шлюз, Modbus датчики	-	CPU/CM
Лічильник енергії	2	секція I, секція II	-	Modbus RTU/TCP

Для забезпечення безпечної роботи фотобіореакторної установки система автоматизованого керування повинна не лише підтримувати задані технологічні параметри, а й своєчасно виявляти аварійні ситуації. До таких ситуацій належать вихід температури, pH, тиску, витрати газу, рівня та оптичної густини за допустимі межі, несправність насосів і компресорів, аварія LED-драйверів, відсутність протоку теплоносія, перегрів, спрацювання аварійної зупинки або порушення умов безпечної роботи обладнання.

Після виявлення аварії ПЛК формує відповідне повідомлення на панелі оператора або у SCADA-системі, переводить установку в безпечний режим, зупиняє або блокує окремі виконавчі механізми та записує подію до архіву. Перелік основних аварійних повідомлень і дій системи автоматизованого керування наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Аварійні повідомлення та дії САК

Аварія	Умова	Дія ПЛК	Повідомлення оператору
Низький рівень	$LE < L_{min}$	зупинити Н-1/Н-2/Н-3, дренаж закрити	«Низький рівень. Ризик сухого ходу»
Перегрів	$T > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	вимкнути нагрів, увімкнути ХМ-1, знизити LED	«Перегрів культури»
Низький pH	$pH < 7,8$	закрити CO_2 , продувати повітрям	«pH нижче межі»
Немає газу	$FT < \text{мін. при команді КА}$	перемкнути на резерв КА, аварія	«Відсутня витрата аерації»
Високий DO	$DO > 16\text{ мг/л}$	збільшити повітря/циркуляцію, знизити PAR	«Надлишок кисню»
Аварія секції шин	немає напруги секції	перехід АВР, відключити downstream	«Живлення від резервної секції»
Аварійний стоп	кнопка E-STOP	зупинити механізми, закрити клапани	«Аварійна зупинка»
ЦФ дисбаланс	сигнал ЦФ-1	зупинити ЦФ, заборонити повторний пуск	«Дисбаланс центрифуги»

SCADA повинна відображати мнемосхему установки, тренди за добу/тиждень, журнал аварій, стан енергоспоживання секцій, поточний рецепт культури і режим роботи. Уставки критичних параметрів мають змінюватися лише користувачами з правами технолога або інженера.

Архівування даних рекомендується з періодом 1 хв для повільних біотехнологічних параметрів і 1-5 с для аварійних параметрів електрообладнання. Для аналізу продуктивності важливо зберігати інтегральні показники: добову енергію LED, компресорів, насосів; дозу CO₂; середній PAR; інтеграл OD; об'єм відібраної суспензії.

4.6. Програмна реалізація автоматичного керування

Нижче наведено фрагмент програми ПЛК мовою Structured Text (SCL), який демонструє логіку автоматичного циклу культивування: опитування датчиків, контроль аварій, регулювання температури, pH/CO₂, освітлення PAR та запуск збору біомаси за OD або часом циклу. Код є навчальною моделлю та може бути реалізований у TIA Portal для ПЛК Siemens S7-1200.

Лістинг 4.1 – Фрагмент програми ПЛК для автоматизації процесу культивування

```
// Structured Text / SCL. Автоматичний цикл FPBR-500
// Основні входи: TE, pH, PAR, OD, LE, FT, PT, DO
// Основні виходи: насоси, компресори, CO2-клапан, LED-драйвери, чилер,
нагрів, ЦФ-1, СШ-1, ЕК-1
```

VAR

```
AutoMode      : BOOL;
StartCmd      : BOOL;
StopCmd       : BOOL;
ResetAlarm    : BOOL;
HarvestConfirm : BOOL;
```

```
TE            : REAL; // температура суспензії, °C
pH_Value      : REAL; // кислотність середовища
PAR_Value     : REAL; // мкмоль/(м2*с)
OD_Value      : REAL; // оптична щільність, ум. од.
DO_Value      : REAL; // розчинений кисень, мг/л
FlowGas       : REAL; // витрата газу, л/хв
LevelOK       : BOOL;
PressureOK    : BOOL;
```

						Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

SP_Temp      : REAL := 28.0;
SP_pH        : REAL := 9.20;
SP_PAR       : REAL := 200.0;
SP_OD        : REAL := 1.00;

```

```

TempErr      : REAL;
pHErr        : REAL;
PARErr       : REAL;
LED_Output   : REAL; // 0...100 %
CO2_Output   : REAL; // 0...100 %
PumpSpeed    : REAL; // 0...100 %

```

```

Alarm        : BOOL;
State        : INT; // 0-стоп, 10-пуск, 20-культивування, 30-збір, 40-мийка,
90-аварія

```

```

END_VAR

```

```

// 1. Аварійний контроль

```

```

Alarm := (TE < 20.0) OR (TE > 35.0) OR (pH_Value < 7.8) OR (pH_Value >
10.5)
        OR (NOT LevelOK) OR (NOT PressureOK) OR (FlowGas < 5.0);

```

```

IF ResetAlarm THEN
    Alarm := FALSE;
END_IF;

```

```

IF StopCmd THEN
    State := 0;
ELSIF Alarm THEN
    State := 90;
ELSIF StartCmd AND AutoMode THEN
    State := 10;
END_IF;

```

```

CASE State OF
    0: // СТОП
        PumpSpeed := 0.0;
        LED_Output := 0.0;
        CO2_Output := 0.0;
        // усі виконавчі механізми вимкнені

```

						Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10: // ПУСК І ЗАПОВНЕННЯ

```
IF LevelOK THEN
    PumpSpeed := 60.0;
    State := 20;
END_IF;
```

20: // КУЛЬТИВУВАННЯ

// Контур температури з нейтральною зоною +/-0,5 °C

TempErr := SP_Temp - TE;

IF TempErr > 0.5 THEN

// увімкнути нагрів ТО-1, чилер заблокувати

PumpSpeed := 70.0;

ELSIF TempErr < -0.5 THEN

// увімкнути ХМ-1, нагрів заблокувати

PumpSpeed := 80.0;

ELSE

PumpSpeed := 55.0;

END_IF;

// Контур pH/CO2: CO2 відкривається тільки за підвищеного pH

pHErr := pH_Value - SP_pH;

IF pHErr > 0.05 THEN

CO2_Output := LIMIT(0.0, pHErr * 120.0, 100.0);

ELSE

CO2_Output := 0.0;

END_IF;

// Контур PAR: димування LED 0...100 %

PARErr := SP_PAR - PAR_Value;

LED_Output := LIMIT(0.0, LED_Output + PARErr * 0.05, 100.0);

// Умова переходу на збір біомаси

IF (OD_Value >= SP_OD) OR HarvestConfirm THEN

State := 30;

END_IF;

30: // ЗБІР БІОМАСИ

CO2_Output := 0.0;

LED_Output := 20.0;

PumpSpeed := 50.0;

// відкрити лінію на ЦФ-1, запустити центрифугу, далі СШ-1 та ЕК-1

State := 40;

						Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

40: // ПРОМИВАННЯ / ПІДГОТОВКА ДО НОВОГО ЦИКЛУ
    PumpSpeed := 40.0;
    IF LevelOK THEN
        State := 20;
    END_IF;

90: // АВАРІЯ
    CO2_Output := 0.0;
    LED_Output := 0.0;
    PumpSpeed := 0.0;
    // запис події у SCADA, звукова/світлова сигналізація
END_CASE;

```

У програмі використовується станова модель керування: після пуску система переходить до культивування, підтримує основні уставки та, досягнувши оптичної густини, запускає збір біомаси. У разі аварії CO₂, LED і насоси переводяться у безпечний стан, а подія реєструється у SCADA.

4.7. Імітаційне моделювання роботи контурів САК

Для перевірки логіки регулювання виконано імітаційне моделювання трьох характерних процесів: стабілізації температури, регулювання рН через подачу CO₂ та накопичення оптичної щільності OD до порога збору. Моделювання виконано в навчальному режимі з типовими інерційними ланками та обмеженнями виконавчих механізмів.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

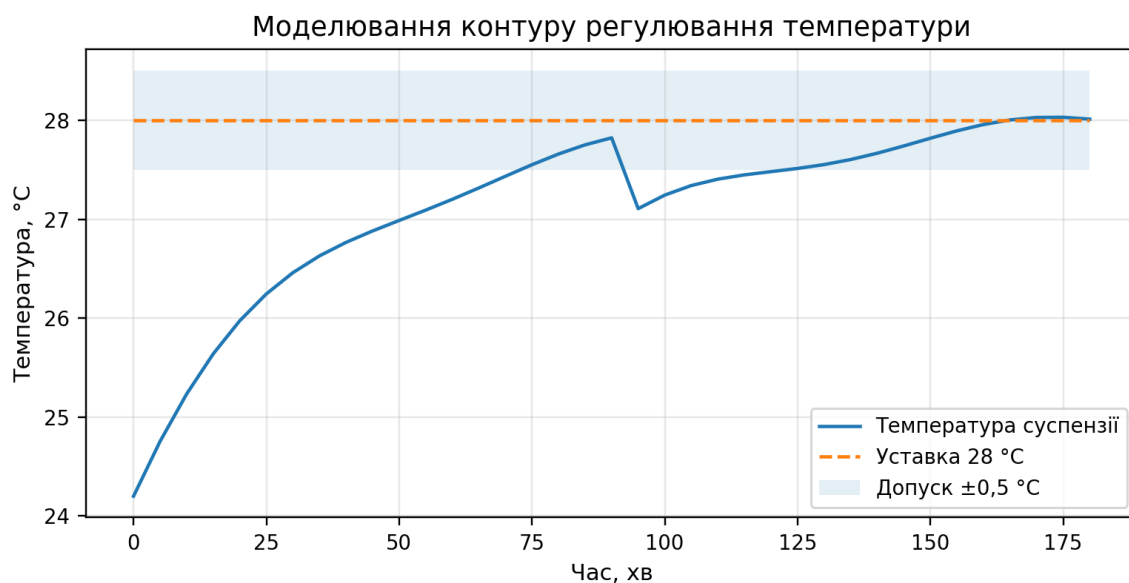


Рисунок 4.3 – Моделювання реакції контуру температури на вихід до уставки 28 °C



Рисунок 4.4 – Моделювання роботи контуру pH/CO₂

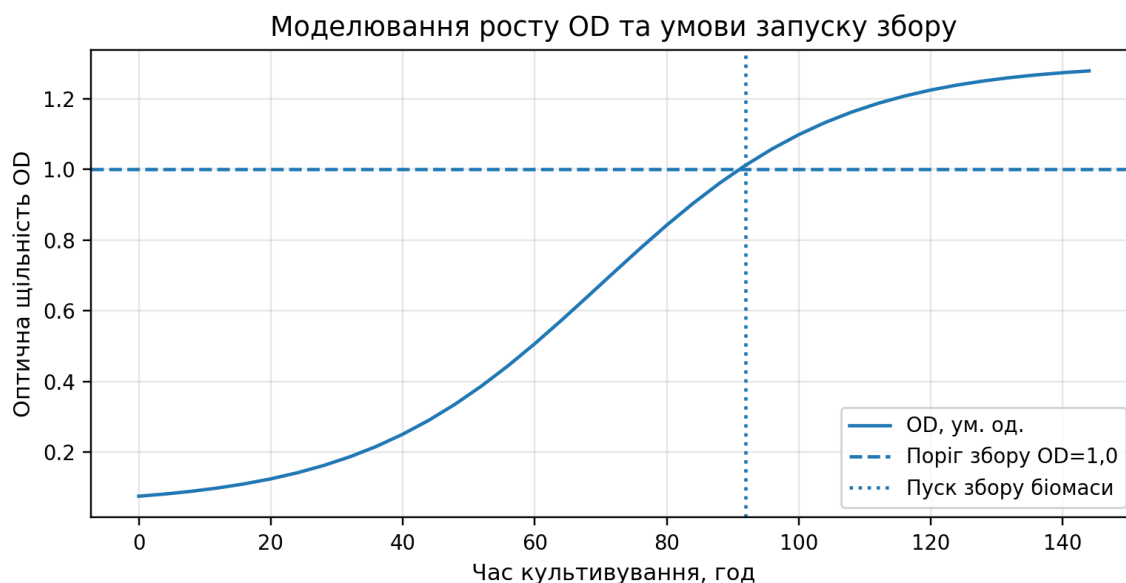


Рисунок 4.5 – Моделювання росту оптичної густини та умови запуску збору біомаси

Отримані графіки показують, що обраний алгоритм забезпечує плавний вихід температури до уставки без одночасного вмикання нагріву та охолодження, дозоване зниження рН через CO₂ та коректне формування умови збору біомаси після досягнення порога OD. У реальній установці параметри PID-регуляторів уточнюються під час пусконаладжувальних випробувань.

4.8. Висновки до розділу

Розроблено структуру САК на базі ПЛК, HMI/SCADA, промислових датчиків і виконавчих механізмів. Передбачено регулювання температури, рН/CO₂, PAR, аерації, циркуляції та OD-керованого збору біомаси.

Система має забезпечувати технологічну стабільність, енергоефективність, реєстрацію параметрів і безпечні блокування. Особливу увагу приділено зв'язку між біологічними уставками та електротехнічними рішеннями: LED-димування, частотне керування насосами/компресорами та АВР критичних споживачів.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Загальна характеристика умов праці оператора фотобіореакторної установки

Пілотна фотобіореакторна установка FPBR-500 належить до лабораторно-виробничих біотехнологічних об'єктів, у яких одночасно працюють електротехнічні, насосні, газові, теплотехнічні, біологічні та допоміжні хімічні системи. Робоче місце оператора передбачає контроль резервуара Е-1, блока плоскопанельних фотобіореакторів FPBR 1–10, LED-освітлення ОС-1/ОС-2, компресорів КА-1/КА-2, насосів Н-1...Н-4, теплообмінника ТО-1, чилера ХМ-1, центрифуги ЦФ-1, сушарки СШ-1, екстрактора ЕК-1 та шафи автоматики ША-1.

Основними трудовими операціями є підготовка поживного середовища, запуск циркуляції, контроль рН, температури, оптичної щільності та рівня, відбір проб, переведення системи у режим збору біомаси, промивання трубопроводів і технологічне обслуговування датчиків. Частина операцій виконується автоматизовано через ПЛК і SCADA, однак оператор контактує з культуральною рідиною, вологими поверхнями, електрообладнанням, газовими лініями CO₂, лабораторним посудом і реагентами downstream-блока.

Метою розділу є визначення небезпечних і шкідливих виробничих факторів, обґрунтування організаційних і технічних заходів захисту, а також встановлення вимог до засобів індивідуального захисту оператора. Розділ складено з урахуванням правил безпеки для хімічних лабораторій, вимог до використання ЗІЗ і практики безпечної роботи з біологічними та хімічними середовищами [1–6].

						Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Небезпеки установки мають комплексний характер. Біологічна складова пов'язана з використанням анаеробно оброблених стічних вод тваринництва (оброблені стічні води тваринництва; анаеробно, культуральної суспензії та фугату. Хімічна складова виникає під час коригування рН, промивання, екстракції ліпідів і роботи з органічними розчинниками. Фізичні фактори включають шум, вібрацію, рухомі частини насосів і центрифуг, нагріті поверхні, вологу підлогу та оптичне випромінювання LED-панелей. Електричні фактори пов'язані з мережею 0,4 кВ, шафами керування, частотними перетворювачами, LED-драйверами та кабельними трасами.

Таблиця 5.1 – Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори фотобіореакторної установки FPBR-500

№	Фактор джерело небезпеки /	Можливі наслідки	Рівень ризику	Заходи захисту
1	АСWW, культуральна рідина, фугат після центрифугування	Контакт із потенційно забрудненими біологічними середовищами, подразнення шкіри, мікробіологічне забруднення робочого місця	Середній	Робота в рукавичках, окулярах або щитку, халаті; закриті ємності; дезінфекція місця відбору проб; заборона приймання їжі в зоні установки
2	Аерозолі під час аерації, промивання, розгерметизації трубопроводів	Потрапляння крапель у очі та на шкіру; забруднення поверхонь	Середній	Закриті контури, бризкозахисні екрани, захисні окуляри непрямої вентиляції або щиток, місцева вентиляція
3	Реагенти для коригування рН, кислоти та луги для промивання	Хімічні опіки, подразнення слизових оболонок, псування обладнання	Середній / високий	Додавання малими порціями, маркування ємностей, SDS-карти, хімічностійкі рукавички, фартух, промивання водою у разі потрапляння на шкіру

№	Фактор джерело небезпеки /	Можливі наслідки	Рівень ризику	Заходи захисту
4	Метанол або інші органічні розчинники в екстракторі ЕК-1	Токсична дія парів, пожежонебезпека, подразнення очей і шкіри	Високий	Використання витяжної шафи або локальної вентиляції, герметизація, заземлення, заборона відкритого полум'я, ЗІЗ для очей та рук, вогнегасник CO ₂ /порошковий
5	CO ₂ у газовій лінії та зоні аерації	Витіснення кисню в повітрі робочої зони, задуха при витоку	Середній	Постійна вентиляція, сигналізатор CO ₂ , редуктор і справні з'єднання, автоматичне закриття клапана ЕМ-CO ₂ при аварії
6	Підвищений вміст O ₂ у вихідному газі при інтенсивному фотосинтезі	Підвищення пожежної небезпеки локально біля вихідних газових ліній	Низький / середній	Відведення газу у вентильовану зону, відсутність джерел займання, контроль витрати й справності вентиляції
7	Електрообладнання 0,4 кВ: ША-1, ГРЩ, LED-драйвери, насоси, компресори	Ураження електричним струмом, коротке замикання, зупинка культури	Високий	Заземлення РЕ, автоматичні вимикачі, ПЗВ/дифзахист для розеткових ліній, IP54 для шаф, блокування кришок, роботи тільки з дозволу відповідальної особи
8	Вологі підлоги, конденсат, проливи середовища або реагентів	Падіння, ковзання, потрапляння рідини на електрообладнання	Середній	Водовідведення, протиковзке покриття, водостійке взуття із закритим носком, негайне прибирання проливів, піддони під ємностями
9	LED-панелі, інтенсивне видиме/синє світло	Напруження зору, засліплення, фотобіологічний дискомфорт	Низький / середній	Екрани, непрямий огляд панелей, попереджувальні знаки, регулювання яскравості, використання окулярів при обслуговуванні відкритих модулів

№	Фактор джерело небезпеки /	Можливі наслідки	Рівень ризику	Заходи захисту
10	Рухомі частини насосів, вентиляторів і центрифуги ЦФ-1	Травмування рук, захоплення одягу, вібрація	Середній	Кожухи, блокування запуску при відкритих кришках, аварійна зупинка, заборона обслуговування під час обертання
11	Нагріті поверхні ТО-1, сушарки СШ-1, трубопроводів теплоносія	Термічні опіки, перегрів робочої зони	Середній	Теплоізоляція, попереджувальні знаки, термостійкі рукавички при обслуговуванні, блокування перегріву
12	Шум і вібрація компресорів, насосів і чилера	Втома, зниження концентрації, дискомфорт	Низький / середній	Віброопори, технічне обслуговування, розміщення компресора в окремій зоні, використання засобів захисту слуху за потреби
13	Скляний або прозорий полімерний корпус FPBR, лабораторний посуд	Порізи при руйнуванні, травмування уламками	Низький / середній	Огляд перед запуском, захисні екрани, рукавички при заміні панелей, заборона роботи з тріснутими елементами
14	Помилки оператора під час перемикання режимів культивування /збору	Переповнення, сухий хід насосів, некерований скид, втрата культури	Середній	SCADA-рецепти, міжрежимні блокування, підтвердження критичних команд, журнал аварій, навчання персоналу
15	Недостатня вентиляція приміщення	Накопичення CO ₂ , запахи ACWW, вологість, корозія контактів	Середній	Припливно-витяжна вентиляція, контроль CO ₂ і вологості, технічне обслуговування вентиляторів, заборона роботи при несправній вентиляції

За результатами аналізу найбільш істотними є біологічні, хімічні, електричні та газові ризики. Саме тому перед електробезпекою та пожежною безпекою у структурі розділу окремо розглядаються біологічні та хімічні небезпеки, оскільки вони безпосередньо визначають вибір ЗІЗ, порядок відбору проб, промивання, знезараження та аварійні дії персоналу.

5.3. Біологічні небезпеки та санітарні заходи

Біологічна небезпека пов'язана з тим, що живильним середовищем є оброблені стічні води тваринництва; анаеробно, тобто анаеробно оброблені стічні води тваринництва. Навіть після попередньої обробки таке середовище не можна вважати стерильним. Потенційними шляхами контакту є бризки під час відбору проб, потрапляння суспензії на руки, забруднення лабораторного посуду, розгерметизація трубопроводів, промивання FPBR і робота з фугатом після центрифугування.

Для зменшення ризику біологічного забруднення процес відбору проб виконують через штатні пробовідбірні крани, а не шляхом відкриття трубопроводів. Проби відбирають у промарковані герметичні контейнери. Після кожного відбору місце контакту протирають дезінфекційним розчином, а використані серветки та одноразові рукавички збирають у контейнер для забруднених відходів. Заборонено торкатися обличчя, телефону, клавіатури або ручок дверей у забруднених рукавичках.

Оператор допускається до роботи тільки після інструктажу щодо біологічних ризиків. На робочому місці повинні бути умивальник, антисептик, паперові рушники, контейнер для використаних ЗІЗ, журнал обліку відбору проб і комплект для локалізації проливів. У разі потрапляння культуральної рідини на шкіру забруднену ділянку негайно промивають водою з милом; у разі потрапляння в очі промивають проточною водою не менше 10–15 хвилин і повідомляють відповідальну особу.

						Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час роботи з біомасою після центрифуги враховується, що концентрат має вищу концентрацію органічних речовин і може швидко псуватися. Його зберігають у закритій тарі, не допускають утворення аерозолі, а сушіння виконують лише при справній вентиляції.

Після завершення зміни поверхні стола, корпуси насосів, зовнішні стінки трубопроводів і ручки арматури очищають від крапель і дезінфікують.

5.4. Хімічні небезпеки та поводження з реагентами

Хімічні небезпеки виникають при коригуванні рН, промиванні контуру, обслуговуванні датчиків, екстракції ліпідів і підготовці біомаси до отримання FAME. До потенційно небезпечних речовин належать кислоти, луги, буферні розчини, промивні реагенти, метанол або інші органічні розчинники, а також каталізатори переестерифікації. Усі реагенти повинні зберігатися в промаркованій тарі з вказанням назви, концентрації, дати приготування та відповідальної особи.

Роботи з леткими розчинниками виконують у витяжній шафі або в зоні з локальним відсмоктуванням. Метанол є токсичною і легкозаймистою речовиною, тому не допускається робота поблизу відкритого полум'я, іскроутворювальних інструментів та нагрітих поверхонь. Ємності з розчинниками відкривають на мінімальний час, після відбору одразу закривають, а відходи збирають окремо в спеціальну тару.

При роботі з кислотами й лугами необхідно використовувати захисні окуляри непрямой вентиляції або щиток у комбінації з окулярами, хімічностійкі рукавички та за потреби фартух. Розчини готують за правилом поступового додавання концентрованого реагенту до води або розчинника відповідно до карти безпеки речовини.

Забороняється змішувати невідомі залишки реагентів, зливати органічні розчинники в каналізацію та залишати промивні розчини без маркування.

						Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Усі місця зберігання хімічних речовин обладнуються піддонами або вторинною тарою, щоб у разі протікання рідина не потрапила на підлогу або кабельні траси. У зоні екстракції повинні бути сорбент, інертний наповнювач, герметичні пакети для забруднених матеріалів і вогнегасник, придатний для гасіння електрообладнання та легкозаймистих рідин.

5.5. Засоби індивідуального захисту оператора

Оператор повинен працювати в рукавичках, захисних окулярах або щитку, лабораторному халаті та водостійкому взутті. Це не формальна вимога, а базовий бар'єр між працівником і культуральною рідиною, реагентами, бризками, вологими поверхнями та механічними факторами. ЗІЗ підбираються не за універсальним принципом, а відповідно до конкретної операції: відбір проби, промивання, робота з розчинником, обслуговування LED-панелі, центрифуги або сушарки.

Для рутинної роботи з культуральною суспензією та ACWW доцільно використовувати одноразові нітрилові рукавички. Нітрил має кращу стійкість до багатьох хімічних речовин порівняно з латексом і зменшує ризик алергічних реакцій. Для промивання, роботи з кислотами, лугами або концентрованими реагентами потрібні не тонкі оглядові рукавички, а довші хімічностійкі рукавички з нітрилу, неопрену, бутилу або PVC залежно від сумісності з речовиною. Підбір матеріалу виконується за картою безпеки SDS і таблицями хімічної стійкості виробника [3].

Рукавички оглядають до початку роботи: не повинно бути розривів, проколів, набухання, липкості або зміни кольору. Одноразові рукавички не миють для повторного використання; їх змінюють після забруднення, пошкодження, переходу від «брудної» операції до роботи з клавіатурою SCADA або документами. Якщо робота пов'язана з можливістю проливу кислоти, лугу чи розчинника, манжета рукавички має перекривати рукав

						Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

халата, а при роботі з біологічно забрудненими середовищами рукав халата доцільно розміщувати поверх манжети так, щоб краплі не стікали всередину.

Для захисту очей під час звичайного огляду достатні захисні окуляри, які щільно прилягають до обличчя та мають бічний захист. За ризику бризок використовують хімічні окуляри з непрямою вентиляцією. Захисний щиток закриває все обличчя від бризок і крапель, але не замінює окуляри:

при роботі з хімічними реагентами або аерозолями щиток застосовують разом із окулярами. Такий підхід відповідає рекомендаціям OSHA щодо використання щитків у поєднанні з окулярами для захисту від бризок [2, 4].

Лабораторний халат повинен бути застебнутий, із довгими рукавами, без вільно звисаючих елементів. Для рутинного культивування придатний бавовняний або змішаний халат, який захищає особистий одяг від бризок. Для робіт із органічними розчинниками та нагрітими поверхнями перевагу надають бавовняному або вогнестійкому лабораторному халату, оскільки синтетичні тканини можуть плавитися під впливом тепла.

Під час промивання або за ризику великого проливу поверх халата використовують водостійкий або хімічностійкий фартух.

Водостійке взуття потрібне через наявність вологих поверхонь, промивання, фугату та можливі проливні дощі. Воно повинно бути закритим, без відкритого носка, з неслизькою підошвою та матеріалом, який можна мити і дезінфікувати. У лабораторній зоні не допускаються сандалі, тканинні кеди або взуття, яке легко вбирає рідину. Для робіт з великим об'ємом рідин доцільні гумові або полімерні закриті черевики/чоботи, а для короткочасних чистих операцій можуть застосовуватися водостійкі бахіли поверх закритого взуття.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Таблиця 5.2 – Рекомендований вибір ЗІЗ для основних операцій оператора

Операція	Рукавички	Захист очей/обличчя	Одяг взуття	Примітка
Огляд установки, робота SCADA контакту рідинами	За потреби одноразові нитрилові	Захисні окуляри при відкритих панелях або LED-модулях	Халат, закрите взуття	Чисті рукавички не використовують для клавіатури після контакту з пробами
Відбір проб культуральної рідини або ACWW	Одноразові нитрилові, після проби заміна	Окуляри непрямої вентиляції	Застебнутий халат, водостійке закрите взуття	Пробовідбірний кран дезінфікують до і після операції
Промивання FPBR, трубопроводів, резервуара	Довгі нитрилові або неопренові	Окуляри + щиток при ризику бризок	Халат + водостійкий фартух, водостійке взуття	Потрібен комплект для локалізації проливів
Коригування рН кислотами або лугами	Хімічностійкі рукавички за SDS	Окуляри непрямої вентиляції + щиток	Халат, фартух, закрите водостійке взуття	Реагенти додаються малими порціями
Екстракція ліпідів із використанням розчинника	Рукавички сумісні з розчинником: нитрил/бутил/неопрен за SDS	Окуляри + щиток при переливанні	Халат, за потреби вогнестійкий; без синтетичного вільного одягу	Робота у витяжній шафі, заборона джерел займання
Обслуговування сушарки СШ-1 або нагрітих вузлів	Термостійкі рукавички поверх чистих захисних за потреби	Захисні окуляри	Халат, закрите взуття	Дотик до нагрітих поверхонь тільки після перевірки температури
Прибирання біологічного проливу	Подвійні нитрилові або довгі хімічностійкі	Окуляри + щиток	Халат, фартух, водостійке взуття	Використати сорбент/дезінфектант, відходи зібрати окремо

Порядок надягання ЗІЗ приймається таким: лабораторний халат або захисний одяг; за потреби — маска/респіратор; захисні окуляри або щиток; рукавички. Така послідовність зменшує ймовірність забруднення відкритих ділянок тіла і відповідає загальним рекомендаціям щодо використання ЗІЗ [5]. Знімання виконують обережно, починаючи з найбільш забруднених елементів, щоб не перенести забруднення на обличчя, одяг або чисті поверхні.

5.6. Електробезпека

Електробезпека розглядається окремо, оскільки установка живиться від мережі 0,4 кВ і містить значну кількість електроприймачів: LED-драйвери, компресори, насоси, чилер, центрифугу, сушарку, екстрактор, ПЛК, датчики та шафу автоматики. Особливістю об'єкта є поєднання електрообладнання з водним середовищем, промиванням, конденсатом і підвищеною вологістю. Це підвищує вимоги до заземлення, ступеня захисту оболонок і організації кабельних трас.

Шафи керування, клемні коробки та LED-драйвери повинні мати ступінь захисту не нижче IP54 у зоні можливих бризок. Кабельні лотки прокладають так, щоб вони не проходили безпосередньо під фланцевими з'єднаннями, дренажними точками і пробовідбірними кранами. Усі металеві корпуси, рами ПФБР, кабельні лотки, корпуси насосів і компресорів приєднуються до захисного провідника датчика тиску. Для розеткових і допоміжних ліній застосовується диференційний захист, а для двигунів — автоматичні вимикачі з тепловим і електромагнітним розчепленням.

Перед проведенням обслуговування електрообладнання виконуються відключення, перевірка відсутності напруги, вивішування заборонного плаката та блокування випадкового ввімкнення. Оператору без групи допуску заборонено відкривати шафу автоматики під напругою, змінювати уставки захисту, підключати тимчасові кабелі та обходити блокування.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Усі аварійні кнопки E-STOP повинні бути розміщені у легкодоступних місцях біля реакторного блока та зони післяреакторної обробки біомаси.

Захист від ураження струмом включає: основну ізоляцію струмоведучих частин; захисне заземлення; автоматичне вимикання живлення при короткому замиканні; диференційний захист у допоміжних лініях; регулярний огляд кабелів; заборону роботи з мокрими руками біля шафи ША-1; винесення електрощитів із зон прямого миття та проливів. Після кожного промивання оператор візуально перевіряє, чи немає вологи на кабельних вводах, корпусах датчиків і роз'ємах.

5.7. Пожежна безпека

Пожежна безпека виділяється в окремий пункт, оскільки джерела пожежної небезпеки відрізняються від факторів електробезпеки. Основними пожежонебезпечними елементами є електрообладнання, кабельні лінії, LED-драйвери, нагріті поверхні сушарки, а також органічні розчинники, які можуть використовуватися під час екстракції ліпідів. Наявність CO₂ у системі аерації не усуває пожежного ризику, оскільки в зоні екстракції можливі пари легкозаймистих речовин, а в зоні фотосинтезу локально підвищується вміст кисню у вихідному газі.

У приміщенні забороняється зберігати розчинники у відкритій тарі, використовувати відкритий вогонь, нагрівати невідомі суміші та залишати без нагляду увімкнені нагрівальні елементи. Запас органічних розчинників на робочому місці обмежують змінною потребою; основний запас зберігають у спеціальній вентильованій шафі.

Горючі відходи, серветки з розчинником і забруднені фільтри збирають у закриту тару.

Для гасіння електрообладнання і розчинників у зоні установки передбачається вуглекислотний або порошковий вогнегасник. Водяні засоби

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

не застосовують для електрообладнання під напругою та речовин, які можуть реагувати з водою.

План евакуації, номер відповідального працівника, місце розташування вогнегасника і порядок дій при пожежі розміщують біля входу до приміщення.

Таблиця 5.3 – Дії персоналу при аварійних ситуаціях

Аварійна ситуація	Першочергова дія	Подальші дії	ЗІЗ / обмеження
Витік CO ₂ або спрацювання сигналізатора CO ₂	Натиснути Е-STOP, залишити зону, увімкнути вентиляцію	Закрити балон/клапан після провітрювання, викликати відповідального	Не входити без провітрювання; не працювати одному
Біологічний пролив ACWW або суспензії	Обмежити зону, одягнути рукавички, окуляри/щиток	Засипати сорбентом, продезінфікувати, відходи зібрати у марковану тару	Подвійні рукавички, фартух, водостійке взуття
Пролив кислоти/лугу	Відійти від бризок, попередити персонал	Нейтралізація лише за інструкцією, промивання ураженої ділянки водою	Окуляри + щиток, хімічностійкі рукавички
Займання розчинника або електрообладнання	Вимкнути живлення, якщо безпечно, повідомити персонал	Застосувати CO ₂ /порошковий вогнегасник, евакуація за потреби	Не гасити водою електрообладнання під напругою
Пошкодження кабелю або корпусу електрообладнання	Не торкатися, вимкнути відповідну лінію	Повідомити відповідального електротехнічного працівника	Роботи тільки після перевірки відсутності напруги
Руйнування панелі FPBR або трубопроводу	Зупинити насоси, перекрити арматуру	Зібрати рідину, вилучити уламки інструментом, продезінфікувати	Рукавички, окуляри/щиток, закрите взуття

5.8. Організаційні заходи безпеки та допуск персоналу

До роботи допускаються особи, які пройшли вступний і первинний інструктаж, ознайомлені з технологічною схемою, знають місце розташування Е-STOP, вогнегасників, вентиляційного вимикача, умивальника, аптечки, контейнерів для відходів і журналу аварій. Для робіт із електрообладнанням потрібен відповідний допуск, а для роботи з хімічними реагентами — знання карт безпеки SDS.

Перед початком зміни оператор перевіряє справність вентиляції, відсутність сторонніх запахів, тиск у газовій лінії, покази датчиків рН, температури, рівня і CO₂, наявність ЗІЗ, стан підлоги та відсутність протікань. Пуск установки не дозволяється при несправному датчику рівня, відсутності вентиляції, пошкодженні кабелю, несправному Е-STOP, витоку газу, тріщинах у FPBR або відсутності необхідних ЗІЗ.

Під час роботи забороняється самовільно змінювати електричні уставки захисту, відкривати шафу автоматики під напругою, обходити аварійні блокування, залишати відкритими ємності з розчинниками, переносити проби без маркування, працювати в одному приміщенні без повідомлення відповідальної особи при операціях з CO₂ або розчинниками. Після закінчення зміни оператор переводить установку в заданий режим, закриває реагенти, видаляє забруднені ЗІЗ, миє руки та фіксує у журналі всі відхилення.

Навчання персоналу повинно включати практичне відпрацювання: надягання і знімання ЗІЗ; відбір проб; локалізацію біологічного проливу; дії при витоку CO₂; зупинку насосів і компресорів; користування вогнегасником; повідомлення відповідальної особи; заповнення журналу аварій. Для нових операторів перед самостійною роботою доцільно передбачити стажування під наглядом досвідченого працівника.

						Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу

У розділі розглянуто умови праці оператора фотобіореакторної установки FPBR-500 та визначено основні небезпечні й шкідливі виробничі чинники. Найбільш суттєвими є біологічні ризики, пов'язані з АСWW і культуральною суспензією, хімічні ризики під час промивання та екстракції, газові ризики через можливий витік CO₂, електричні ризики через мережу 0,4 кВ і фізичні ризики від вологи, рухомих частин, нагрітих поверхонь і LED-освітлення.

Біологічні та хімічні небезпеки винесені перед електробезпекою і пожежною безпекою, оскільки саме вони визначають повсякденний режим роботи оператора, підбір ЗІЗ, порядок відбору проб, промивання та аварійну локалізацію проливів. Вимоги щодо роботи в рукавичках, окулярах або щитку, лабораторному халаті та водостійкому взутті деталізовано за видами операцій, матеріалами ЗІЗ і умовами їх застосування.

Електробезпеку та пожежну безпеку розглянуто як окремі підрозділи. Для електробезпеки передбачено захисне заземлення, автоматичне вимикання живлення, диференційний захист допоміжних ліній, ступінь захисту оболонок не нижче IP54 у зоні можливих бризок, винесення шаф із мокрих зон і блокування випадкового ввімкнення під час обслуговування. Для пожежної безпеки визначено обмеження на зберігання розчинників, заборону джерел займання, необхідність локальної вентиляції та використання CO₂/порошкових вогнегасників.

Запропоновані заходи забезпечують зниження ризику травмування персоналу, забруднення робочої зони, втрати культури і аварійного простою установки. За умови виконання інструктажів, використання належних ЗІЗ, роботи справної вентиляції, контролю CO₂, дотримання електробезпеки та пожежного режиму фотобіореакторна установка може експлуатуватися в навчально-дослідному або пілотному режимі з прийнятним рівнем виробничого ризику.

						Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розроблено комплексне рішення автоматизації технологічного процесу культивування мікроводоростей у плоскопанельному фотобіореакторі для отримання біопалива. Як базовий об'єкт прийнято пілотну установку FPBR-500 об'ємом 500 л.

На підставі аналізу літературних джерел обґрунтовано використання закритого FPBR, оскільки він забезпечує високу керованість світла, температури, pH, CO₂, гідродинаміки та санітарного стану культури. Як базову культуру прийнято *Arthrospira platensis* DHR 20, для якої в наданих матеріалах наведено експериментальні дані з біоремедіації АСВВ і отримання ліпідної фракції.

Розраховано технологічні параметри установки: 10 панелей по 35 л, резервуар 150 л, добове підживлення 75 л/добу, витрата аераційного газу 25-100 л/хв, циркуляція 0,5-1,0 м³/год. За базовими даними продуктивності очікуваний приріст сухої біомаси становить 0,37 кг/добу, ліпідів - 0,086 кг/добу, FAME - 0,082 кг/добу, CO₂-фіксації - 0,607 кг/добу.

Сформовано перелік електроприймачів із встановленою потужністю 36,22 кВт. Розроблено двотрансформаторну схему 10/0,4 кВ із двома трансформаторами 40 кВА, секціонованими шинами та АВР. Навантаження розподілено рівномірно: секція I - 17,92 кВт, секція II - 18,30 кВт. Основні агрегати підключено до секції I, резервні - до секції II; LED-освітлення поділено порівну.

Виконано вибір кабельних ліній, захисних апаратів і уставок. Для введів прийнято MCCB 80 А з уставкою 63 А, для груп LED - кабель 5x2,5 мм² і автомат С16, для двигунів - захисти двигунів або ПЧ. Розраховано орієнтовний струм КЗ на шинах 0,4 кВ 1,44 кА та прийнято вимикальну здатність апаратів із запасом.

Розроблено структуру САК на базі ПЛК Siemens S7-1200 або еквівалента, HMI/SCADA, датчиків температури, pH, DO, OD, рівня, витрати,

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

тиску та PAR. Передбачено PID-контуре температури, pH/CO₂, PAR, керування аерацією, циркуляцією та OD-керований збір біомаси.

Запропоновано алгоритм автоматичного циклу з пуском, заповненням, стабілізацією параметрів, культивуванням, збором біомаси, поверненням фугату та аварійним безпечним зупиненням. Визначено аварійні повідомлення, дії ПЛК, принципи архівування і структуру SCADA.

Розглянуто питання охорони праці, електробезпеки, пожежної, біологічної та хімічної безпеки. Запропоновано заходи захисту від електричного струму, CO₂, розчинників, механічних травм, біологічних ризиків і розливів. Проєкт може бути використаний як основа для робочого проєктування пілотного фотобіореакторного стенду після уточнення фактичних характеристик обладнання, складу ACWW та вимог конкретного навчального закладу.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Астахова В.І. Культивування мікроводоростей з подальшим одержанням біодизельного палива: дипломний проєкт бакалавра. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 106 с.
2. Hashmi Z., Idriss I.M., Zaini J., Abu Bakar M.S., Bilad M.R. Advancements in photobioreactor systems: Optimizing operations for enhanced microalgal growth and bioremediation. *Algal Research*. 2025. Vol. 91. Article 104282. DOI: 10.1016/j.algal.2025.104282.
3. Singh N., Chetty M., Rathilal S. Optimization of hydrodynamics for enhanced co-cultivation in bubble column reactors: Investigating flow dynamics and biomass productivity. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 28. Article 107841. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107841.
4. Mattos C. de M., Santos M.S. dos, Santana J., Carvalho D.F. de, Massache A., Zonta E., Vilas Boas R., Lucchetti L., Mendes M., Mendonça H.V. Pollution control and biodiesel production with microalgae: new perspectives on the use of flat panel photobioreactors regarding variation in volume application rate. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31. P. 58973-58987. DOI: 10.1007/s11356-024-35024-9.
5. Laizu S.A., Hassan L.H.S., Ahmad I. Open and closed photobioreactors for microalgal cultivation and wastewater treatment. In: *Nature-Based Technologies for Wastewater Treatment and Bioenergy Production*. IWA Publishing, 2025. DOI: 10.2166/9781789064100_0121.
6. Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 2007. Vol. 25, No. 3. P. 294-306.
7. Mata T.M., Martins A.A., Caetano N.S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, No. 1. P. 217-232.

8. Brennan L., Owende P. Biofuels from microalgae - a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. Vol. 14, No. 2. P. 557-577.
9. Borowitzka M.A., Moheimani N.R. Algae for Biofuels and Energy. Dordrecht: Springer, 2013.
10. Richmond A., Hu Q. Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology. 2nd ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2013.
11. Yousuf A. (ed.). Microalgae Cultivation for Biofuels Production. Academic Press, 2020.
12. Becker E.W. Microalgae: Biotechnology and Microbiology. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
13. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd ed. Washington: American Public Health Association, 2017.
14. IEC 60364. Low-voltage electrical installations. International Electrotechnical Commission.
15. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги.
16. ДСТУ EN 61439-1:2019. Устаткування комплектних розподільчих пристроїв низьковольтне. Частина 1. Загальні правила.
17. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Київ: Міненерговугілля України.
18. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ: Мінрегіон України.
19. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків.
20. ДСТУ EN ISO 13849-1:2016. Безпечність машин. Частина 1. Частина систем керування, пов'язані з безпекою. Частина 1. Загальні принципи проектування.
21. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller: System Manual. Siemens Industry Online Support.

						Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

22. Siemens AG. SIMATIC WinCC / TIA Portal: Engineering and
SCADA/HMI configuration guidelines. Siemens Industry Online Support

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

ДОДАТКИ

Додаток А. Специфікація кабельних трас і приміщення

Таблиця А.1 - Прийняті довжини ліній у приміщенні

Напрямок	Довжина, м	Пояснення
Трансформатор Т1 - ГРЩ секція І	18	Прийнято за розміщенням КТП біля приміщення
Трансформатор Т2 - ГРЩ секція ІІ	18	Симетрична траса
ГРЩ - групи ОС-1/ОС-2	22	Від ГРЩ до LED-лотка з запасом
ГРЩ - насоси/компресори	25	До реакторного блока і газового колектора
ША-1 - датчики FPBR	16	Сигнальний лоток КВПіА
ША-1 - ПЧ/пускарі	12	Керувальні кабелі до силової шафи
ГРЩ - downstream-блок	18	ЦФ-1, СШ-1, ЕК-1

						Арж.
Змн.	Арж.	№ докум.	Підпис	Дата		