

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

БУРЕГА НАЗАР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.311.26.031

**ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС РЕГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ
ВИКИДІВ НА ОСНОВІ ФОТОБІОРЕАКТОРА**

05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Тернопільському національному педагогічному університеті імені Володимира Гнатюка Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Федорейко Валерій Степанович,
Тернопільський національний педагогічний
університет імені Володимира Гнатюка,
завідувач кафедри машинознавства
та транспорту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лисиченко Микола Леонідович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка,
перший проректор

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Герасимчук Юрій Васильович,
Національний науковий центр
«Інститут механізації та електрифікації
сільського господарства» НААН,
провідний науковий співробітник
відділу електрифікації та автоматизації
агропромислового виробництва

Захист відбудеться «16» травня 2018 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «14» квітня 2018 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний енергетичний стан демонструє постійний приріст у споживанні викопних видів палива, паралельно з яким відбувається поступовий перехід на нові види відновлюваних джерел енергії. Суміжне протікання даних процесів зумовлене необхідністю забезпечення суспільства достатньою кількістю енергії. Усвідомлення вичерпності традиційних джерел викопного палива, а також негативного впливу на біосферу під час його використання, породив у сьогоднішні три основні кризи: енергетичну, екологічну, економічну. Саме суттєвий негативний антропогенний вплив дедалі більше загострює згадані проблеми у зв'язку з властивістю техногенезу впливати на екосистему через постійні викиди значної кількості вуглекислоти для генерації електричної, механічної або теплової енергії. Невідворотність процесу кліматичних змін та вичерпності викопних вуглеводнів змусив світових та вітчизняних лідерів ухвалити ряд законодавчих ініціатив, спрямованих на зменшення частки викидів парникових газів у атмосферу.

Вирішення цього завдання, над яким нині сконцентровано значний науковий потенціал планети, є комплексним і полягає у підвищенні енергоефективності даних систем, збільшенні відсоткової частки поновлюваних джерел та розробленні раціональних методів генерації енергії під час утилізації викидів парникових газів у атмосферу.

Результативним рішенням, що зумовить можливість отримання позитивних результатів і підвищить ефективність роботи, є модернізація електротехнологічних комплексів генерації електроенергії, що використовують як енергосировину такі компоненти парникових газів, як метан та вуглекислота. Дане завдання вирішується побудовою системи, що перетворюватиме органічні відходи у біогаз, який є паливом для твердооксидних паливних елементів й зумовлює ефективніше продукування електричного струму. Отримана вуглекислота, у процесі його роботи, перетворюватиметься на базі процесу фотосинтезу у високоякісну біомасу за допомогою системи регенерації енергії на базі фотобіореактора із мікрородоростями. Вирішення цих питань дасть змогу значно зменшити викиди парникових газів і генерувати високоякісну біосировину як для потреб енергетики, так і для інших сфер економіки країни.

Тому встановлення взаємозв'язків між потужністю твердооксидних паливних елементів, об'ємами системи регенерації енергії викидів у фотобіореакторі та реакторі біогазової установки є актуальним науковим завданням, розв'язання якого дасть змогу підвищити енергоефективність та екологічність генерації електроенергії з біогазу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проведено на кафедрі машинознавства та транспорту Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка за пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки України, згідно з програмою Міністерства освіти і науки України за темою: «Когенераційна термоелектрична автономна система на базі біогенератора» (номер державної реєстрації 0115U000192).

Мета та завдання дослідження. Мета дисертаційного дослідження – встановлення енергетичних співвідношень між складовими електро-технологічного комплексу для підвищення його енергоефективності в процесі генерації електроенергії з біогазу.

Для досягнення мети в науковій роботі було поставлено такі завдання:

- проаналізувати існуючі способи підвищення енергоефективності та екологічності процесу генерації електроенергії паливними елементами з парникових газів шляхом регенерації енергії викидів;

- визначити особливості структури, обґрунтувати алгоритми керування системою генерації енергії з біогазу та встановити взаємозв'язок між джерелом електроживлення та електротехнологічним процесом регенерації енергії викидів із урахуванням характеру розподілу сонячної енергії;

- дослідити енергетичні параметри фотобіореактора як системи регенерації енергії викидів у процесі роботи паливних елементів та оцінити ефективність її імплементації в енергогенеруючі комплекси;

- створити імітаційні моделі системи енергозабезпечення електро-технологічного комплексу на основі твердооксидних паливних елементів та системи регенерації енергії викидів для встановлення раціональних параметрів електрообладнання його компонентів;

- здійснити перевірку результатів досліджень у виробничих умовах і визначити їх техніко-економічну ефективність та обґрунтувати доцільність імплементації системи твердооксидних паливних елементів із системою регенерації енергії викидів у електротехнологічний комплекс.

Об'єкт дослідження – процеси регенерації енергії теплових та хімічних викидів твердооксидних паливних елементів у електротехнологічних комплексах, що базується на електрохімічних та біологічних складових.

Предмет дослідження – енергетичні взаємозв'язки та структурні складові електротехнологічного комплексу на базі твердооксидних паливних елементів, його параметри та закономірності процесу генерації електроенергії з біогазу та регенерації енергії викидів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базувалися на: основних законах електротехніки, теорії електричних кіл та електропривода – алгоритми функціонування електрообладнання та його енергетичні показники; першому та другому законах термодинаміки, теоріях теплопередачі – розрахунок тепломасообміну та теплопостачання у системах твердооксидного генератора, біогазової установки, фотобіореактора та термоакумулятора; екологічному законі оптимуму й загальновідомих теоретичних основах функціонування біологічних систем; рівняння електрохімічного перетворення енергії Нернста та законі Гібса – модернізації та створення моделей твердооксидних паливних елементів на базі метану для визначення обсягів теплової та електричної енергії; теорії імовірності та законі нормального розподілу Гауса – опрацювання даних річних масивів сонячної інсоляції та температури зовнішнього середовища.

Для дослідження режимів і динаміки роботи, моніторингу та обчислення енергетичних витрат технологічного комплексу застосовано імітаційне

моделювання у програмному середовищі Matlab/Simulink (бібліотеки Sim Power System, Thermal).

Реалізація алгоритму сегментації та ідентифікації клітин, їх підрахунку та визначення розмірів здійснювалася у програмному середовищі Matlab із застосуванням методів матричних масок операторами Робертса, Превітта, Собеля, Лапласіана-Гауса.

Експериментальні дослідження: проведено на основі розроблених спеціалізованих стендів з використанням стандартної методики повнофакторного експерименту, визначено необхідне число повторюваності досліду, із заданою достовірною вірогідністю 0,9 з перевіркою об'єктивності отриманих результатів за G-критерієм Кохрена з використанням серій паралельних дослідів; розроблено методику стерилізації культивуального середовища для посіву у промислових масштабах; використано методику культивування мікроводоростей *Chlorella Vulgaris* Beij на базі середовища Фітцджеральда в модифікації Цендера і Горхема №11; визначення вмісту протеїнів здійснювалося згідно з методикою Folinphenol, вуглеводи відокремлювали на базі методики автора Ю. Б. Філіпповича, ліпіди екстрагували за методом Фолча та визначали ваговим методом після відгонки екстрагуючої суміші.

Статистичне опрацювання та їх графічне подання здійснювали з використанням критеріїв Фішера, t-критерія Стьюдента за допомогою прикладних програмних пакетів Corel Draw X7, MS Office Excel та Statistica 10.

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше науково обґрунтовано структуру і співвідношення продуктивності генерації електричної та теплової енергії з біометану на базі твердооксидних паливних елементів із регенерацією енергії викидів системами фотосинтезу, що дало змогу реалізувати енергосистему із замкненим вуглецевим циклом.

Уперше встановлено взаємозв'язок між електричною потужністю твердооксидного генератора та об'ємом фотобіореактора для забезпечення регенерації енергії викидів під час роботи електротехнологічного комплексу зі змінним характером електричного навантаження, що дало змогу узгодити потужність для власних потреб з потужністю центральної електромережі.

Уперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено на розробленій фізичній моделі енергоефективні режими роботи фотобіореактора з інтегрованим термоакумулятором, що дало змогу забезпечити безперервну генерацію нової біомаси з урахуванням режимів роботи твердооксидних паливних елементів.

Уперше запропоновано та експериментально перевірено доцільність сегментації зображення для автоматичного визначення кількості клітин мікрокультури з достовірністю результатів до 97 %, що дає змогу встановлювати взаємозв'язки технічних складових комплексу енергозабезпечення з його біологічними компонентами та організувати моніторинг технологічного процесу в автоматизованому режимі.

Практичне значення одержаних результатів. Модернізовано методику використання паливних елементів як джерела генерації електричної енергії з біометану шляхом регенерації теплової та хімічної енергії його відпрацьованих

газів одноклітинними мікроводоростями для промислового продукування нової біомаси.

На підставі запропонованої методики розроблено фізичну модель сонячного фотобіореактора з інтегрованим термоакумулятором і можливістю дистанційного моніторингу та керування параметрами систем регенерації енергії засобами розробленого апаратно-програмного комплексу з відповідним алгоритмом функціонування та наявним контрольно-вимірвальним обладнанням на базі мультипроцесорної системи.

Розроблено алгоритми автоматичного підрахунку кількості мікроорганізмів та їх лінійних розмірів для зворотного інформаційного взаємозв'язку між біологічною та електротехнічною підсистемами, який використано під час досліджень у науково-дослідних лабораторіях «Енергетичний менеджмент» та «Екобіотехнології та здоров'я людини» при Тернопільському національному педагогічному університеті імені Володимира Гнатюка.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри машинознавства та транспорту Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка в курсі «Автоматизація технологічних процесів» та «Основи енергозберігаючих технологій».

Особистий внесок здобувача. У дисертаційну роботу ввійшли наукові результати, отримані здобувачем особисто. Йому належить постановка завдань й вибір методик дослідження, аналіз та узагальнення експериментальних результатів. Здобувачем проаналізовано технології генерації нової біомаси та розроблено структурну схему електротехнологічного комплексу генерації енергії з біометану за допомогою використання систем на базі твердооксидних паливних елементів та регенерації теплової та хімічної енергії у фотобіореакторі із мікроорганізмами; запропоновано технологію утилізації вуглекислоти з методикою проведення промислового культивування мікроводоростей та розроблено фізичну модель фотобіореактора для визначення енергоефективних режимів його роботи; встановлено можливість вирощування мікроводоростей у стаціонарному режимі з автоматичною системою керування за штучного та сонячного освітлення та використанням термоакумулятора для стабілізації температури середовища культивування; обґрунтовано доцільність використання зворотного інформаційного зв'язку між біологічною та технічною підсистемами для підвищення ефективності генерації біомаси за допомогою сегментації зображень мікроскопії; розроблено імітаційну модель електротехнологічного комплексу для визначення потужностей його компонентів та економічної ефективності.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу наукових працівників і аспірантів Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка (м Тернопіль, 2013–2016 рр.) та Навчально-наукового інституту енергетики і автоматики Національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ, 2013–2016 рр.); II Міжнародній науково-

практичній конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, нові автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (м. Київ, 2014 р.); V Міжнародній науково-технічній конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи» (м. Тернопіль, 2015 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної енергетики й автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» (м. Київ, 2016 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2016 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено у 12 наукових працях, з яких стаття у науковому фаховому виданні України, 4 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 2 статті у наукових виданнях інших держав, патент України на корисну модель та 4 тези наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Загальний обсяг дисертації становить 206 сторінок друкованого тексту і складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (містить 140 найменувань, із них 21 латиницею) та додатків. Дисертація містить 59 рисунків та 16 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, розкрито сутність наукового завдання, сформульовано мету та завдання, необхідні для її досягнення, наукову новизну та практичне значення роботи.

Розділ перший **«Аналіз структури електротехнологічних комплексів генерації енергії із парникових газів»** присвячено вирішенню першого поставленого завдання. Аналіз літературних джерел дає змогу стверджувати про перспективність використання біогазових технологій у різних галузях господарства та промисловості на базі значного енергоресурсного біопотенціалу України. Такий підхід зумовлює побудову децентралізованих систем енергозабезпечення різних потужностей із ламінарним надходженням поновлюваної енергії з біомаси, що дасть змогу підвищити енергобезпеку нашої держави та забезпечить одну з ключових вимог ЄС для України – збільшення частки поновлюваних джерел енергії.

Утилізація органічних відходів та зниження кількості утворення парникових газів із подальшою генерацією високоякісного органічного добрива створюватиме позитивний екологічний ефект, який є заангажованим для цивілізованих країн світу Кіотським протоколом і Паризькою конвенцією та сприятиме зміцненню економіки країни, зниженню її залежності від імпортного викопного енергоносія (нафти, газу, вугілля).

Проаналізовано технологічні рішення в галузі біотеплоенергетики, які досліджували такі вчені, як Г. Г. Гелетуша, В. Г. Горобець, Т. А. Железна, М. М. Жовнір, В. В. Козирський, Ю. В. Куріс, В. О. Дубровін, В. П. Лисенко, О. С. Бешта, Б. І. Басок та ін. Вони виявили, що основні зусилля спрямовані на підвищення енергоефективності системи за допомогою пошуку оптимальних

режимів перемішування та завантажування сировини, конструктивних особливостей реакторів та їх кількості, температурних режимів та підвищення вмісту метану в біогазі. Виявлено також, що системи генерації електроенергії з біогазу на базі двигунів внутрішнього згорання демонструють невисокий ККД (до 35 %), що зумовило пошук нових технологій її генерації та стало одним із ключових завдань для побудови електротехнологічного комплексу.

В основі подальшого дослідження позиціонували п'ять комерційних технологічних пропозицій Федеративної Республіки Німеччини, країни зі спорідненим кліматом та біоресурсним потенціалом, для проведення аналізу та вибору установки (рис. 1).

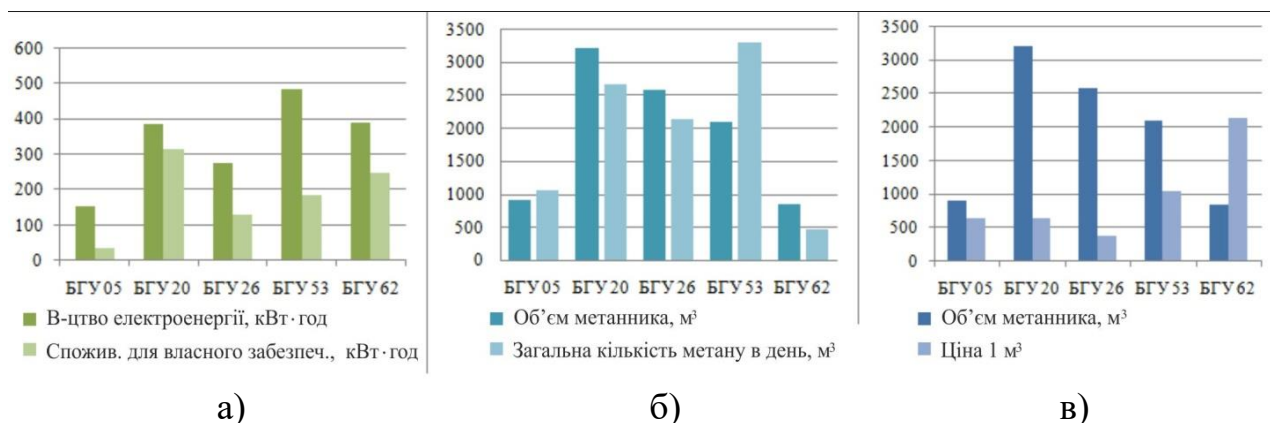


Рис. 1. Аналіз біогазових установок: а) співвідношення виробленої та спожитої електроенергії; б) відношення об'єму метанника і виходу CH_4 за добу; в) співвідношення вартості 1 м^3 метанника до загального об'єму установки

Це дало змогу обрати установку БГУ-05 з об'ємом реактора 903 м^3 із використанням блокової ТЕЦ потужністю 180 кВт на базі газорідинного двигуна з добовою генерацією електричної ($3679 \text{ кВт}\cdot\text{год}$) і теплової ($3781 \text{ кВт}\cdot\text{год}$) енергії з добовим виходом біогазу – $2,23 \text{ нм}^3$ з одного 1 м^3 сировини та вмістом метану 54 % або $1,18 \text{ нм}^3 \text{ CH}_4$.

Сучасний ринок генераторів електричного струму, працюючих на природному газі потужністю 40–60 кВт показав середнє споживання палива на рівні $16,94 \text{ м}^3/\text{год}$, що має нижчий показник порівняно з електрохімічними генераторами, основною вимогою для яких є відносно висока чистота палива (на рівні 97 %). У результаті було обрано ринкову модель системи очистки біогазу Camda KDCL-50-WQ з продуктивністю $45 \text{ м}^3/\text{год}$, споживанням електроенергії на рівні $45 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ та чистотою метану на рівні 97,3–98,4 %.

Тематиці генерації енергії з хімічного палива присвячено роботи таких авторів, як Е. Е. Шпильрайн, А. Е. Шейндлін, S. Singhal, А. М. Adams, які розкривають принцип роботи твердооксидних паливних елементів, їх будову та дослідження основних чинників, що впливають на процес генерації струму в комірці. Дані технології зумовлені високою ефективністю, оскільки їх принцип роботи полягає в окисненні водню або метану за рахунок іонної провідності полімерних або керамічних мембран. Як електроліт використовують твердий керамічний матеріал (стабілізований ітрієм оксид цирконію), який проводить

іони кисню від катода до анода за температури понад +700 °С, що, у свою чергу, за відсутності механічних складових, дає змогу даним технологіям досягати ККД до 60 % під час генерації електричної енергії та уможлиблює створення систем потужністю від 1 кВт до 10–25 МВт.

Рівняння під час використання метану як палива матимуть вигляд:



$$E = E^0 + \left(\frac{RT_{\text{ПЕ}}}{8F}\right) \ln\left[\frac{P_{\text{CH}_4}}{P^2_{\text{H}_2\text{O}}P_{\text{CO}_2}}\right] + \left(\frac{RT_{\text{ПЕ}}}{8F}\right) \ln[P^2_{\text{O}_2}], \quad (2)$$

де F – число Фарадея; R – газова стала; P_{CH_4} – тиск метану; $P^2_{\text{O}_2}$ – тиск кисню; P_{CO_2} – тиск вуглекислого газу; $T_{\text{ПЕ}}$ – температура твердооксидних паливних елементів; E^0 – потенціал Нернста.

У процесі функціонування твердооксидних паливних елементів за високих температур (+700...+1000 °С) під час генерації електричної енергії утворюється значна кількість теплової енергії, яка може використовуватися в електротехнологічному комплексі для забезпечення температурного режиму анаеробного процесу генерації хімічного палива (біогазу). Основним недоліком функціонування таких систем є утворення CO_2 , утилізація якого – одне з ключових завдань та вимог для побудови електротехнологічних комплексів майбутнього. Аналіз відомих способів його перетворення продемонстрував складний технологічний процес та економічну недоцільність. Найефективнішим способом засвоєння вуглекислоти є процес фотосинтезу, який під час свого перебігу дає змогу генерувати біомасу та кисень. Найбільш ефективно фотосинтез відбувається у мікрководоростях із ККД близько 8÷10 % (вищі рослини – 0,5 %), які мають значні темпи росту та вихід високоякісної біосировини з одиниці площі, використання якої має широкий спектр (енергетичний, харчовий, фармацевтичний тощо).

Слід відзначити праці вітчизняних учених В. В. Грубінка, Н. Б. Голуб, Є. В. Кузьмінського, О. К. Золотарьової, І. І. Левтун, Л. С. Червінського, А. І. Чміля, І. М. Голодного, М. Л. Лисиченка та ін., які розглядали питання їх культивування, вплив спектрального складу на біологічні об'єкти тощо. Проте в їх працях недостатньо приділено уваги таким питанням, як: масштабне вирощування, пошук енергоефективних режимів та розроблення промислових закритих систем – фотобіореакторів; автоматизації процесу та роботи в стаціонарних режимах із неперервною дією; можливості використання сонячної інсоляції як основного джерела світла.

Отже, для вирішення завдання створення електротехнологічного комплексу регенерації енергії викидів необхідним є розв'язання таких задач: моделювання процесу отримання біогазу з визначенням енергетичних витрат, його подальшого перетворення у твердооксидних паливних елементах на електричну й теплову енергію; проведення експериментальних досліджень функціонування фізичної моделі фотобіореактора із визначенням енергоефективних режимів його роботи.

У другому розділі «Розробка структури та алгоритмів керування системами електротехнологічного комплексу на базі біогазової установки, твердооксидних паливних елементів та фотобіореактора» розглянуто процеси, які відбуваються в компонентах електротехнологічного комплексу та створено математичну модель для його дослідження. Система перетворює утворене хімічне паливо на електричну й теплову енергію, частину якої споживає для власних потреб, підтримуючи функціональність упродовж річного циклу, та дає змогу реалізувати її надлишок споживачам чи постачати в загальну енергомережу (рис. 2).

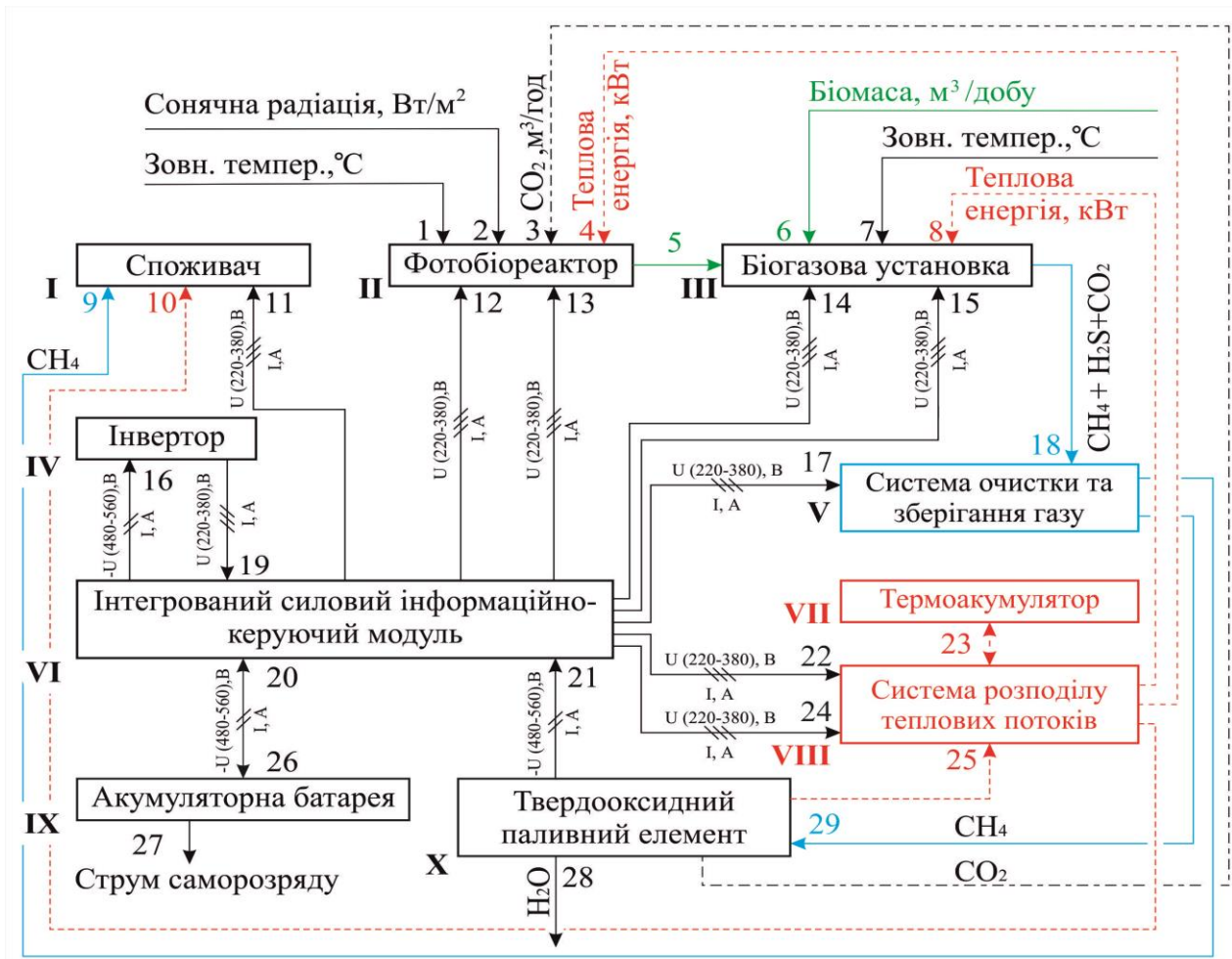


Рис. 2. Узагальнена структурно-технологічна схема комплексу на базі твердооксидних паливних елементів, біогазової установки та фотобіореактора

На основі математичної моделі роботи біогазової установки, запропонованої Ю. В. Курсі та електротехнологічних характеристик установки БГУ-05, розроблено алгоритми керування підсистем комплексу з урахуванням добових електричних (P_E) та теплових витрат (P_T), що дало змогу створити імітаційну модель (рис. 3).

Електричні витрати подано сумою потужностей приводів, які забезпечують технологічний процес підсистеми генерації біогазу за заданий час:

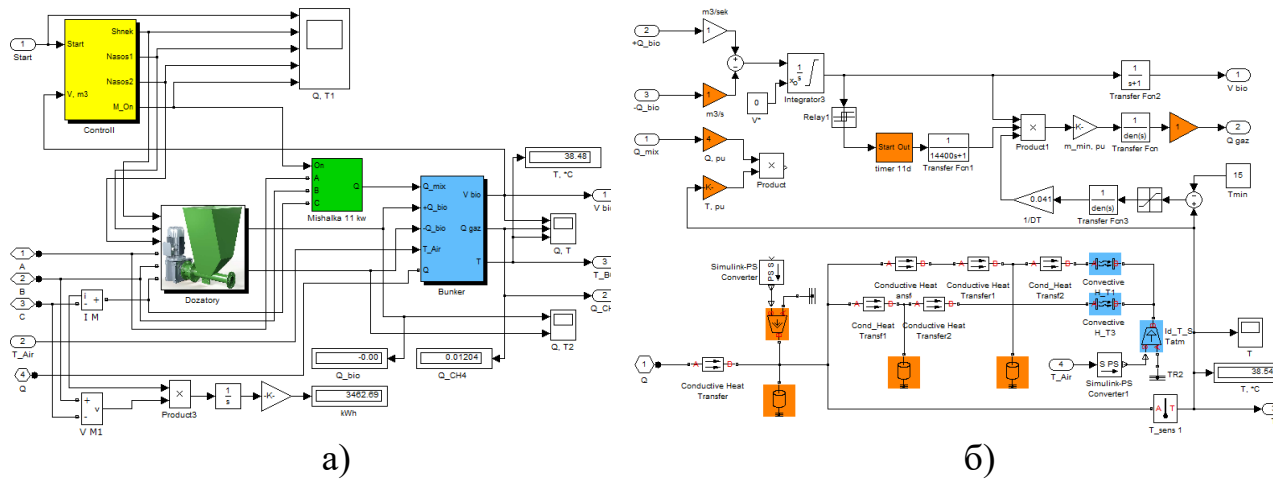


Рис. 3. Імітаційна модель комплексу БГУ-05: а) підсистема керування дозувальними пристроями сировини; б) підсистема моделі з розрахунком теплових втрат у біореакторі

$$W_E = \frac{P_{Ш}t_{ш}}{\eta_{Ш}\eta_{Дш}} + \frac{P_{ЗН}t_{ЗН}}{\eta_{ЗН}\eta_{ДЗН}} + \frac{P_{П1}t_{П1}}{\eta_{П1}\eta_{ДП1}} + \frac{P_{П2}t_{П2}}{\eta_{П2}\eta_{ДП2}} + \frac{P_{ВН}t_{ВН}}{\eta_{ВН}\eta_{ДВН}} + \frac{P_{НТ}t_{НТ}}{\eta_{НТ}\eta_{ДНТ}}; W_E = \sum_{i=1}^6 \frac{P_i t_i}{\eta_i \eta_{Дi}} \quad (3)$$

де P_i – механічні потужності технологічних одиниць: $P_{Ш}$ – шнека; $P_{ЗН}$ – завантажувального відцентрового насоса; $P_{П1}$ та $P_{П2}$ – перемішувальних пристроїв; $P_{ВН}$ – вивантажувального відцентрового насоса; $P_{НТ}$ – відцентрового насоса для прокачування теплоносія; η_i – ККД технологічного елемента; $\eta_{Дi}$ – ККД двигуна.

Теплові витрати подано сумарним споживанням теплової енергії системою генерації біогазу впродовж доби для нагрівання біомаси до температури бродіння (Q_1), кВт·год та для компенсації всіх тепловтрат (Q_2), кВт·год за час виходу системи до визначеної температури бродіння (t), діб.

$$W_T = (Q_1 + Q_2) \cdot t. \quad (4)$$

До середньодобових тепловтрат (Q_2) включають втрати енергії зі зброженою біомасою ($Q_{ЗБ}$), що видаляється; втрати енергії в навколишнє середовище ($Q_{КМ}$) через стінки конструкції; втрати енергії з біогазом ($Q_{БГ}$):

$$Q_2 = Q_{ЗБ} + Q_{КМ} + Q_{БГ}$$

$$Q_2 = (V_{ДБ} \cdot C_{V6} \cdot (T_{БМ} - T_{ЗБ})) + (V_{Д62} \cdot C_{V62} \cdot (T_{БГ} - T_{ЗС})) + (24 \cdot k \cdot S \cdot (T_{ЗС} - T_{Б})), \quad (5)$$

де $V_{ДБ}$ – об'єм біомаси, що видаляється з метанника впродовж доби, м³; C_{V6} – об'ємна теплоємність біомаси, кДж/м³·К; $T_{БМ}$ – температура біомаси на виході з метанника, К; $T_{ЗБ}$ – температура завантаженої біомаси, К; $V_{Д62}$ – добовий об'єм утвореного біогазу, м³/добу; C_{V62} – об'ємна теплоємність біогазу, кДж/м³·К; $T_{БГ}$ – температура біогазу на виході з метанника, К; $T_{ЗС}$ – температура зовнішнього середовища, К; k – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні метанника, Вт/м²·К; S – площа зовнішньої поверхні, м²; $T_{ЗС}$ – температура зовнішнього середовища, К; $T_{Б}$ – температура біомаси в метаннику, К.

Раціональний режим роботи системи утилізації CO₂ у фотобіореакторі потребує адаптації їх технологічних процесів до відповідних режимів роботи електротехнологічного комплексу за рахунок встановлення залежностей між

електричною потужністю електрохімічного генератора та масою вуглекислоти (m_{CO_2}), яку він генерує для її подальшої утилізації:

$$m_{CO_2} = \frac{W_{SOFC} \cdot M \cdot \left(\frac{r_1}{r_2} \cdot (1 - \eta_f) + 1 \right) \cdot t}{F \cdot Z \cdot \eta_f \left(E^0 + \left(\frac{RT_{ПЕ}}{8F} \right) \ln \left[\frac{P_{CH_4}}{P^2_{H_2O} P_{CO_2}} \right] + \left(\frac{RT_{ПЕ}}{8F} \right) \ln [P^2_{O_2}] - i_{max} \cdot \eta_f \cdot r_1 \right)} \quad (6)$$

де W_{SOFC} – потужність твердооксидних паливних елементів; t_{SOFC} – час роботи твердооксидних паливних елементів; M – молярна маса іона; r_1 – іонний опір електроліту; r_2 – омичний опір електроліту; η_f – коефіцієнт утилізації палива; i_{max} – щільність струму; Z – валентність іонів.

Розроблено алгоритм керування системою регенерації енергії викидів твердооксидних паливних елементів (рис. 4), основним завданням якого є підтримка оптимальних умов культивування. Для початку роботи визначається: пора року (Tr); час доби (Td) – час «стану спокою» (у заданому робочому діапазоні зупиняється перемішування культури, додаткове освітлення та подача CO_2); рівень освітленості (Y_{II}^l); внутрішня температура фотобіореактора ($t_{ФТР}$); рівень кислотності (pH), який підтримує оптимальний режим середовища мікроорганізмів за рахунок подачі вуглекислоти з паливного стека; кількість клітин біомаси (m) – показник дає змогу визначати час зливу біосировини в анаеробну установку.

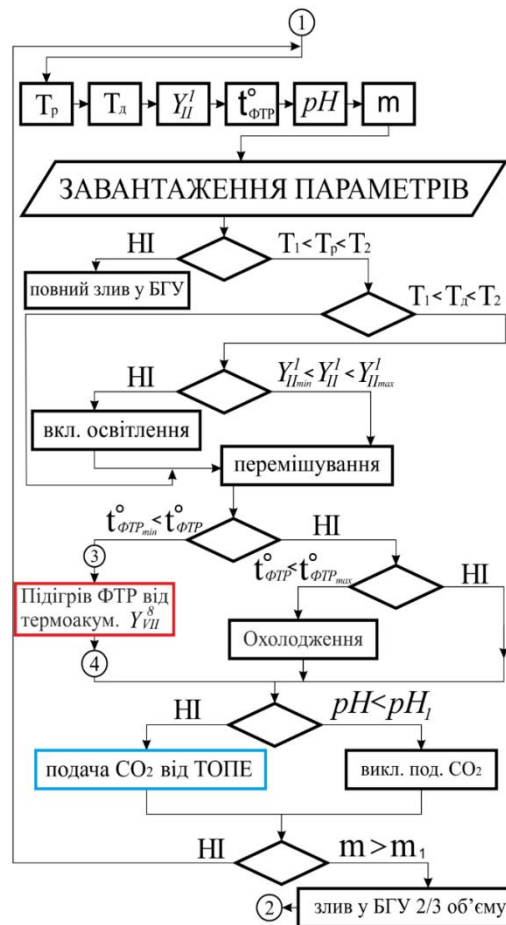


Рис. 4. Алгоритм роботи системи регенерації енергії викидів твердооксидних паливних елементів на базі фотобіореактора із мікроводоростями

Визначено, що процес росту мікроорганізмів у закритих системах лабораторного та промислового культивування є схожим і поданий класичною кривою росту організмів, яку можна розділити на 6 фаз: лаг-фаза, експоненційна, фаза флуктуації та пригнічення, вихід у стаціонарний режим роботи та злив (рис. 5а).

Для встановлення зворотного взаємозв'язку технічної складової електротехніологічного комплексу із її біологічними компонентами вперше запропоновано та експериментально перевірено алгоритм сегментації зображення для автоматичного підрахунку й визначення розміру клітин мікрокультури, який, порівняно з існуючим методом, забезпечив достовірність результатів на рівні 97 % (рис. 5б).

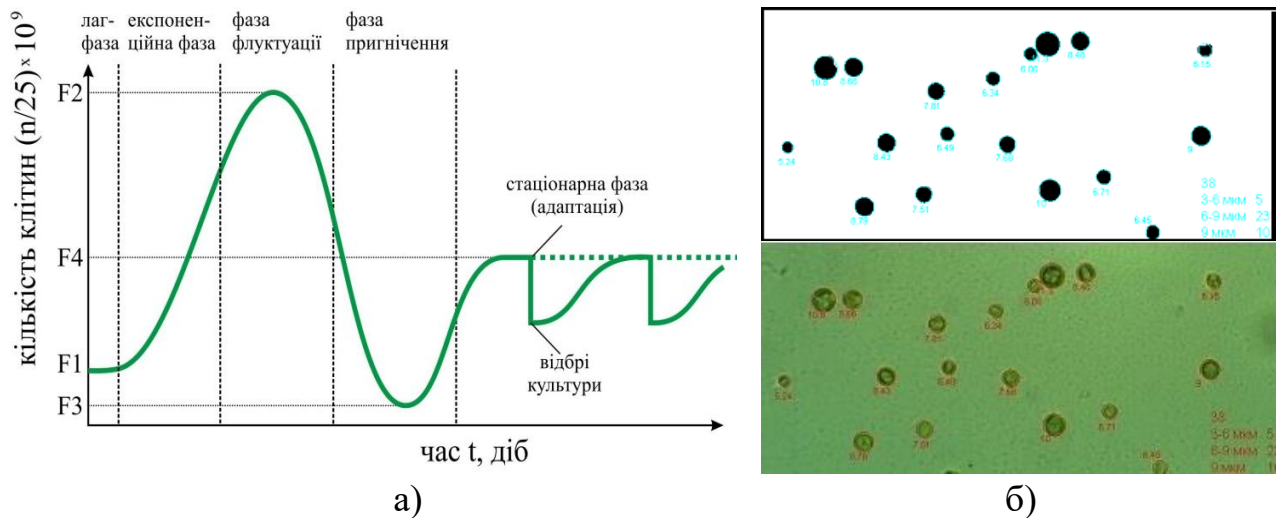


Рис. 5. Динаміка росту мікроводорості *Chlorella Vulgaris* Beij: а) зміна кількості клітин у режимі неперервного культивування; б) результат підрахунку клітин зображень мікроскопії

На підставі проведених досліджень розроблено алгоритм і програмне забезпечення, у якому відтворено стохастичний характер надходження сонячної радіації та отримано дані про її середню інтенсивність із дискретністю у 30 хв для 2014 та 2015 років. Характер надходження енергії від сонячної радіації описано експоненційним законом розподілу. Визначено середньорічну температуру та сформовано журнали для використання в імітаційних моделях комплексу. Дані, отримані у процесі роботи алгоритму, корелюють із результатами експериментальних досліджень.

Третій розділ «Експериментальні дослідження енергетичних характеристик і технологічних параметрів системи регенерації із моделюванням режимів її роботи на базі паливних елементів та фотобіореактора» присвячено вирішенню третього та частково четвертого завдання дослідження; наведено результати експериментальних досліджень, отриманих на розробленій автором фізичній моделі фотобіореактора із робочим об'ємом 50 л.

Система регенерації енергії викидів подана як плоский вертикальний реактор з можливістю автоматичного керування штучним освітленням із

середньою інтенсивністю світла 2500 лк на базі LED стрічок, встановлених на бокових стінках конструкції (2 стрічки із білим світлом – колірна температура 5500 К, 1 – червоного (640÷700 нм) та 1 синього (450÷480 нм) кольорів), упродовж 16 годин на добу (рис. 6а).

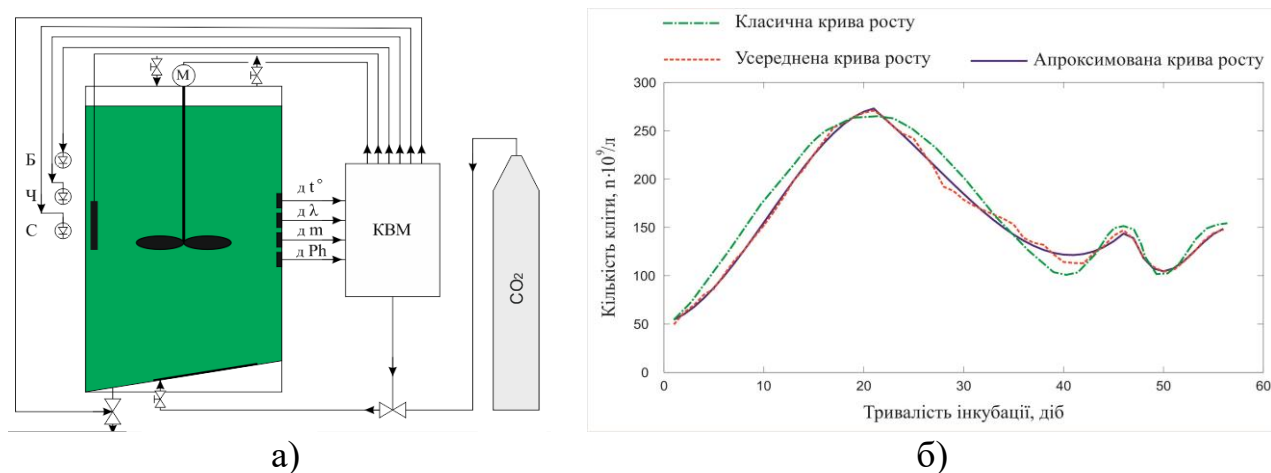


Рис. 6. а) схема фотобіореактора: Б, Ч, С – LED стрічки; датчики: $d t^{\circ}$ – температури середовища; $d \lambda$ – рівня освітленості фотобіореактора; $d m$ – концентрації мікробіомаси; $d рН$ – рівня рН; б) апроксимована функція росту

Для визначення енергетичних витрат, вибору оптимального режиму перемішування та рівня освітленості проведено експериментальні дослідження в експоненційній фазі росту мікрокультури впродовж 17 діб. Досліджено режими перемішування (1 / 7200 с / 60 с; 1 / 3600 с / 60 с; 1 / 14400 с / 60 с; постійне перемішування та без перемішування) зі штучним освітленням середовища 2500 лк упродовж 16 годин. Це дало змогу встановити необхідні енергетичні параметри системи перемішування на рівні 0,028 Вт·год/л та системи освітлення на рівні 1,06 Вт·год/л для забезпечення максимального приросту біомаси впродовж доби.

Передбачено систему контролю рівня рН, яка працює у визначеному діапазоні 6–6.5 рН, дає можливість підтримки визначеної температури на рівні +22...+25 °С зі встановленим середнім показником енергоспоживання на рівні 16,2 Вт·год/л.

Для розроблення адекватної імітаційної моделі системи регенерації енергії вихлопів проведено 5 серій експериментів по 56 діб із однаковими умовами за штучного освітлення, що дало змогу визначити продуктивність фотобіореактора у режимі утилізації вуглекислоти на рівні 5,07 г/л, генерації сухої біомаси – 3,46 г/л та кисню – 3,7 г/л із добовим питомим споживанням електроенергії – 2,01 кВт·год. Встановлено, що кількість клітин та біомаса є прямо пропорційними.

Із експериментальних даних визначено середню криву росту та перевірено адекватність їх проведення з класичною кривою, що дало можливість встановити середньоквадратичне відхилення в межах від $\delta_2 = 5,5234$ до $\delta_5 = 16,9869$ та середнє відносне – від $\Delta_2 = 1,09 \%$ до $\Delta_5 = 7,56 \%$.

Апроксимована функція на підставі отриманих експериментальних даних має вигляд (див. рис. 6б):

$$n_a(t) = \left\{ \begin{array}{l} -0.0378t^3 + 1.1863t^2 + 2.3111t + 51.0098, \text{ при } t \in (0; 21) \\ 0.0175t^3 - 1.4147t^2 + 27.8718t + 148.326, \text{ при } t \in (22; 46) \\ 49t^2 + 2596t + 4.5863, \text{ при } t \in (47; 56) \end{array} \right\} \quad (7)$$

Середньоквадратичне відхилення апроксимованої функції від усередненої $-\delta_\alpha = 4.2234$, відносна середня похибка апроксимації становить $\Delta_1 = 2,23\%$. Отже, можна стверджувати, що апроксимована функція є достовірною, оскільки знаходиться в межах похибки експериментальних даних.

Серія експериментальних досліджень дала змогу встановити приріст біомаси залежно від інтенсивності освітлення (за температури $+21\dots+27^\circ\text{C}$) під дією сонячного випромінювання (рівень освітленості 9000 лк) та за штучного освітлення з величинами 2500 лк, 5000 та 7500 лк упродовж 17 діб. Проаналізовані результати дали змогу встановити, що використання природного освітлення є ефективнішим на 25 % з енергетичної (рис. 7а) та біологічної точок зору, оскільки приріст кількості клітин зріс у 2,9 раза (рис. 7б).

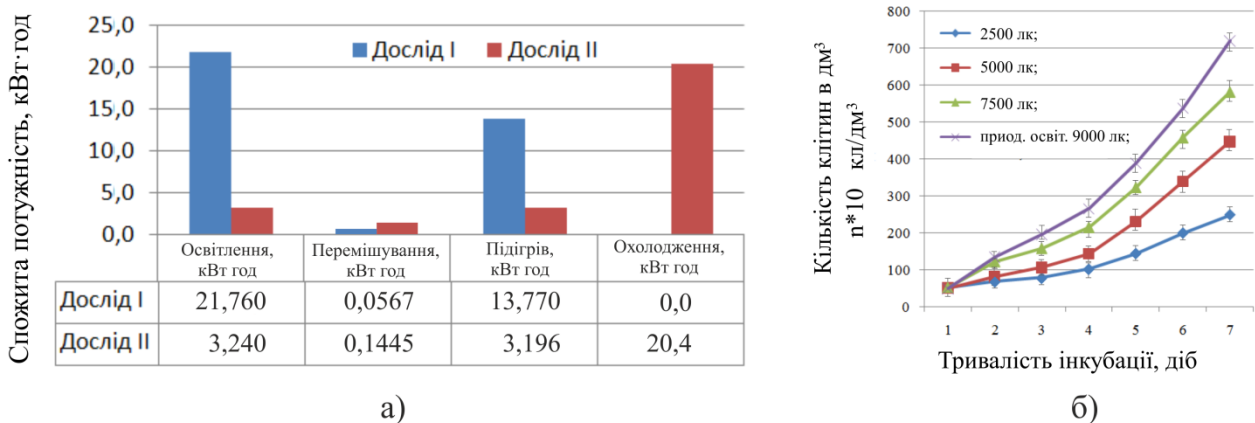


Рис. 7. Експериментальні дослідження: а) динаміка енерговитрат; б) приріст кількості клітин за різних показників інтенсивності освітлення

Обґрунтовано необхідність імплементації системи терморегуляції у фотобіореактора для забезпечення відповідних температурних режимів роботи та встановлено величину питомих енерговитрат ($0,98 \text{ Вт}\cdot\text{год/л}$) для рівня сонячної інсоляції $700\text{--}950 \text{ Вт/м}^2$ з метою підтримання температури культивувального середовища в допустимих межах ($+20\dots+28^\circ\text{C}$).

Запропоновано методику стерилізації фотобіореактора та проведення експерименту, розроблено апаратно-програмне забезпечення системи на базі процесора ATmega 2560 із роботою в реальному часі та щосекундним збереженням даних на зовнішній USB носій. Об'єктом дослідження була альгологічна чиста культура зеленої водорості *Chlorella Vulgaris* Beij, яку культивували в середовищі Фітцджеральда в модифікації Цендера і Горхема № 11 у вищезазначених параметрах.

На підставі проведеного аналізу літературних джерел та комерційних пропозицій установок електрохімічної генерації, модернізовано стандартну

модель твердооксидних паливних елементів (із бібліотеки Matlab/Simulink) за рахунок використання теплообмінника та системи теплового розподілу між біологічними складовими електротехнологічного комплексу (рис. 8а, 8б).

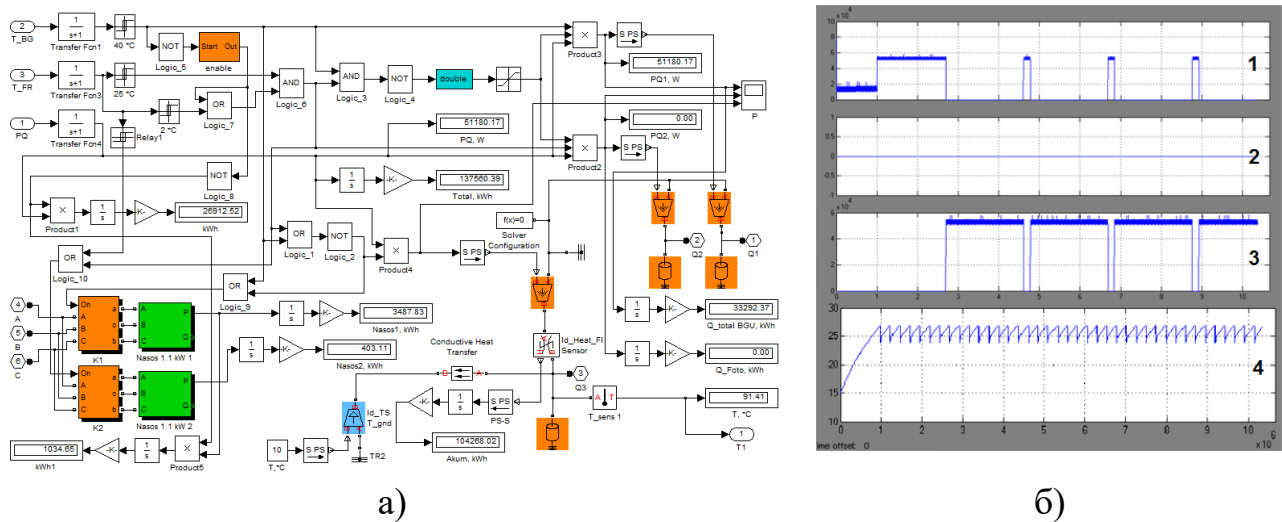


Рис. 8. Моделювання системи теплорозподілу: а) модель системи розподілу теплових потоків між складовими електротехнологічного комплексу; б) динаміка споживання теплової енергії підсистемами електротехнологічного комплексу упродовж 120 діб за ($T_3 = +15$ °C): 1 – біогазова установка; 2 – фотобіореактор; 3 – термоаккумулятор; 4 – зміна температури у фотобіореакторі під впливом сонячної радіації

Твердооксидний паливний елемент генерує постійний струм зі щільністю 460 A/m^2 та напругою на одну комірку 1 В , у стеку, який складається зі 135 комірок. Встановлено, що система потужністю 120 кВт (два стеки по 60 кВт) дає змогу генерувати в середньому за добу близько $2866 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ електричної та $1121 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ теплової енергії, споживаючи при цьому $446,6 \text{ м}^3$ метану, що є ефективнішим показником від двигуна внутрішнього згорання в $1,7$ раза. Це дало змогу забезпечити енергетичні потреби біологічних підсистем фотобіореактора та біогазової установки з урахуванням температури зовнішнього середовища ($-15, 0, +15, +30$ °C) упродовж 120 діб.

У четвертому розділі «Моделювання та апаратно-програмна реалізація компонентів електротехнологічного комплексу» висвітлено вирішення четвертого завдання дослідження. Розроблено структурно-функціональні схеми комплексу на основі твердооксидних паливних елементів та біологічних підсистем на базі реакторів анаеробної ферментації та фотосинтезу, які включають у себе відповідні датчики, виконавчі механізми та контрольно-вимірювальне обладнання. Розроблено та адаптовано структурно-технологічні та електрично-принципові схеми забезпечення процесів вимірювання, аналізу й трансляції інформації під час роботи електротехнологічного комплексу (рис. 9).

Система автоматичного керування (САК) здійснює контроль та керування всіма параметрами підсистем електротехнологічного комплексу; БГУ – біогазова установка забезпечує комплекс хімічним паливом (біогазом), який після системи очистки (СО) зі сховища подається в електрохімічний генератор, виконаний на

базі твердооксидних паливних елементів (ТОПЕ), що генерує електричну енергію постійного струму напругою 560 В, яка подається на зарядний пристрій акумуляторної батареї та 3-фазний силовий інвертор змінного струму ($\sim 3\Phi$ ІНВ). Зазначена величина напруги вибрана у зв'язку зі значною вихідною потужністю інвертора (150 кВт), до того ж, це дає змогу конструктивно виконати його з одинарним циклом перетворення постійної напруги у змінну, що забезпечує менші втрати потужності, спрощення та здешевлення системи. Рекуперована теплова енергія з твердооксидних паливних елементів розподіляється між біологічними підсистемами комплексу та частково акумулюється у термоакумуляторі (ТА); утворений діоксид вуглецю подається у систему регенерації енергії на базі фотобіореактора для його утилізації з подальшим утворенням біомаси для потреб біогазової установки.

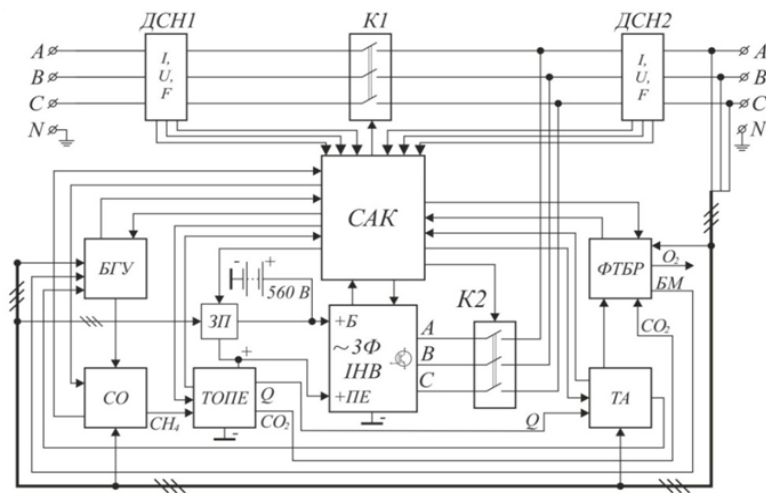


Рис. 9. Структурно-функціональна схема електротехнологічного комплексу: ДСН1 та ДСН2 – блоки вимірювання (датчики) вихідних параметрів (U , I , f) електромережі та генерованої електроенергії, що надходить споживачу; К1 – силовий контактор підключення зовнішньої мережі та К2 – силовий контактор підключення комплексу до мережі та споживача; ЗП – зарядний пристрій; СО – система очистки; $\sim 3\Phi$ ІНВ – трифазний інвертор; САК – система автоматичного керування; ТА – система теплового розподілу з термоакумулятором

Запропоновано та обґрунтовано масштабування системи регенерації енергії викидів твердооксидних паливних елементів на базі фотобіореактора безперервної генерації нової біомаси з конструктивним кресленням секції об'ємом 1 м^3 та імплементованим у корпус теплообмінником із нержавіючої сталі площею контакту – $0,6 \text{ м}^2$. Такий підхід забезпечить високу теплову та біологічну інертність, дасть змогу використовувати реактори як підтримкові конструкції для господарської діяльності електротехнологічного комплексу із можливістю поступового нарощування потужностей та буде додатковим теплоізолятором у холодну пору року.

Розроблено модель системи регенерації енергії викидів твердооксидних паливних елементів (рис. 10а) на основі отриманих експериментальних даних та

апроксимованої функції росту мікроорганізмів з урахуванням коефіцієнтів тепловтрат у зовнішнє середовище та системою терморегуляції фотобіореактора, для визначення температурної динаміки та енерговитрат за максимально ефективного перетворення CO_2 в нову біомасу (рис. 10б).

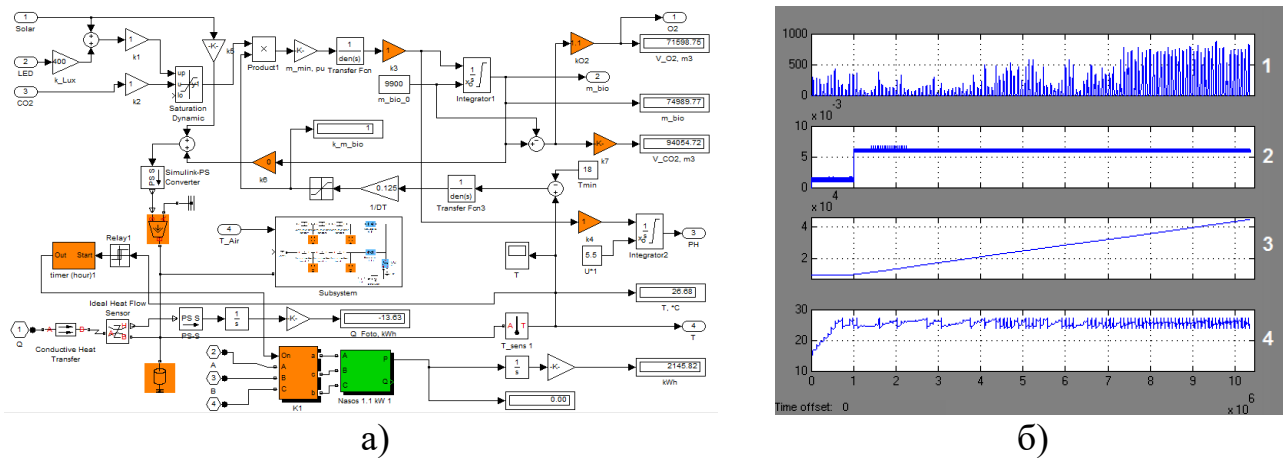


Рис. 10. Моделювання системи регенерації: а) імітаційна модель фотобіореактора із системами терморегуляції та перемішування; б) динаміка роботи підсистеми фотобіореактора при $T_3 = +15\text{ °C}$: 1 – розподіл сонячної радіації (W/m^2); 2 – поточне надходження CO_2 з твердооксидних паливних елементів (m^3/s); 3 – приріст біомаси (кг); 4 – динаміка температури у фотобіореакторі ($^{\circ}C$)

Для перевірки й визначення ефективності роботи розроблених алгоритмів керування підсистемами, узгодження їх енергетичних параметрів та визначення економічного ефекту розроблено імітаційну модель електротехнологічного комплексу (рис. 11).

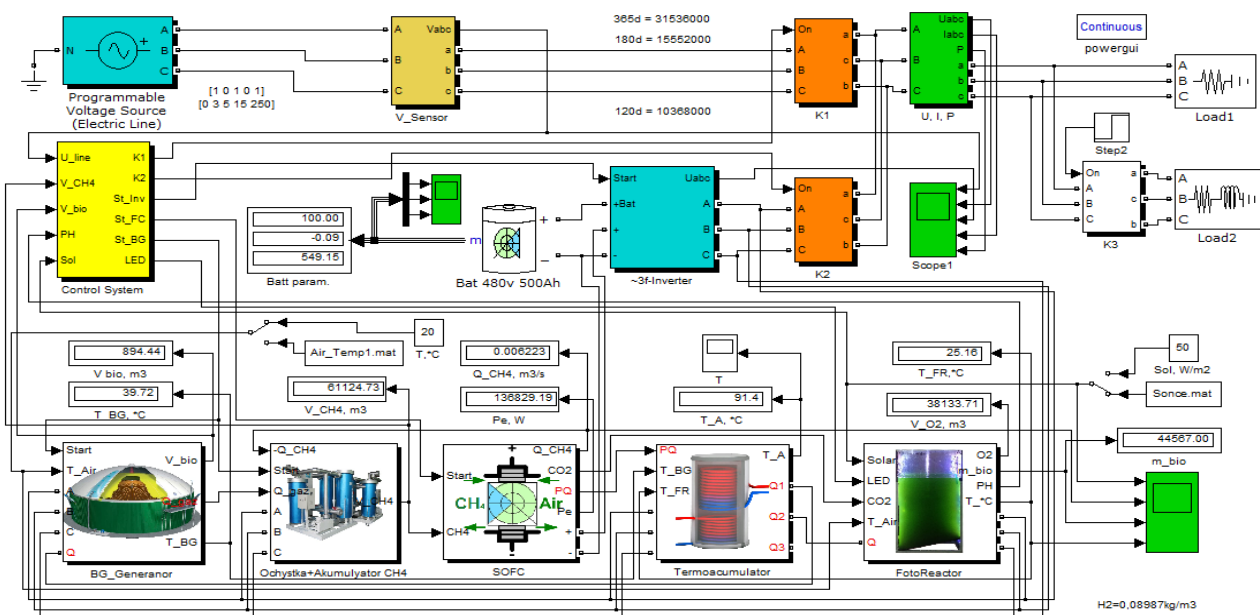


Рис. 11. Імітаційна модель електротехнологічного комплексу генерації електричної енергії з біометану на базі твердооксидних паливних елементів з використанням системи регенерації викидів

На основі розробленої імітаційної моделі проведено дослідження для визначення залежності коефіцієнта ефективності функціонування системи регенерації енергії викидів (k_{EC}) від об'єму фотобіореактора ($V_{ФТБР}$) для різних струмів навантаження електрохімічного генератора ($I_{ТОПЕ}$). На основі отриманих експериментальних даних встановлено залежності $k_{EC}(V_{ФТБР}, I_{ТОПЕ})$ (рис. 12а).

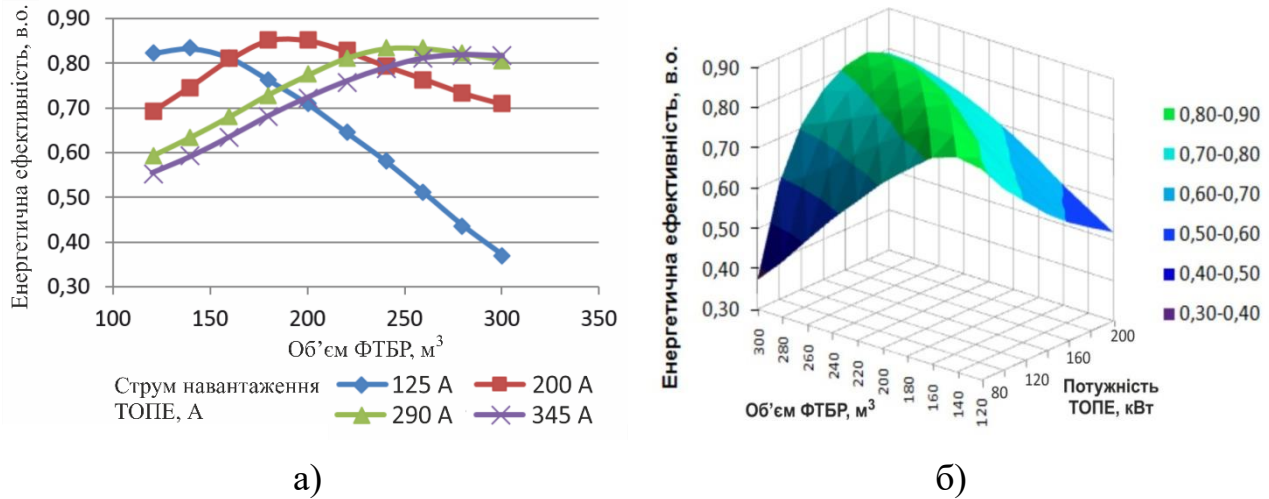


Рис. 12. Залежність ефективності регенерації енергії викидів: а) залежність від струму твердооксидних паливних елементів та об'єму фотобіореактора; б) залежність k_{EC} від потужності твердооксидних паливних елементів та об'єму фотобіореактора

$$k_{EC}(V_{ФТБР}, 125 A) = -1E-05 V_{ФТБР}^2 + 0,0015 V_{ФТБР} + 0,8068; \quad (8)$$

$$k_{EC}(V_{ФТБР}, 200 A) = -2E-05 V_{ФТБР}^2 + 0,007 V_{ФТБР} + 0,093; \quad (9)$$

$$k_{EC}(V_{ФТБР}, 290 A) = -1E-05 V_{ФТБР}^2 + 0,0062 V_{ФТБР} - 0,0018; \quad (10)$$

$$k_{EC}(V_{ФТБР}, 345 A) = -7E-06 V_{ФТБР}^2 + 0,0046 V_{ФТБР} + 0,0992. \quad (11)$$

Достовірність апроксимації R^2 становила від 0.9048 до 0.9972.

Раціональні режими регенерації енергії викидів забезпечуються за коефіцієнта ефективності роботи системи (k_{EC}) від 0,8, тому для знайдених поліномів (8–11) накладаються відповідні умови:

$$k_{EC} \in (0,8; 1) \wedge V_{ФТБР} \in (100; 300) \quad (12)$$

Розв'язок отриманих нерівностей дав змогу визначити взаємозв'язок об'єму фотобіореактора та потужності твердооксидних паливних елементів $P_{ТОПЕ}$ для забезпечення максимального коефіцієнта ефективності системи регенерації викидів k_{EC} (див. рис. 12б).

В структуру моделі входять: програмоване джерело живлення для задання параметрів мережі; система керування режимами роботи електротехнологічного комплексу та силовими контакторами, яка аналізує параметри мережі та здійснює регулювання навантаження шляхом перерозподілу струму з інвертора потужністю 150 кВт між споживачами та електрообладнанням комплексу; блоки вимірювання вихідних параметрів генерованої електричної енергії; акумуляторна батарея ємністю 500 А·год для частково резервного живлення системи та згладжування перепадів напруги; підсистема генерації газу (об'єм біореактора 903 м³ із добовим виходом очищеного метану 1065 м³); система

очистки (45 м³/год зі споживанням 45 кВт·год) та збереження газу (сховище об'ємом 14000 м³); електрохімічний генератор потужністю 120 кВт; система розподілу теплових потоків з термоакумулятором із тепловою енергоємністю близько 7600 МДж; фотобіореактор для регенерації енергії викидів (об'ємом 180 м³).

Виходячи із графічної залежності (див. рис. 12 б) максимальна ефективність системи регенерації (k_{EC}) досягається за потужності твердооксидних паливних елементів – 120 кВт та об'ємом фотобіореактора – 180 м³.

У п'ятому розділі «Техніко-економічна ефективність результатів досліджень» викладено результати виробничої перевірки системи, яку проведено у науково-дослідних лабораторіях НВО «Енергоощадні технології» та в науково-дослідній лабораторії «Екобіотехнології та здоров'я людини» при Тернопільському національному педагогічному університеті імені Володимира Гнатюка впродовж 2015, 2016 та 2017 років (рис. 13а, 13б, 13в).



Рис. 13. Система регенерації енергії на базі фотобіореактора об'ємом 50 л: а) випробування фотобіореактора за штучного освітлення; б) випробування фотобіореактора під впливом сонячного випромінювання: 1б – фотобіореактор; 2б – контрольно-вимірювальний модуль; 1в – вимірювальний сервер; 2в – вуглекислотний балон; 3в – термоакумулятор

Під час експериментальних випробувань розроблена система регенерації енергії викидів на базі фотобіореактора продемонструвала відмінну роботу на технологічному обладнанні підприємства. На базі ТзОВ «Інтеграл» здійснено перевірку системи керування фотобіореактора на точність процесу вимірювання, встановлення надійності, наробітку на відмову та відповідності заявлених проектно-технологічних характеристик приладу його експлуатаційним параметрам. Виробничі дослідження системи керування фотобіореактора показали, що середній наробіток до відмови становить орієнтовно 25000 год. Вимірювальна система здатна оцінювати й керувати станом досліджуваного фотобіореактора з інтервалом 0,5 с. Під час випробування було досліджено, що

зазначена точність вимірювання відповідає проектним даним та становить для каналу вимірювання кислотності $\pm 0,1$ рН, освітленості 50 Вт/м^2 , температури $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розраховано потужності компонентів електротехнологічного комплексу, їх вартість та реалізацію надлишкової електричної та теплової енергії, метану та органічного добрива відповідно до встановлених законодавчих тарифів.

Одержані результати свідчать, що застосування запропонованої технології дає змогу забезпечити автономність роботи електротехнологічного комплексу й підвищити ефективність генерації енергії на 20–25 % та мінімізувати викиди парникових газів у атмосферу. Розрахований річний економічний ефект становить 3 990 530 грн, термін окупності комплексу – 5,9 року.

ВИСНОВКИ

У результаті роботи розв'язано важливі наукові завдання за допомогою встановлення енергетичних співвідношень між складовими електротехнологічного комплексу для підвищення енергоефективності процесу генерації електроенергії з біогазу.

Основні теоретичні та практичні результати полягають у такому:

1. Проведений аналіз існуючих електротехнологічних комплексів генерації енергії з парникових газів зумовив можливість визначення основних методів підвищення їх енергоефективності та екологічності, які полягають у заміні двигунів внутрішнього згорання на джерела, що базуються на твердооксидних паливних елементах із системами регенерації на основі фотобіореактора.

2. Розроблено комп'ютерну модель електротехнологічного комплексу генерації енергії з біогазу на базі твердооксидних паливних елементів та системи регенерації енергії викидів, що дало змогу визначити раціональні параметри та встановити взаємозв'язки між об'ємом біогазового реактора (903 м^3 із середньодобовим споживанням електричної – $60 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ і теплової енергії – $320 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ та генерацією $1065 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$), електричною потужністю твердооксидних паливних елементів (120 кВт зі струмом навантаження – 200 А , тепловою потужністю – 50 кВт) та об'ємом фотобіореактора (180 м^3) із максимальним коефіцієнтом ефективності утилізації вуглекислоти.

3. Встановлено можливість отримання електричної енергії з біогазу, з ефективністю до 60 %, за допомогою використання твердооксидних паливних елементів, що дало змогу зменшити викиди вуглекислоти в 1,7 рази ($297 \text{ г/кВт}\cdot\text{год}$), порівняно з генеруючими пристроями на базі двигунів внутрішнього згорання ($505 \text{ г/кВт}\cdot\text{год}$).

4. Розроблена фізична модель фотобіореактора дала змогу вдосконалити систему регенерації енергії на базі твердооксидних паливних елементів шляхом підвищення енергоефективності на 25 % та обґрунтувати необхідність імплементації системи терморегуляції у фотобіореакторі для забезпечення відповідних температурних режимів роботи. Встановлено величину питомих енерговитрат ($0,98 \text{ Вт}\cdot\text{год/л}$) для рівня сонячної інсоляції $700\text{--}950 \text{ Вт/м}^2$ для

підтримання температури культивування середовища в допустимих межах (+20...+28 °C).

5. Теоретично обґрунтовано спектральний склад джерела світла та експериментально отримано показники середньодобового приросту сухої біомаси мікроводоростей на рівні 3,46 г/л, а також визначено показники максимального приросту клітин (248,4–720,36·млрд/л) залежно від інтенсивності світлового потоку (для величин освітлення 2500–9000 лк).

6. Доведено можливість утилізації вуглекислоти шляхом регенерації енергії викидів твердооксидних паливних елементів (на базі розробленої фізичної моделі фотобіореактора об'ємом 50 л) на рівні 5,07 г/л CO₂ та додатковим продукуванням O₂ – 3,7 г/л, що дало змогу встановити необхідні енергетичні параметри системи перемішування на рівні 0,028 Вт·год/л та системи освітлення на рівні 1,06 Вт·год/л для максимального приросту нової біомаси впродовж доби із встановленою середньою відносною похибкою апроксимації до 2,5 %.

7. Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків та рекомендацій базується на кореляційній постановці наукових задач, коректному використанні теорії електричних кіл та електропривода, законів термодинаміки та теплопередачі в усталених і перехідних режимах, застосуванні методів математичного та імітаційного моделювання.

Достовірність одержаних результатів також підтверджуються збіжністю чисельних результатів і розв'язанням аналітичних задач, експериментальними даними і результатами промислового впровадження.

8. Випробування системи регенерації енергії здійснювали на НВО «Енергоощадні технології» упродовж серпня 2016 року. Проведені дослідження дали змогу встановити співвідношення між об'ємом фотобіореактора та потужністю твердооксидних паливних елементів для забезпечення раціональних режимів регенерації енергії викидів, шляхом максимальної утилізації вуглекислоти в електротехнологічному комплексі. Розрахований річний економічний ефект становить 3 990 530 грн, термін окупності комплексу – 5,9 року.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Пальчик А. О., Бурега Н. В. Використання фотобіореактора в альтернативних системах енергозабезпечення. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2013. Вип. 13. Т. 5. С. 116–123. *(Здобувачем проведено аналіз технологій генерації «нової біомаси» та висунуто гіпотезу про необхідність використання мікроорганізмів в електротехнологічних комплексах).*

Статті у наукових фахових виданнях України,

включених до міжнародних наукометричних баз даних:

2. Пальчик А. О., Фендьо О. М., Бурега Н. В. Утилізація діоксиду вуглецю шляхом промислового вирощування мікроводоростей в енергосистемі на базі

паливного елементу. Енергетика і автоматика. 2014. № 4. С. 80–89. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/viewFile/3543/3465> (Здобувачем запропоновано технологію утилізації вуглекислоти у фотобіореакторі з інтегрованим термоакумулятором).

3. Бешта О. С., Федорейко В. С., Пальчик А. О., **Бурега Н. В.** Автономне енергозабезпечення об'єктів господарювання на основі біотвертооксидних паливних систем. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2015. № 2. С. 67–73. (Здобувачем розроблено структурну схему електротехнологічного комплексу генерації енергії із біометану шляхом використання систем на базі твердооксидних паливних елементів та регенерації теплової та хімічної енергії у фотобіореакторі).

4. Бурега Н. В. Методика вирощування мікроводоростей у фотореакторі при утилізації газів твердооксидних паливних елементів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природовикористання України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 224. С. 213–218.

5. Бурега Н. В. Дослідження режимів роботи електротехнологічного комплексу під час генерації електроенергії із біогазу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 209. Ч. 2. С. 237–241.

Статті в наукових виданнях іншої держави:

6. Beshta O. S., Fedoreyko V. S., Palchyk A. O., **Burega N. V.** Independent power supply of menage object based on biosolid oxide fuel. Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. 2015. P. 33–39. (Здобувачем розглянуто особливості будови та роботи систем генерації біомаси на базі мікроводоростей та їх можливістю імплементації в системи автономного енергозабезпечення із використанням електрохімічних генераторів).

7. Beshta O. S., Fedoreyko V. S., Palchyk A. O., **Burega N. V.**, Sipravskyy R. Computer analysis of photobiological utilizer parameters of solid oxide fuel cells emissions. 2016. P. 11–17. (Здобувачем обґрунтовано використання сегментації зображень мікроскопії для автоматичного аналізу системи фотобіореакторів, що дало змогу встановити використання зворотного інформаційного зв'язку між біологічною та технічною підсистемами для підвищення ефективності генерації біомаси під час промислової утилізації вуглекислоти).

Патент України на корисну модель:

8. Федорейко В. С., **Бурега Н.В.**, Пальчик А. О., Іскерський І. С., Балябас В. Т. Патент 115229 UA, МПК (2017.01) A01G 33/00, C12N 1/02. Спосіб промислового вирощування мікроводоростей шляхом утилізації діоксиду вуглецю. № u201610396: заявлено. 12.10.2016; опубліковано 10.04.2017. Бюл. № 7/2017. (Здобувачем розроблено структурну схему промислового способу утилізації вуглекислоти із використанням системи терморегуляції та обґрунтовано алгоритм її функціонування).

Тези наукових доповідей:

9. Пальчик А. О., Бурега Н. В. Використання мікроводоростей в енергоефективних системах. Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 16–17 жовтня 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 18–19. *(Здобувачем обґрунтовано використання мікроводоростей в енергоефективних системах).*

10. Пальчик А. О., Фендьо О. М., Бурега Н. В. Аналіз перспектив використання фотобіореакторів в анаеробних системах енергозабезпечення України. Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми, перспективи: V Міжнародна науково-технічна конференція, м. Тернопіль, м. Яремче, 23–27 лютого 2015 року: тези доповіді. Тернопіль, 2015. С. 109–110. *(Здобувачем проаналізовано сучасний стан анаеробних систем генерації біогазу в світі та Україні, розглянуто перспективи їх використання із можливістю імплементації системи регенерації на базі фотобіореактора).*

11. Федорейко В. С., Пальчик А. І., Боднар О. І., Бурега Н. В., Сіправський Р. Б. Комп'ютерний аналіз біологічних процесів вирощування мікроводоростей в енергетичних цілях. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування: теорія, практика, історія, освіта: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 10–14 травня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 39–41. *(Здобувачем обґрунтовано доцільність використання сегментації зображень мікроскопії для встановлення зворотних інформаційних взаємозв'язків для підвищення енергоефективності процесу регенерації).*

12. Бурега Н. В., Рутило М. І., Пальчик А. О. Дослідження енергетичних параметрів утилізації вуглекислоти у плоскому фотореакторі під впливом штучного та природного освітлення. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: IV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 20–21 листопада 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 32–33. *(Здобувачем обґрунтовано доцільність використання сонячного випромінювання для фотобіореактора, можливість підвищення енергоефективності процесу та за рахунок імплементації термоакумулятора).*

АНОТАЦІЯ

Бурега Н. В. Електротехнологічний комплекс регенерації енергії викидів на основі фотобіореактора. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2018.

Роботу присвячено вирішенню науково-прикладного завдання, що полягає у підвищенні енергоефективності та екологічності процесу генерації електричної енергії із біометану паливними елементами шляхом регенерації у фотобіореакторі енергії відпрацьованих газів електротехнологічного комплексу.

Розроблено фізичну модель системи регенерації енергії на базі фотобіореактора та реалізовано апаратно-програмне забезпечення для визначення енергоефективних режимів його роботи під час утилізації вуглекислоти, що дало змогу встановити добове споживання CO₂ та приріст сухої біомаси за штучного та природного освітлення.

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень створено математичну та імітаційну моделі електротехнологічного комплексу, які дали змогу встановити раціональні параметри його компонентів.

Уперше запропоновано та експериментально перевірено алгоритм сегментації зображення для автоматичного підрахунку клітин мікрокультури.

Проведено виробничу перевірку дослідного зразка системи регенерації енергії викидів твердооксидних паливних елементів на базі фотобіореактора з апаратно-програмним забезпеченням та обґрунтовано економічну ефективність їх застосування в електротехнологічному комплексі генерації енергії з біогазу.

Ключові слова: електротехнологічний комплекс, біопаливо, регенерація, енергоефективність, фотобіореактор, твердооксидний паливний елемент, біогазова установка.

АННОТАЦИЯ

Бурег Н. В. Электротехнологический комплекс регенерации энергии выбросов на основе фотобioreактора. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2018.

Работа посвящена решению научно-прикладной задачи, заключающейся в повышении энергоэффективности и экологичности процесса генерации электрической энергии из биометана топливными элементами путем регенерации в фотобioreакторы энергии отработанных газов электротехнологического комплекса.

Обоснована перспективность использования биогазовых технологий в различных отраслях хозяйства и промышленности на базе большого энергоресурсного биопотенциала Украины.

Обоснована возможность модернизации электротехнологического комплекса генерации электроэнергии, использующего в качестве энергосырья такие компоненты парниковых газов, как метан и углекислота. Образующийся из органических отходов биогаз будет топливом для электрохимического генератора и обусловит более эффективную выработку электрического тока. Полученная в процессе его работы углекислота будет превращаться в процессе фотосинтеза с микроводорослями в высококачественную биомассу с помощью системы регенерации энергии на базе фотобioreактора. Такой подход позволяет в значительной степени минимизировать выбросы парниковых газов и генерировать высококачественное биосырье как для нужд энергетики, так и для других сфер экономики страны.

Выбрана коммерческая модель для дальнейших исследований в области источника генерации энергии путем замены двигателя внутреннего сгорания на электрохимический генератор, обеспечивающий преобразование энергии химического топлива в электрический ток с КПД до 60 %, что позволило повысить энергоэффективность комплекса на 25 % и уменьшить выбросы углекислоты.

Разработана физическая модель системы регенерации энергии выбросов твердооксидных топливных элементов с реализованной системой терморегуляции в фотобиореактор для обеспечения соответствующих температурных режимов работы.

Реализовано аппаратно-программное обеспечение для выполнения методики генерации новой биомассы и определения энергоэффективных режимов его работы при утилизации углекислоты при искусственном и естественном освещении.

Теоретически обоснован спектральный состав источника света и экспериментально получены показатели среднесуточного прироста сухой биомассы микроводорослей, а также определены показатели максимального прироста клеток в зависимости от интенсивности светового потока.

Доказана возможность утилизации углекислоты (на базе разработанной физической модели фотобиореактора объемом 50 л) и определена производительность системы регенерации энергии выхлопных газов твердооксидных топливных элементов и генерации кислорода. Установлены необходимые энергетические параметры системы перемешивания и освещения на энергоэффективном уровне для максимального прироста новой биомассы в течение суток.

Установлена зависимость коэффициента утилизации энергии выбросов от номинальной электрической мощности твердооксидных топливных элементов и рассчитан объем системы регенерации энергии выбросов со средней относительной погрешностью аппроксимации путем имитационного моделирования – $\Delta_1=2,23$ % и учетом потерь в окружающую среду и воздействия солнечной энергии.

Впервые предложен и экспериментально проверен алгоритм сегментации изображения для автоматического подсчета клеток микрокультуры, что позволило установить обратную взаимосвязь технической составляющей комплекса энергообеспечения с ее биологическими компонентами.

Проведена производственная проверка опытного образца системы регенерации энергии выбросов твердооксидных топливных элементов на базе фотобиореактора с аппаратно-программным обеспечением и обоснована экономическая эффективность их применения в электротехнологическом комплексе генерации биогаза.

Ключевые слова: электротехнологический комплекс, биотопливо, регенерация, энергоэффективность, фотобиореактор, твердооксидный топливный элемент, биогазовая установка.

ANNOTATION

Burega N. V. Electrotechnology complex of the waste's energy of regeneration on the basis of photobioreactor. – The Manuscript.

Dissertation for obtaining scientific degree of candidate of technical sciences on specialty 05.09.03 «Electrotechnical Complexes and Systems». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2018.

The work is devoted to the solution of the scientific and applied task, which consists in increasing the energy efficiency of the process of generating electricity from biomethane by fuel cells by 25 % compared with the ICE and the ecological – by regenerating the chemical energy of the exhaust gases of the electrotechnological complex in a photobioreactor with the further production of high quality bios.

A physical model of the energy regeneration system based on a photobioreactor device has been developed and hardware-software has been implemented to determine the energy-efficient modes of its operation during the utilization of carbon dioxide, which allowed setting daily CO₂ consumption and dry biomass growth in artificial and natural light.

On the basis of theoretical and experimental researches, mathematical and simulation models of the electrotechnical complex were created, which made it possible to establish rational parameters of its components.

For the first time an algorithm for image segmentation for automatic counting of microculture cells has been proposed and experimentally tested.

The industrial test of the experimental sample of the system of energy recovery of solid oxide fuel cells on the basis of photobioreactor with hardware and software has been carried out and the economic efficiency of their application in the electrotechnological complex of generation of energy from biogas is substantiated.

Key words: electrotechnical complex, biofuels, regeneration, energy efficiency, photobioreactor, solid oxide fuel cell, biogas plant.

Підписано до друку 10.04.2018
Формат 60×84/16. Друк RESO.
Папір друк. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид.арк.
Зам. №15. Наклад 100 пр.
Видрук. з оригінал-макета:
редакційно-видавничий відділ Тернопільського
національного педагогічного університету
імені Володимира Гнатюка
м. Тернопіль, вул. Максима Кривоноса, 2.