

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА З СОНЯЧНИМ КОНЦЕНТРАТОРОМ ТА ДОДАТКОВИМ ДЖЕРЕЛОМ ЕНЕРГІЇ

В. М. Головка, доктор технічних наук, професор

НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Інститут відновлюваної енергетики НАН України

М. М. Бережнюк, аспірант

НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

E-mail: golovkovm@ukr.net

Анотація. Ефективність сонячної енергетики обмежена природною мінливістю рівня сонячної радіації. Двигун Стірлінга є перспективним рішенням для сонячних енергосистем особливо при використанні концентраторів, таких як лінза Френеля. Основною перешкодою для широкого впровадження таких систем є їхня залежність від стабільності сонячного випромінювання.

Мета дослідження – створення експериментального стенду та методики для визначення доцільності використання додаткового джерела енергії (електричного нагрівача), для запобігання зупинки двигуна Стірлінга, який використовує сконцентроване сонячне випромінювання за допомогою лінзи Френеля як основне джерело теплоти.

Представлено експериментальне дослідження роботи двигуна Стірлінга, яке включає вивчення впливу змінної інсоляції та оцінку ефективності використання електричного нагрівача як додаткового джерела енергії (ДДЕ) для підвищення стабільності системи. Проведено серію експериментів з різною тривалістю переривання інсоляції (20, 40 та 60 с). Результати підтвердили здатність ДДЕ запобігати зупинці двигуна та підвищувати сумарну вироблену енергію на 47 %, 90 % та 130 % для відповідних інтервалів.

Ключові слова: *двигун Стірлінга, лінза Френеля, додаткове джерело енергії, стабілізація потужності, сонячна енергетика, експериментальний стенд*

Перелік використаних скорочень та позначень

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ДДЕ – додаткове джерело енергії (AES – additional energy source)

ККД – коефіцієнт корисної дії

I²C – послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем (Inter-Integrated Circuit)

Актуальність. Сонячна енергетика є одним з найперспективніших видів відновлюваної енергії. Однак її ефективність обмежена природною мінливістю рівня сонячної радіації. Двигун Стірлінга, здатний перетворювати теплову енергію в механічну та електричну, є перспективним рішенням для сонячних енергосистем, особливо при використанні концентраторів, таких як лінза Френеля. Основною перешкодою для широкого впровадження таких систем є їхня залежність від стабільності сонячного випромінювання. Різкі зміни інсоляції, зумовлені хмарністю або іншими атмосферними явищами, можуть призводити до зупинки двигуна та втрати енергетичної продуктивності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Щоб компенсувати нестабільність сонячного випромінювання, дослідження [1], [2] пропонують інтеграцію двигуна Стірлінга з додатковими джерелами теплоти, такими як пальники на дерев'яних палетах [1] та системи на біомасі [2]. Експериментальні дані свідчать, що поєднання двигуна із системою на біомасі підвищує ефективність до 72 % і дозволяє підтримувати генерацію навіть за відсутності сонячного випромінювання. Також розглядаються системи з теплоакumuлюючими ємностями [3], що забезпечує стабільність роботи установки незалежно від часу доби та погодних умов.

Експериментальні дослідження є необхідним етапом для перевірки ефективності подібних рішень та оптимізації параметрів системи. Це дослідження спрямоване отримати динамічну поведінку системи в умовах зміни надходження теплоти, зокрема реакції двигуна на коливання рівня інсоляції та оцінку доцільності застосування ДДЕ (електричного нагрівача) з погляду стабільності й енергоефективності. Під час експерименту визначаються такі основні параметри:

- вихідна напруга та струм генератора постійного струму;
- миттєва електрична потужність, що генерується системою;
- динаміка зміни температур гарячої зони двигуна Стірлінга;
- рівень сонячної інсоляції, що подається на поверхню лінзи Френеля;
- загальна кількість виробленої електричної енергії за певний період часу.

Мета дослідження – створення експериментального стенду та методики для визначення доцільності використання додаткового джерела енергії (електричного

нагрівача), для запобігання зупинки двигуна Стірлінга, який використовує сконцентроване сонячне випромінювання за допомогою лінзи Френеля як основне джерело теплоти.

Матеріали та методи дослідження.

Визначення параметрів та розробка стенду для експериментальних досліджень двигуна Стірлінга. Для реалізації експерименту було створено лабораторний стенд, що забезпечує вимірювання електричних і теплових параметрів двигуна в режимі реального часу. Конструктивно стенд складається з трьох функціональних підсистем:

1. Енергетична підсистема – включає двигун Стірлінга, генератор постійного струму та систему нагрівання. Як концентратор сонячного випромінювання використовується лінза Френеля (діаметром 300 мм), що фокусує сонячну енергію на гарячій частині двигуна. Для моделювання нестабільних умов інсоляції або компенсації її нестачі застосовується електричний нагрівач (потужність 30 Вт), який виконує роль додаткового джерела енергії.

2. Вимірювальна підсистема складається з датчиків температури, інсоляції, напруги та струму. Датчики підключено до мікроконтролера Arduino Uno, який здійснює збір, первинну обробку та передавання даних через послідовний інтерфейс.

3. Інформаційно-аналітична підсистема – реалізована на базі Node.js сервера, що приймає дані від Arduino, обробляє їх та передає у Google Sheets для подальшого збереження, візуалізації та аналізу. Такий підхід забезпечує неперервний моніторинг параметрів системи та створює можливість віддаленого доступу до даних у режимі реального часу.

Взаємозв'язок між основними компонентами установки подано у вигляді загальної блок-схеми експерименту, що ілюструє як енергетичні, так і інформаційні потоки системи (рис. 1). Така структура забезпечує замкнений цикл збору та обробки експериментальних даних, де енергія проходить шлях від сонячного випромінювання до електричного сигналу, а інформація – від сенсорів до цифрової бази даних.

Як видно зі схеми, функціонування системи відбувається так. Сонячне випромінювання, сфокусоване лінзою Френеля, нагріває гарячу частину двигуна Стірлінга, спричиняючи циклічне розширення та стискання робочого тіла (повітря). У результаті цих процесів формується механічний рух колінчастого вала, який передає крутний момент на генератор постійного струму. Генератор перетворює механічну енергію на електричну, яка подається до вимірювальних сенсорів напруги та струму.

Паралельно з цим температурні датчики контролюють стан гарячої зони двигуна, а сенсор інсоляції фіксує поточний рівень сонячного випромінювання. Усі сигнали у цифровій формі надходять на мікроконтролер Arduino Uno, де здійснюється їх синхронізація, фільтрація та формування пакетів даних із часовими мітками. Далі інформація передається через USB-інтерфейс на Node.js сервер (ноутбук), де виконується обробка даних та автоматичне передавання результатів у Google Sheets для подальшого аналізу.

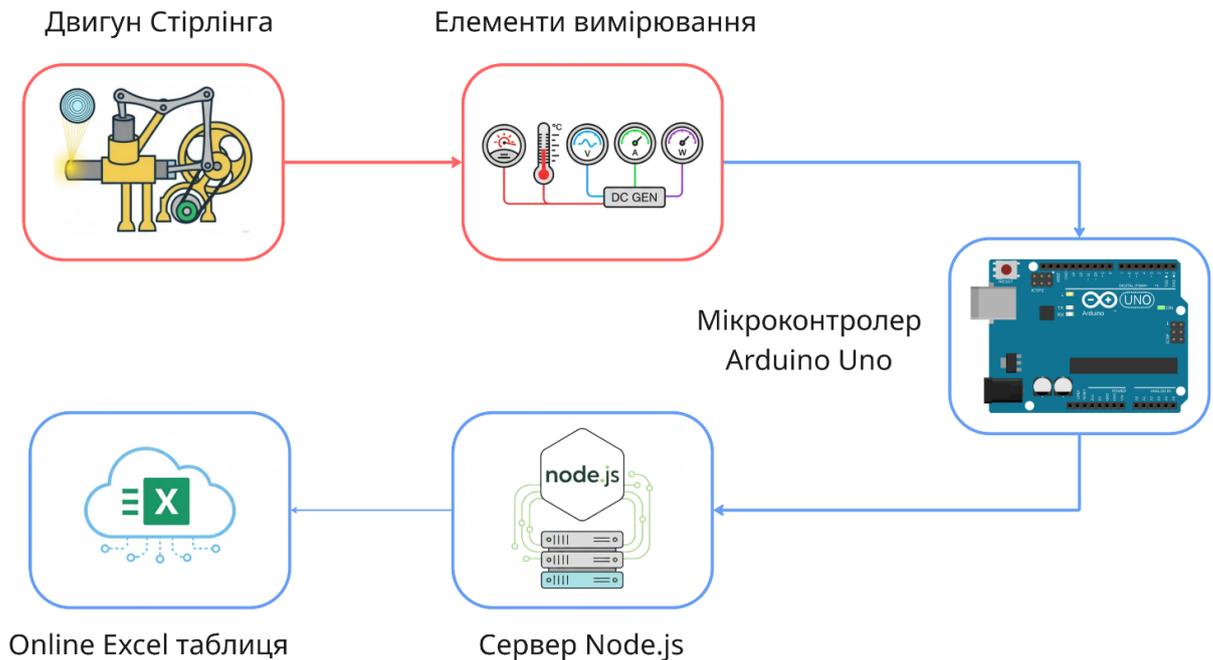


Рис. 1. Блок-схема загальної архітектури експерименту: потоки енергії (червоні) та потоки даних (сині)

Подальша деталізація архітектури системи представлена на електричній схемі експериментальної установки (рис. 2), яка відображає повну структуру з'єднань між

мікроконтролером Arduino Uno, вимірювальними модулями та двигуном Стірлінга з генератором постійного струму.

Ядром вимірювальної підсистеми виступає мікроконтролер Arduino Uno, до якого підключено наступні ключові компоненти:

- *Датчик струму та напруги INA219* підключений до виходу генератора постійного струму. Цей датчик забезпечує вимірювання як напруги, так і сили струму, що протікає через шунт, і на основі цих даних обчислює потужність. Зв'язок з мікроконтролером здійснюється по інтерфейсу I²C, що дозволяє отримувати всі електричні параметри (U, I, P) за одним адресним простором.

- *Термопара типу K* встановлена на гарячій зоні двигуна Стірлінга для контролю його робочої температури. Оскільки мікроконтролер не може безпосередньо обробляти низькоамплітудний сигнал термопари, використовується спеціалізований модуль MAX6675, який виконує функції підсилення, компенсації холодного спаю та аналого-цифрового перетворення, передаючи до Arduino вже оцифроване значення температури по інтерфейсу SPI.

- *Фоторезисторний модуль (MH Sensor)* використовується для оцінки рівня сонячної інсоляції. Принцип його роботи базується на зміні опору фоторезистора в залежності від інтенсивності падаючого світла. Він підключається до одного з аналогових входів Arduino (A0), де напруга, що пропорційна освітленості, перетворюється в цифрове значення.

- *Резистор навантаження (1 кОм)* підключено до виходу генератора, що імітує споживача енергії та забезпечує стабільні умови вимірювання.

Таким чином, вимірювальна підсистема формує замкнений контур збору даних: фізичні величини (температура, струм, напруга, освітленість) перетворюються сенсорами в електричні сигнали, які оцифровуються та обробляються мікроконтролером для подальшої передачі на сервер.

Програмна частина експериментальної установки включає три основні компоненти:

- Програму мікроконтролера Arduino Uno, яка відповідає за зчитування даних із сенсорів, їх первинну обробку та передавання на сервер.

- Node.js сервер, який приймає дані з Arduino, структурує їх та пересилає до таблиці Google Sheets.
- Google Apps Script, реалізований у середовищі Google Sheets, що виконує обробку отриманих даних і запис їх у таблицю для подальшої аналітики.

Така інтеграція апаратної та програмної частин забезпечує повну автоматизацію процесу збору експериментальних даних і створює основу для подальшої аналітичної обробки результатів.

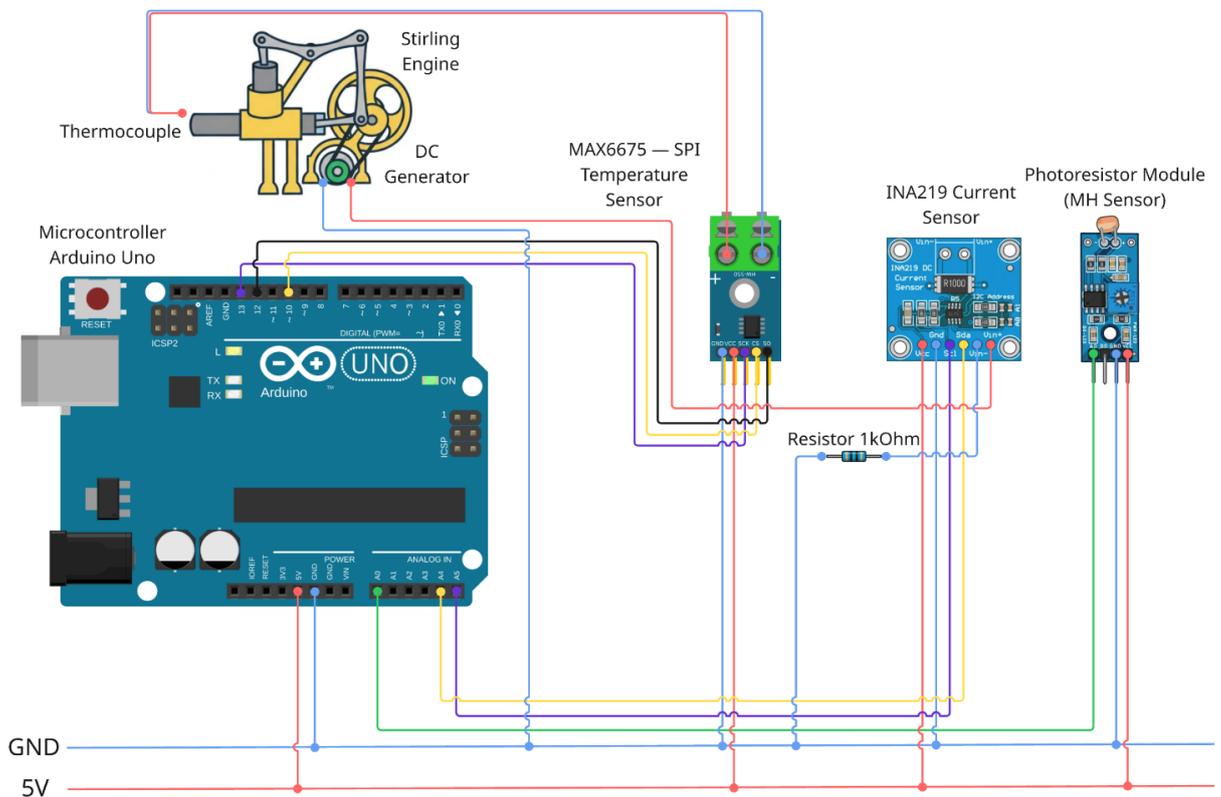


Рис. 2. Електрична схема вимірювальної підсистеми на основі мікроконтролера Arduino Uno

У процесі розробки експериментальної установки було реалізовано систему захисту гарячої частини двигуна Стірлінга від перегрівання, спричиненого роботою електронагрівача. З цією метою до складу системи було введено додаткову термопару типу *K*, під'єднану до терморегулятора W3230, який забезпечує контроль граничних температур та автоматичне вимкнення електронагрівача у разі перевищення встановленого порогу температури.

Реалізоване технічне рішення утворює подвійну систему контролю температури: перша лінія, реалізована за допомогою плати МАХ6675, використовується для реєстрації температурних даних з метою подальшого аналізу; друга лінія, побудована на основі терморегулятора W3230, виконує функцію аварійного захисту гарячої частини двигуна. Така конфігурація підвищує надійність експериментальної установки та мінімізує ризик пошкодження елементів системи внаслідок перегріву. Схему підключення терморегулятора W3230 з електричним нагрівачем та термопарою наведено на рис. 3.

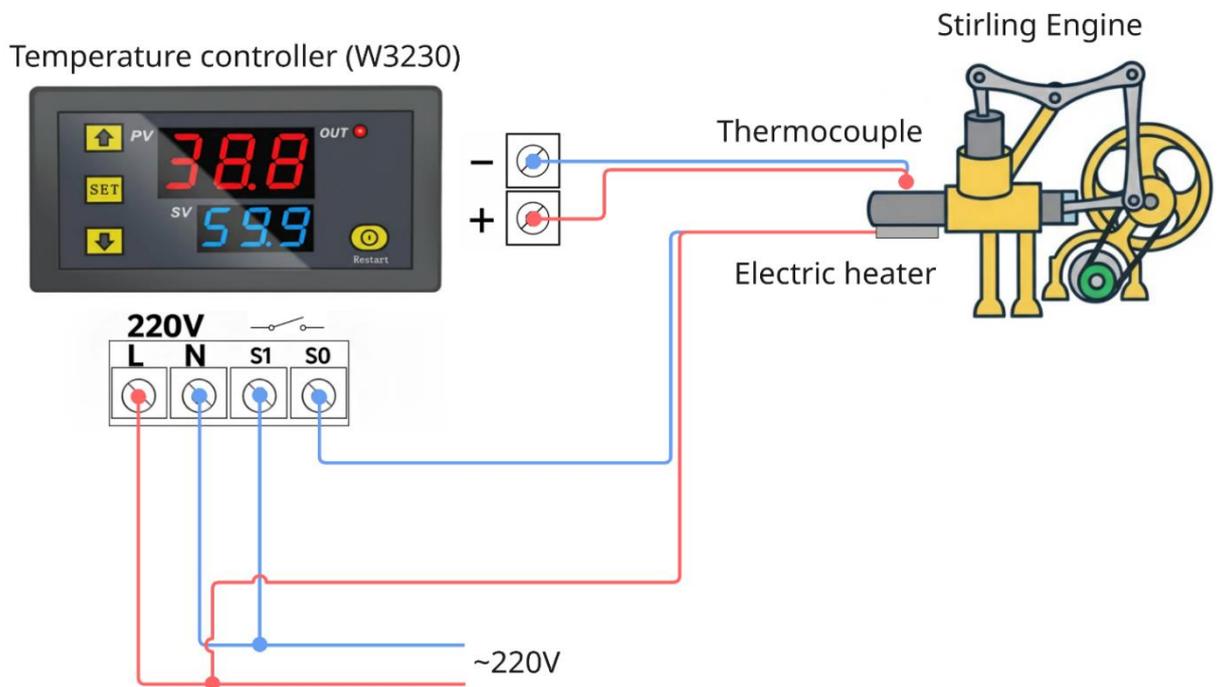


Рис. 3. Схema підключення терморегулятора W3230 з електронагрівачем та термопарою

На рис. 4 наведено загальний вигляд експериментального стенду з позначенням основних компонентів системи, що включає мікроконтролер, датчики вимірювання параметрів, елементи живлення та засоби відображення даних.

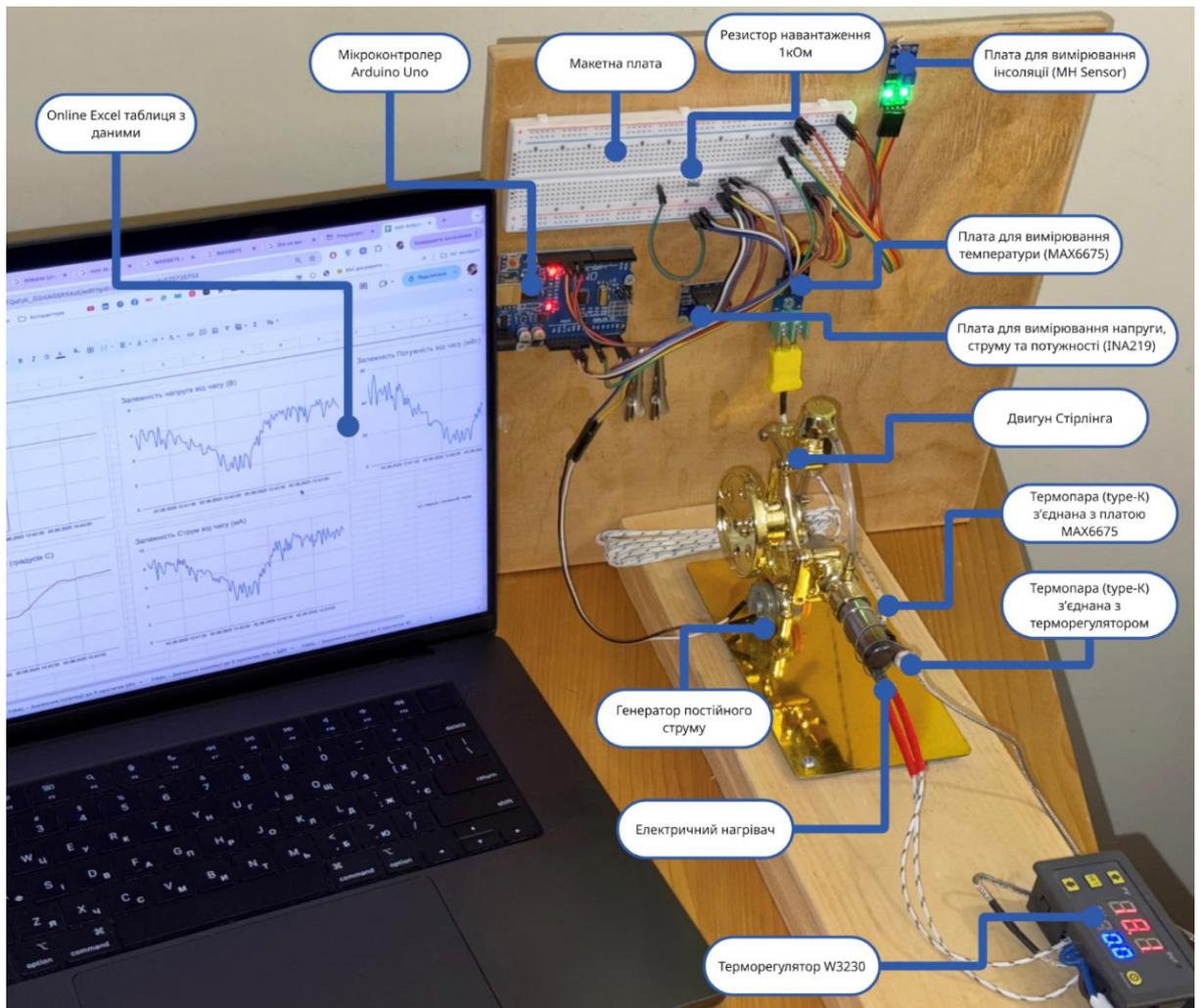


Рис. 4. Загальний вигляд експериментального стенду з позначенням основних елементів системи

Отримані параметри роботи двигуна формують базу для подальшого аналізу впливу рівня інсоляції на вихідну потужність і стабільність роботи установки. Таким чином, створений стенд виступає не лише засобом перевірки теоретичних результатів моделювання, але також є універсальною платформою для подальших досліджень енергетичних систем на основі двигуна Стірлінга.

Проведення експериментальних досліджень та аналіз отриманих результатів. Після завершення етапу розроблення та налагодження експериментальної установки було проведено серію вимірювань, а саме:

- запуск системи та вихід на стаціонарний режим;

- робота при змінній інсоляції, а саме вплив різкого зниження прямого сонячного випромінювання протягом 20, 40 та 60 с. Для кожного сценарію розглядалися два режими: з додатковим джерелом енергії та без нього.

У процесі експерименту здійснювався синхронний збір даних з усіх сенсорів вимірювальної підсистеми, що дозволило отримати часові залежності основних параметрів: напруги, струму, потужності на генераторі, температури гарячої зони двигуна Стірлінга, виробленої електроенергії та рівня сонячної інсоляції.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 5 наведені часові залежності основних параметрів системи на етапі початкового нагрівання та запуску двигуна Стірлінга в ході експерименту. Аналіз графіків підтверджує наявність перехідного процесу. Температура гарячої частини двигуна досягає значення 400 °С на 124-й секунді. Стабілізація температури (критерій – зміна менш ніж на 1 °С за 5 с) відбувається на 132-й секунді; на цьому ж етапі фіксується максимальна стабільна температура 405 °С.

Імпульсний момент обертання було подано на 133-й секунді, що спричинило зростання вихідних енергетичних параметрів генератора. Однак, енергетичні параметри в експериментальних умовах збільшуються повільно (близько 120 с) та стабілізуються лише після 250 секунд експерименту. Це обумовлено впливом реальних факторів, таких як електромагнітне навантаження, механічний опір та інерційні характеристики системи, які уповільнюють вихід на сталий режим роботи.

Крім того, під час експерименту спостерігається виражене зниження температури гарячої частини двигуна в момент запуску. Це свідчить про інтенсивніший теплообмін між гарячою та холодною зонами системи після запуску. Причиною є те, що на момент подачі імпульсного моменту холодна частина двигуна ще не досягла усталеної робочої температури й залишалася відносно холоднішою. Унаслідок цього на початковому етапі обертання та активізації робочого процесу відбувається посилене відведення тепла від гарячого теплообмінника до холоднішої області, що спричиняє короткочасне зниження температури гарячої частини. Після прогрівання холодної секції та встановлення теплового балансу температура гарячої частини двигуна Стірлінга поступово зростає та стабілізується.

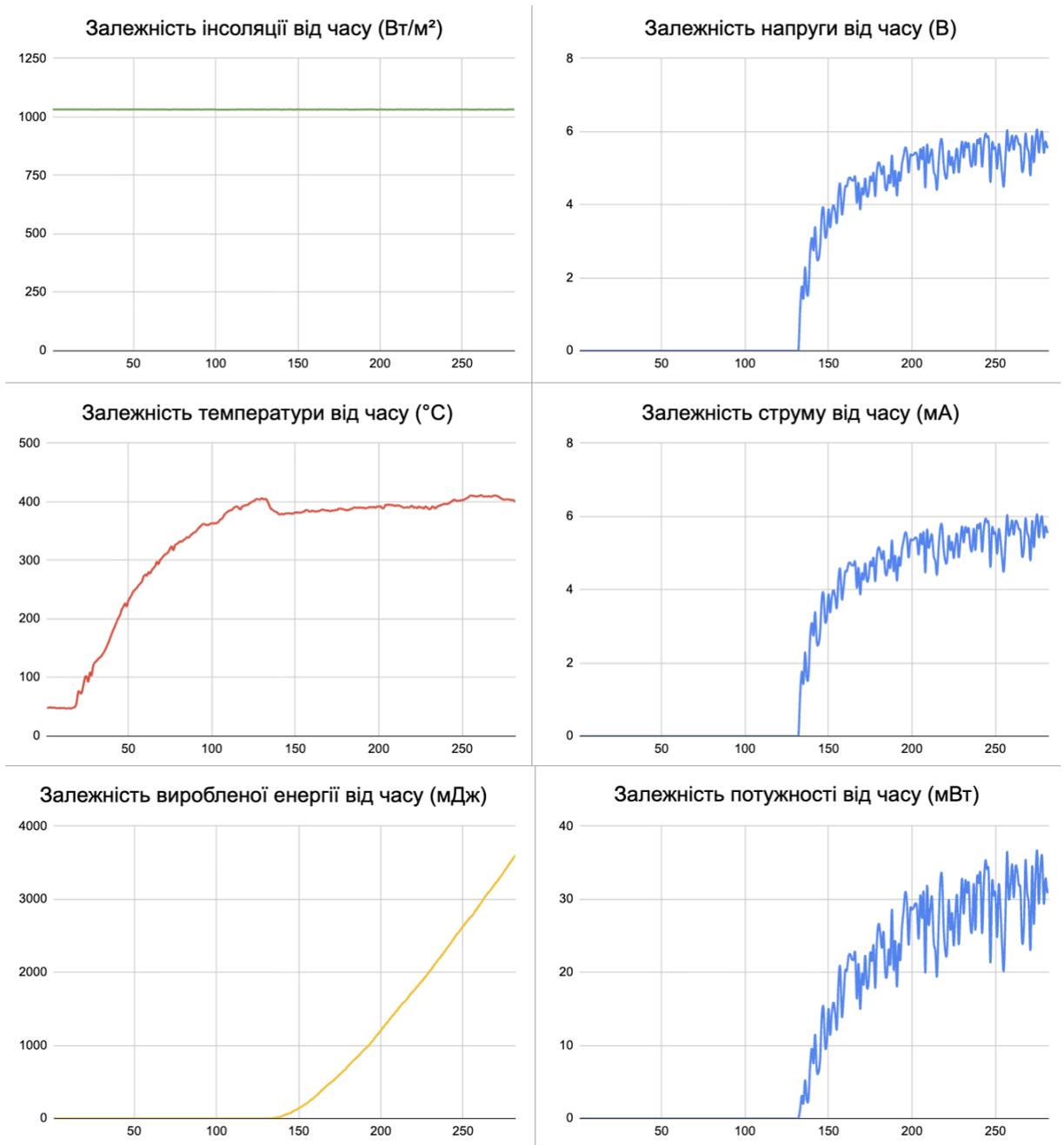


Рис. 5. Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час початкового етапу експерименту (нагрівання системи та момент запуску)

У стаціонарному режимі спостерігаються такі середні значення: напруга 5,4 В ($\pm 0,6$ В), струм 5,4 мА ($\pm 0,6$ мА) та потужність 29,8 мВт ($\pm 6,7$ мВт). Це зумовлено сукупною дією декількох факторів: наявністю похибки вимірювання, впливом

механічних вібрацій і тертя в підшипникових вузлах, а також нестабільністю теплового потоку між гарячою та холодною зонами двигуна. Унаслідок цього швидкість обертання генератора зазнає більш виражених коливань, що безпосередньо впливає на зміну електричних параметрів у часі. Крім того, незначні зміни температури робочого тіла призводять до зміни тиску та моменту, створюваного двигуном, що додатково підсилює нестабільність обертального руху.

Наступним етапом експериментального дослідження став аналіз реакції системи на різке зниження рівня інсоляції. З цією метою на 50-й секунді стаціонарного режиму роботи здійснювалося короткочасне (тривалістю 20 с) припинення фокусування сонячного випромінювання лінзою Френеля на гарячій частині двигуна Стірлінга. Після завершення цього інтервалу фокусування сонячного випромінювання було повністю відновлено.

Випробування проводилися для двох конфігурацій системи: базової та модифікованої – із застосуванням ДДЕ у вигляді електронагрівача. У другому випадку електронагрівач вмикався одночасно з припиненням фокусування сонячного потоку, забезпечуючи часткову компенсацію теплових втрат.

На рисунках 6 та 7 наведено результати моделювання 20-секундного зниження інсоляції, які демонструють динаміку зміни вихідних електричних параметрів, інсоляції та температури гарячої частини двигуна Стірлінга для системи без ДДЕ та з компенсацією теплових втрат за рахунок його використання відповідно.

Аналіз експериментальних даних, поданих на рис. 6 показав, що зупинка двигуна Стірлінга зафіксована на 67-й секунді. Температура гарячої зони в момент зупинки становила 301 °С, а мінімальне її значення 276 °С було досягнуто на 73-й секунді. Повторний запуск відбувався на 103-й секунді, коли температура гарячої частини двигуна досягла 400 °С, тобто простій двигуна був протягом 36 с. Отримані результати свідчать про те, що система характеризується вираженою тепловою та механічною інерційністю, що забезпечує збереження її працездатності протягом періоду після зниження інсоляції.

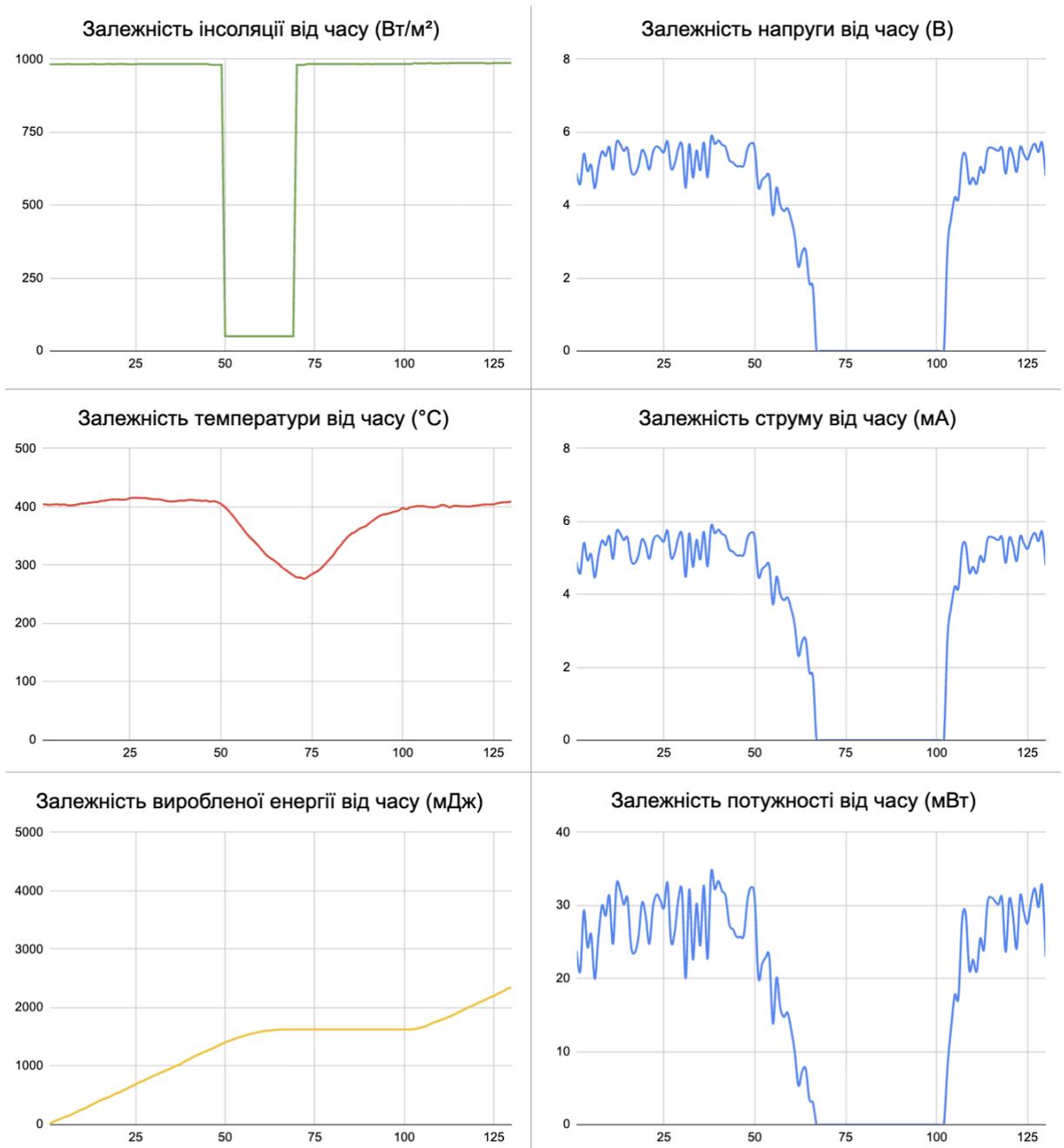


Рис. 6. Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 20 с без ДДЕ

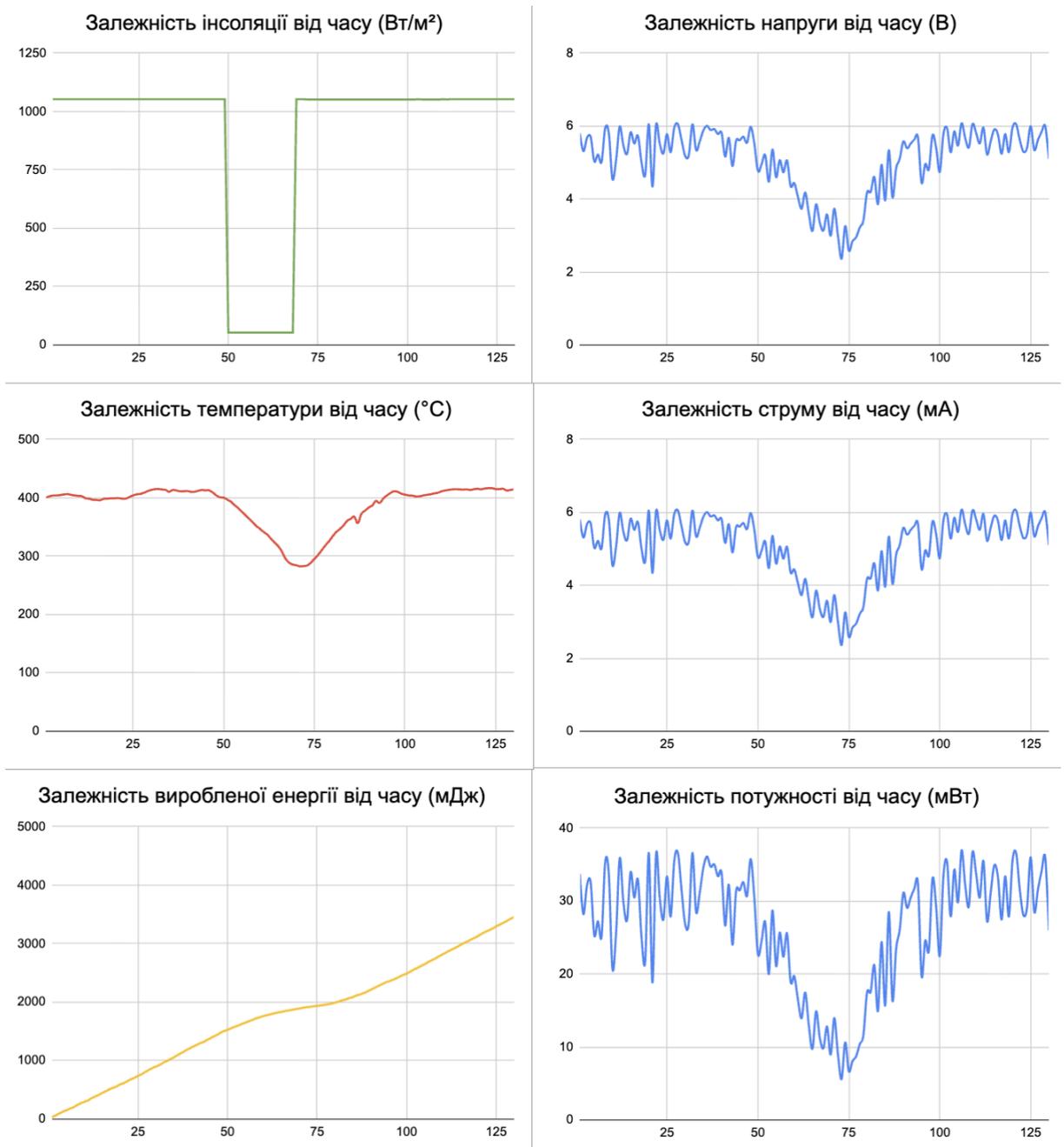


Рис. 7. Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 20 с з ДДЕ

Аналіз залежностей, наведених на рис. 7, підтверджує, що використання ДДЕ підвищує стійкість системи та безперервність роботи двигуна Стірлінга під час 20-секундного переривання інсоляції. Температура гарячої частини двигуна знизилася

до 283 °С, і спостерігалася на 72-й секунді експерименту. При цьому потужність генератора зменшилася до 6 мВт.

Порівняння з результатами експерименту без застосування ДДЕ свідчить, що двигун продовжував працювати навіть при температурі нижче 301°С, за якої відбулася його зупинка у попередньому випадку. Це пояснюється більш рівномірним розподілом теплової енергії, що надходить від електронагрівача, до гарячої частини двигуна Стірлінга, завдяки чому зменшуються температура у місці термопари.

Порівняльний аналіз вихідної електричної енергії генератора протягом 130-секундного експерименту показує, що у конфігурації без ДДЕ крива має виражену S-подібну форму, що зумовлено повною зупинкою двигуна та подальшим його перезапуском після відновлення температури. На противагу цьому, у випадку з ДДЕ крива продемонструвала іншу поведінку: на ділянці зниження інсоляції характеристика набула більш пологого, близького до горизонтального, що обумовлено зниженням вихідної потужності.

На кінець експерименту загальна величина виробленої енергії становила 2352 мДж для системи без ДДЕ та 3451 мДж для системи з ДДЕ, що відповідає збільшенню у 1,47 рази. Отримані результати підтверджують здатність ДДЕ підвищити стабільність та кількість виробленої електроенергії в умовах змінної інсоляції.

Наступним етапом експерименту стало дослідження системи умовах більш тривалого зниження інсоляції – тривалістю 40 та 60 с. На рис. 8 та 9 наведені часові залежності основних параметрів системи під час 40-секундного переривання інсоляції для випадків без ДДЕ та із його використанням відповідно.

Аналіз рис. 8 підтверджує, що 40-секундне падіння температури джерела призводить до глибшого охолодження системи порівняно з 20-секундним сценарієм. Мінімальна температура гарячої частини, зафіксована на 91-й секунді, становила 225 °С. Повторний запуск двигуна відбувся лише на 148-й секунді, коли температура гарячої частини знову досягла порогового значення 400 °С. Таким чином, загальний час простою системи склав 77 с (з 71-ї по 148-у секунду).

Результати експерименту з увімкненим додатковим джерелом енергії (рис. 9) показують здатність системи підтримувати робочий цикл протягом усього 40-секундного періоду зниження сонячної інсоляції. У цей час температура гарячої зони поступово зменшується, досягаючи мінімального значення 263 °С на 91-й секунді, що на 38 °С вище, ніж у випадку без ДДЕ. Електрична потужність генератора досягає мінімуму 8 мВт на 90-й секунді.

Після відновлення інсоляції температура гарячої зони починає зростати, і вже до 112-ї секунди потужність повертається до рівня, характерного для стаціонарного режиму (30 мВт) при температурі 378 °С. Максимального значення потужність досягає на 139-й секунді, становлячи 42,6 мВт при температурі 421°С, після чого система стабілізується приблизно на 145-й секунді. Таким чином, при 40-секундному інтервалі зниження інсоляції експериментальні результати демонструють короткочасне підвищення вихідної потужності генератора після відновлення сонячного потоку, що зумовлено тепловіддачею електронагрівача, який продовжує віддавати теплоту до гарячої частини двигуна Стірлінга після вимкнення.

Порівняння характеристик виробленої електричної енергії генератором у разі відсутності ДДЕ та за його використання для 40-секундного інтервалу зниження інсоляції в межах загального експериментального періоду тривалістю 170 секунд показує, що форми кривих потужності мають подібний характер до динаміки, зафіксованої під час 20-секундного інтервалу. Кількісний аналіз результатів свідчить, що сумарна вироблена електрична енергія у системі без ДДЕ становила 2472,5 мДж, тоді як із його застосуванням – 4715,9 мДж. Таким чином, використання додаткового джерела енергії забезпечує підвищення виробленої електроенергії у 1,9 рази.

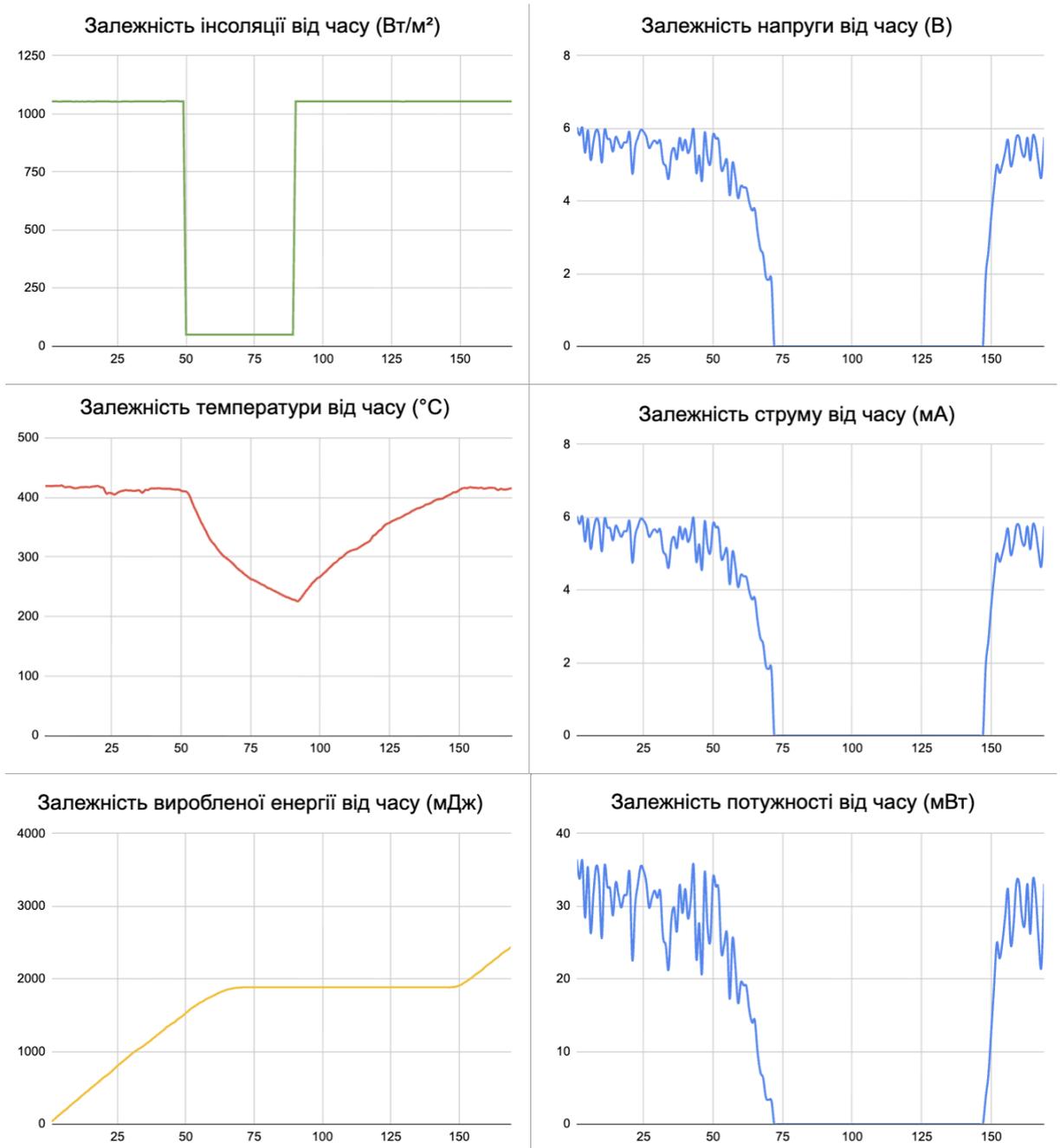


Рис. 8. Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 40 с без ДДЕ

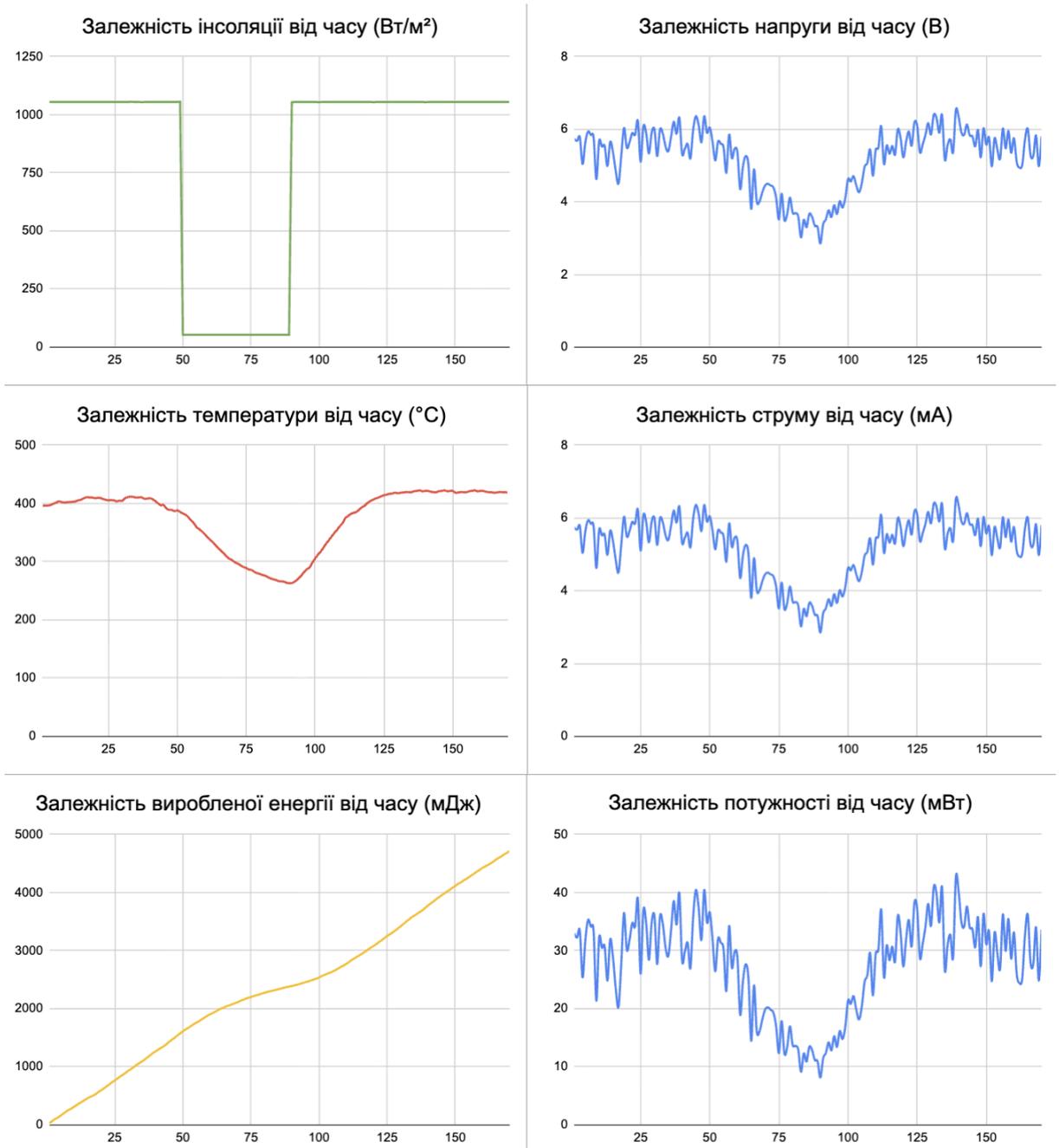


Рис. 9. Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 40 с з ДДЕ

На рис. 10 та 11 представлено часові залежності основних параметрів системи під час 60-секундного переривання інсоляції для випадків без додаткового джерела енергії (електронагрівача) та з ДДЕ відповідно.

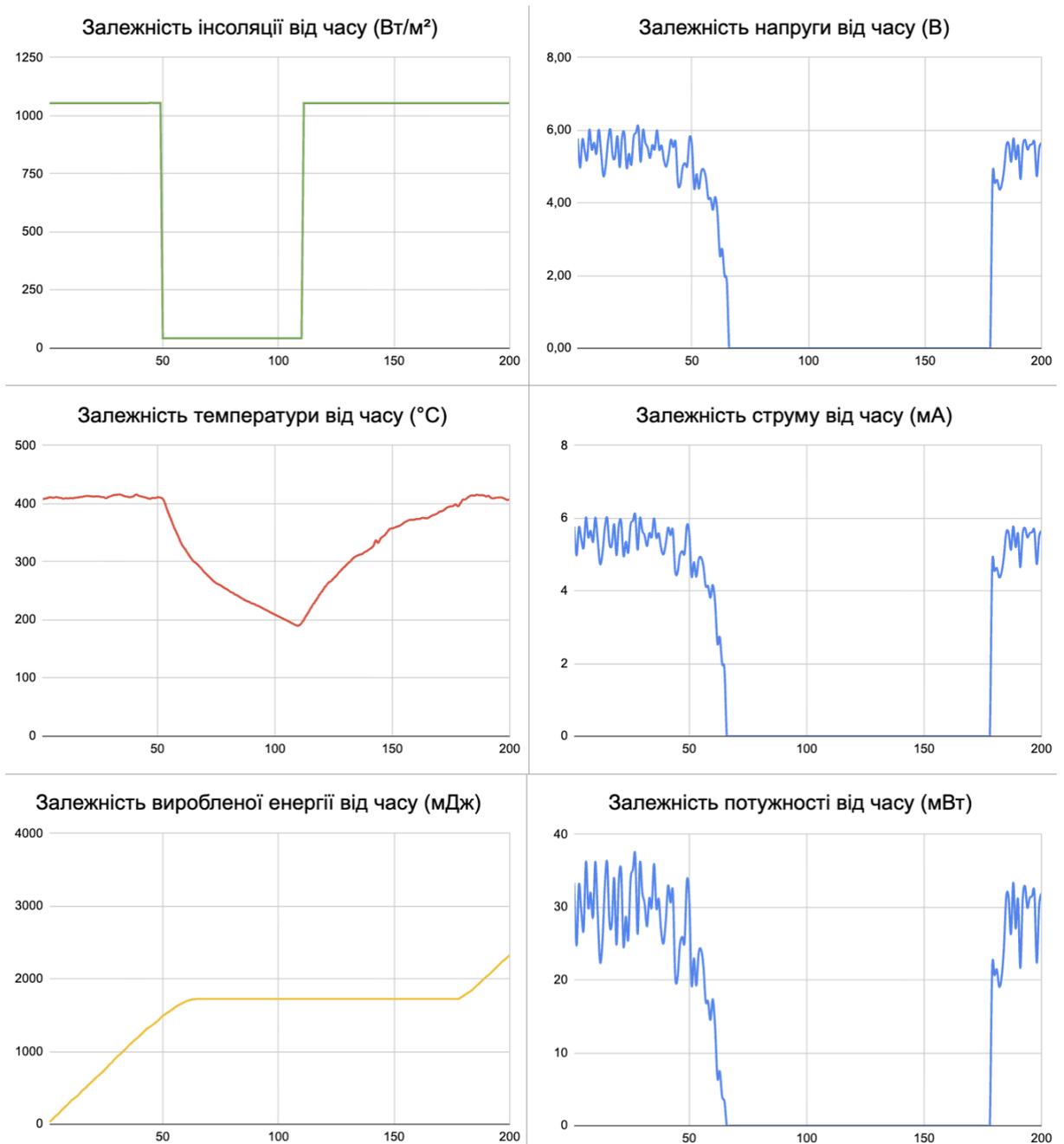


Рис. 10. Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 60 с без ДДЕ

Аналіз даних, наведених на рис. 10, показує, що мінімальна температура гарячої частини системи, зафіксована на 110-й секунді, становила 190 °С. Повторний запуск двигуна Стірлінга відбувся на 179-й секунді, коли температура гарячої зони знову досягла порогового значення 400 °С. Таким чином, загальна тривалість простою системи становила 113 с (у проміжку між 66-ю та 179-ю

секундами). Цей показник на 77 с перевищує тривалість простою для 20-секундного періоду відсутності інсоляції та на 36 секунд – для аналогічного 40-секундного періоду.

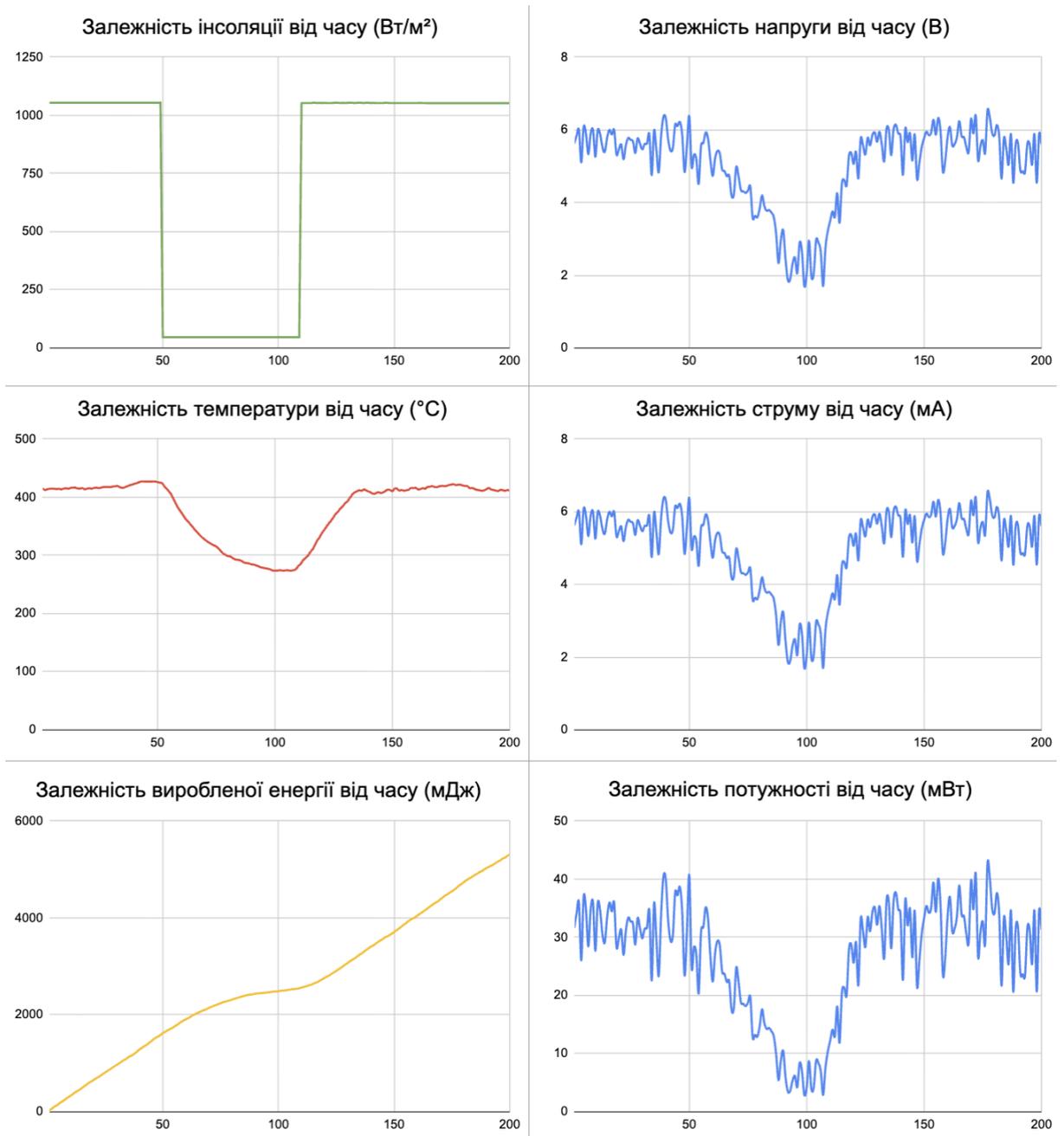


Рис. 11. Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 60 с з ДДЕ

Експеримент з увімкненим ДДЕ (рис. 11) підтвердив здатність підтримувати робочий цикл протягом усього 60-секундного періоду зниження інсоляції. Температура гарячої зони при цьому поступово знижується до мінімального значення 274 °С на 103-й секунді, що на 84 °С вище, ніж у випадку без ДДЕ.

Після відновлення інсоляції на 110-й секунді спостерігається зростання температури. До 140-ї секунди потужність досягає значення, характерного для стаціонарного режиму (30 мВт), при температурі 409 °С. Максимального значення потужність сягає на 177-й секунді, складаючи 42,7 мВт при температурі 420 °С, стабілізація системи відбувається на 185-й секунді.

Аналіз роботи виробленої електричної енергії генератором протягом 60-секундного інтервалу зниження інсоляції в рамках 200-секундного експерименту підтвердив ключову роль ДДЕ. Як і в попередніх дослідженнях, відсутність ДДЕ призводить до швидкої втрати теплового потенціалу двигуна, що викликає різке падіння електричної потужності. На противагу цьому, при активному ДДЕ система продовжує працювати.

Кількісні результати підтверджують цей висновок: у системі без ДДЕ загальна вироблена енергія становила 2327,2 мДж, тоді як із використанням додаткового джерела енергії – 5310,8 мДж. Таким чином, застосування ДДЕ забезпечує зростання електроенергетичної продуктивності системи приблизно у 2,3 рази, що підтверджує його ключову роль у стабілізації теплового режиму та підтриманні генерації під час періодів низької інсоляції.

Порівняльний аналіз кількості виробленої електричної енергії для всіх інтервалів зниження інсоляції за умов відсутності допоміжного джерела енергії та за його використання у ході експериментів дозволяє зробити висновок, що експериментальні результати підтверджують тенденцію: зі збільшенням тривалості інтервалу зниження інсоляції різниця у виробленій енергії між режимами без ДДЕ та з ДДЕ зростає. Це зумовлено тим, що зі збільшенням тривалості зниження інсоляції подовжується період простою двигуна Стірлінга, що, відповідно, посилює втрати згенерованої енергії у разі відсутності додаткового нагрівання.

Проте варто зазначити, що для будь-якого варіанту розрахунків вихідної енергії з урахуванням витрат електронагрівача буде від'ємним, оскільки потужність останнього становить 30 Вт. Для цієї конфігурації двигуна Стірлінга та генератора, які мають невисокі показники ККД, це призводить до енергетичної неефективності системи в абсолютному вимірі. Таким чином, для розглянутої моделі використання ДДЕ доцільне лише у випадках, коли критично важливо уникнути повної зупинки двигуна, адже результати експерименту чітко демонструють, що наявність ДДЕ забезпечує безперервність його роботи навіть за відсутності сонячного нагріву.

Висновки та перспективи.

1. На основі створеного експериментального стенду підтверджено працездатність системи на базі двигуна Стірлінга з концентрацією сонячного випромінювання за допомогою лінзи Френеля. Отримані результати засвідчують, що динаміка зміни характеристик експериментальної установки демонструє теплову та механічну інерційність, що свідчить про необхідність урахування в математичній моделі цього фактору.

2. У стаціонарному режимі середні значення вихідних показників генератора постійного струму, приєднаного до двигуна Стірлінга, становлять: напруга – 5,4 В ($\pm 0,6$ В), струм – 5,4 мА ($\pm 0,6$ мА), потужність – 29,8 мВт ($\pm 6,7$ мВт).

3. Ефективність ДДЕ для підтримання неперервності роботи підтверджено експериментально. Застосування електронагрівача дозволило повністю усунути простої системи протягом усіх досліджуваних інтервалів відсутності інсоляції (20, 40 та 60 с), тоді як без ДДЕ двигун щоразу зупинявся.

4. Експеримент підтвердив тенденцію до зростання різниці виробленої електричної енергії із збільшенням тривалості переривання інсоляції при використанні ДДЕ. Кількість виробленої енергії у системі з ДДЕ у порівнянні з режимом без нього зросла в 1,47; 1,9 та 2,3 рази для перерв тривалістю 20, 40 та 60 с відповідно.

Список використаних джерел

1. Cardozo E, Erlich C, Malmquist A, Alejo L. Integration of a wood pellet burner and a Stirling engine to produce residential heat and power. *Appl Therm Eng.* 2014. **73**(1): 671-680. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.024>.

2. Thiers S, Aoun B, Peuportier B. Experimental characterization, modeling and simulation of a wood pellet micro-combined heat and power unit used as a heat source for a residential building. *Energy Build.* 2010. 42(6): 896-903. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.011>.

3. Martin Nilsson. Simplified pumped thermal energy storage using a two-way Stirling cycle. *Journal of Energy Storage.* 2024. 73(2): 108994. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108994>.

References

1. Cardozo, E, Erlich, C, Malmquist, A, Alejo, L. (2014). Integration of a wood pellet burner and a Stirling engine to produce residential heat and power. *Appl Therm Eng.*, 73(1), 671-680. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.024>.

2. Thiers, S, Aoun, B, Peuportier, B. (2010). Experimental characterization, modeling and simulation of a wood pellet micro-combined heat and power unit used as a heat source for a residential building. *Energy Build.*, 42(6), 896-903. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.011>.

3. Martin Nilsson (2024). Simplified pumped thermal energy storage using a two-way Stirling cycle. *Journal of Energy Storage*, 73(2), 108994. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108994>.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE OPERATION OF A STIRLING ENGINE WITH A SOLAR CONCENTRATOR AND AN ADDITIONAL ENERGY SOURCE

V. Golovko, M. Berezniuk

Abstract. *The efficiency of solar energy is limited by the natural variability of solar radiation levels. The Stirling engine is a promising solution for solar energy systems, especially when using concentrators, such as a Fresnel lens. The main obstacle to the widespread implementation of such systems is their dependence on the stability of solar radiation.*

The purpose of the research is to create an experimental stand and methodology to determine the feasibility of using an additional energy source (electric heater) to prevent the shutdown of the Stirling engine, which uses concentrated solar radiation using a Fresnel lens as the main source of heat.

The paper presents an experimental study of the Stirling engine, which includes the study of the effect of variable insolation and the assessment of the efficiency of using an electric heater as an additional energy source (AES) to improve system stability. A series of experiments was conducted with different durations of insolation interruption (20, 40 and 60 s). The results confirmed the ability of the AES to prevent engine shutdown and increase the total energy produced by 47 %, 90 % and 130 % for the respective intervals.

Key words: *Stirling engine, Fresnel lens, additional energy source, power stabilization, solar energy, experimental stand*