

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Бережнюк Микола Миколайович

УДК 621.472

ДИСЕРТАЦІЯ

Термоелектрична установка на основі двигуна Стірлінга

**за спеціальністю 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
в галузі знань 14 Електрична інженерія**

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М.М. Бережнюк

Науковий керівник:

Головко Володимир Михайлович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Бережнюк М.М. Термоелектрична установка на основі двигуна Стірлінга. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, галузь знань 14 Електрична інженерія. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2026.

Дисертаційне дослідження спрямоване на вирішення актуальної наукової задачі – визначення характеру впливу чинників надходження енергії сонячного випромінювання на показники стабілізації вихідних параметрів термоелектричної установки на базі двигуна Стірлінга шляхом математичного та фізичного моделювання.

У роботі здійснено порівняльний аналіз основних типів концентраційних установок сонячного випромінювання, зокрема параболічних рефлекторів, лінійних рефлекторів Френеля, концентраційних веж, параболічних тарілчастих концентраторів та систем на основі лінз Френеля. Під час порівняння враховано ключові технічні характеристики: тип фокусування та особливості трекінгових систем, робочі температурні режими, концентраційний коефіцієнт, можливість інтеграції двигуна Стірлінга як поглинача концентрованого сонячного випромінювання, типи систем акумулювання енергії, а також принципи реалізації механізму концентрації сонячного випромінювання. Аналіз доводить, що найбільш раціональним рішенням для електропостачання домогосподарств є система, що застосовує двигун Стірлінга, який інтегрований із концентраторами сонячної енергії на основі лінз Френеля. Двигун Стірлінга як поглинач сонячного випромінювання може застосовуватися в параболічних концентраторах тарілчастого типу та концентраторах із використанням лінз Френеля точкового фокусування, що забезпечує вищу ефективність системи завдяки відсутності втрат теплоти через теплоносій, а основним недоліком усіх таких систем є

необхідність використання системи відстеження руху Сонця (трекінгу) для забезпечення високої ефективності протягом дня.

Розроблено методику визначення залежності площі концентраційної плями та глибини фокусу від відстані між лінзою Френеля та поглинальною поверхнею, а також встановлено залежність температури концентраційної плями від її площі. Отримані результати дають підстави стверджувати, що глибина фокусу є одним із ключових параметрів лінзи, який визначає необхідну точність її позиціонування відносно нагрівача двигуна Стірлінга. Коректне розташування лінзи забезпечує формування мінімально можливої концентраційної плями, у межах якої відбувається максимальне фокусування сонячного випромінювання.

Для лінзи з геометричними параметрами $r=150\text{мм}$ та $f=200\text{мм}$ встановлено, що допустиме відхилення від номінальної фокусної відстані становить $\pm 1,2\text{мм}$. Дослідження також показало, що температура у зоні концентрації випромінювання істотно залежить від зміни відстані між лінзою та фокусною поверхнею. Зокрема, у наведеному прикладі зсув лінзи на $\pm 15\text{мм}$ від положення фокусу може спричинити зміну максимальної температури концентраційної плями на величину більше 3000°C за умови інсоляції 1000Вт/м^2 . Також виявлено, що інтенсивність сонячного випромінювання впливає на температуру значно сильніше у випадках, коли площа концентраційної плями є малою. Так, при зниженні інсоляції з 1000 до 400Вт/м^2 температурний перепад для площі $2,72\text{мм}^2$ сягає близько 850°C , тоді як для площі 400мм^2 зміна температури становить лише приблизно 240°C . Це підтверджує критичну роль геометричних параметрів концентраційної системи у формуванні температурних режимів нагрівача двигуна Стірлінга.

Встановлено, що мінімальна робоча температура на приймачі двигуна є ключовим параметром для вибору радіуса лінзи, оскільки саме температура визначає мінімальну кількість енергії, необхідну для роботи двигуна. Навіть при високому рівню інсоляції (більше 1000 Вт/м^2), якщо розмір лінзи обмежений через певні причини, необхідно використовувати додаткові відбивачі сонячного

випромінювання. Це дозволяє компенсувати недостатній розмір лінзи та забезпечити отримання необхідної кількості енергії.

Розглянуто два варіанти увімкнення додаткового джерела енергії під час зниження інсоляції протягом 40 с: при досягненні критичної температури та при зниженні потужності нижче мінімального рівня. Визначено, що для компенсації необхідної енергії потрібно 1155 Дж у першому випадку та 1318 Дж у другому, а з урахуванням коефіцієнта корисної дії електронагрівача – відповідно 1283 Дж і 1464 Дж. Різниця між цими значеннями становить 181 Дж (12%). Це пов'язано з тим, що вмикання додаткового джерела енергії при зниженні потужності відбувається на 5 с раніше, ніж у випадку з критичною температурою. Увімкнення додаткового джерела енергії при досягненні критичної температури є економічнішим варіантом, проте ризик зупинки системи в цьому випадку залишається високим. Якщо зупинка двигуна є неприпустимою, рекомендується використовувати варіант із увімкненням додаткового джерела енергії при досягненні мінімально рівня інсоляції, оскільки він забезпечує вищу температуру на приймачі двигуна, стабілізує роботу системи та підвищує ефективність генерації енергії.

Крім того, сформульовано підхід до оцінювання доцільності використання додаткового джерела енергії з метою забезпечення стабільної роботи двигуна Стірлінга. Встановлено, що раціональність застосування додаткового джерела енергії визначається не лише рівнем ККД системи та поточною величиною інсоляції, а й тривалістю її зниження. Отже, враховуючи вищесказане, з'являється можливість обґрунтовано визначати моменти, коли використання додаткового джерела енергії є найбільш виправданим. Це дає змогу оптимізувати роботу установки та забезпечити максимальний сумарний виробіток електроенергії навіть за умов нестабільного сонячного випромінювання.

У дисертаційній роботі розглянуто класифікацію математичних моделей двигуна Стірлінга від нульового до четвертого порядку аналізу, що відрізняються рівнем деталізації фізичних процесів та складністю розрахунків. Проаналізовано особливості емпіричних моделей (нульовий порядок),

ізотермічного підходу першого порядку (аналіз Шмідта), адіабатичної моделі другого порядку з відокремленим урахуванням втрат, вузлового аналізу третього порядку та багатовимірної моделювання четвертого порядку. Обґрунтовано доцільність застосування методу другого порядку як компромісного підходу між точністю відтворення термодинамічних процесів і складністю чисельної реалізації, що є оптимальним для проведення інженерних розрахунків і оптимізаційних досліджень двигуна Стірлінга в межах даної роботи.

У середовищі Simulink розроблено математичну модель для дослідження вихідних параметрів генератора постійного струму (напруги, струму та потужності), під'єданого до двигуна Стірлінга, а також для аналізу зміни температури на гарячій частині двигуна під час початкового нагріву, у момент запуску та за умов зниження сонячної інсоляції на інтервалах 20, 40 і 60 секунд – як без використання додаткового джерела енергії, так і з його застосуванням. Зазначений підхід дає змогу оцінити ефективність технічних рішень, спрямованих на стабілізацію роботи двигуна Стірлінга за змінних умов теплового навантаження.

Оскільки робота двигуна Стірлінга визначається стабільністю теплового підведення, отримані результати моделювання виявили, що навіть нетривале зменшення температури на гарячій частині двигуна (приблизно 20с) призводить до порушення узгодженості робочого циклу, що, у свою чергу, може спричинити його зупинку та зменшення виробітку електроенергії протягом фази відновлення теплового режиму. Така поведінка демонструє високу чутливість системи, яка використовує концентровану сонячну енергію, до динаміки інсоляції та підкреслює важливість врахування теплових коливань під час оцінювання ефективності всієї установки.

Створено експериментальний стенд та програмне забезпечення для перевірки достовірності результатів моделювання й дослідження реакції двигуна Стірлінга на коливання рівня сонячного випромінювання, а також для оцінювання доцільності застосування додаткового джерела енергії з позиції забезпечення стабільності та енергоефективності роботи системи. Розроблений

стенд включає три функціональні підсистеми: енергетичну – охоплює двигун Стірлінга, генератор постійного струму та систему нагрівання; вимірювальну – до складу входять датчики температури, інсоляції, напруги та струму разом із мікроконтролером Arduino Uno; та інформаційно-аналітичну – представлену серверною частиною на Node.js, що приймає дані від Arduino, здійснює їх первинну обробку та передавання у Google Sheets для подальшого аналізу.

Використання розробленого стенду дало змогу експериментально підтвердити працездатність системи з двигуном Стірлінга, що працює на основі концентрованого сонячного випромінювання, сформованого лінзою Френеля. Порівняння експериментальних даних із результатами моделювання показало їх загальну узгодженість, що свідчить про коректність обраних підходів до побудови математичної моделі.

Завдяки результатам роботи встановлено характер впливу чинників надходження сонячного випромінювання на показники стабільності вихідних параметрів термоелектричної установки на базі двигуна Стірлінга. Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації режимів роботи системи, удосконалення алгоритмів керування та підвищення її енергоефективності в умовах змінної інсоляції. Крім того, проведені дослідження створюють підґрунтя для масштабування запропонованого рішення та його адаптації до автономних або гібридних енергетичних систем.

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, двигун Стірлінга, лінза Френеля, сонячна енергетика, електрична енергія, теплова енергія, сонячне випромінювання, концентратори сонячного випромінювання, термоелектрична установка, стабілізація електричних параметрів, енергетичний баланс, перетворення механічної енергії, нестабільність генерування, флуктуації інсоляції, часткове затінення.*

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Результати дисертаційного дослідження висвітлені в 8 наукових працях, в тому числі в 4 статтях у періодичних наукових фахових виданнях України (на

момент опублікування) за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (3 з яких проіндексовані у базах *Scopus*), а також в 4 тезах доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.

1. Бережнюк М.М., Головка В.М. Сонячна термодинамічна електроустановка на основі двигуна Стірлінга. *Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 22 грудня 2022 р.* / Держ. біотехнологічний ун-т. – Харків: 2022. – с.27-28. Режим доступу: <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2023/01/tezy-conf-22-12-22n.pdf>. Співавтор Головка В.М. – брав участь у постановці завдання дослідження. Особистий внесок – формування концепції термоелектричної установки на основі двигуна Стірлінга та опис принципу її роботи.

2. Головка В.М., Бережнюк М.М. Аналіз концентраційних установок сонячного випромінювання для забезпечення роботи двигуна Стірлінга. *Відновлювана енергетика*, 2023. – №3 – с.18-31 DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).18-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).18-31). (Категорія А, *Scopus*) Співавтор Головка В.М. – здійснював наукові консультації. Особистий внесок – проведення аналізу концентраційних систем, вибір та обґрунтування типу концентратора для роботи двигуна Стірлінга.

3. Головка В.М., Бережнюк М.М. Концентраційна установка сонячного випромінювання на основі лінзи Френеля для забезпечення роботи двигуна Стірлінга. *XXV Міжнародна н.-п. конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»* – Київ, 2024. – с.220-222. DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024>. Співавтор Головка В.М. – брав участь у постановці завдання дослідження. Особистий внесок – формування методики розрахунку площі концентраційної плями сформованою круглою лінзою Френеля.

4. Головка В.М., Бережнюк М.М. Аналіз зміни відстані лінзи Френеля до концентраційної поверхні для забезпечення функціонування двигуна Стірлінга. *Відновлювана енергетика*, 2024. – №2 – с.32-40 DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).32-40](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).32-40). (Категорія А, *Scopus*)

Співавтор Головка В.М. – виконував роботи редакційного характеру. Особистий внесок – розробка методики та проведення розрахунків для аналізу впливу геометричних та оптичних параметрів лінзи на ефективність концентрації випромінювання.

5. Головка В.М., Бережнюк М.М. Стабілізація роботи двигуна Стірлінга при змінному надходженні сонячного випромінювання. *XXVI Міжнародна н.-п. конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»* – Київ, 2025. – с.114-115. DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.21-23.05.2025>. Співавтор Головка В.М. – виконував роботи редакційного характеру. Особистий внесок – дослідження впливу нестабільності інсоляції та розробка підходу до стабілізації режимів роботи двигуна.

6. Головка В.М., Бережнюк М.М. Оцінка доцільності використання додаткового джерела енергії для забезпечення стабільної роботи двигуна Стірлінга. *Відновлювана енергетика*, 2025. – №2 – с.75-87 DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).75-87](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).75-87). (Категорія А, Scopus) Співавтор Головка В.М. – здійснював наукові консультації. Особистий внесок – розробка методики оцінювання, виконання розрахунків та обґрунтування режимів підключення додаткового джерела енергії.

7. Головка В.М., Бережнюк М.М. Моделювання й аналіз роботи двигуна Стірлінга в умовах нестабільного надходження теплоти. *Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 5 листопада 2025 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. – Харків: 2025. – с.64-65. Режим доступу: <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2025/11/conf-05-11-25-tezy.pdf>*. Співавтор Головка В.М. – виконував роботи редакційного характеру. Особистий внесок – розробка математичної моделі, проведення моделювання та аналіз отриманих залежностей.

8. Головка В.М., Бережнюк М.М. Експериментальне дослідження роботи двигуна Стірлінга з сонячним концентратором та додатковим джерелом

енергії. *Енергетика та автоматика*, 2025. – №4 – с.99-120 DOI: [https://doi.org/10.31548/energiya4\(80\).2025.099](https://doi.org/10.31548/energiya4(80).2025.099). (Категорія Б) Співавтор Головко В.М. – здійснював наукове керівництво, формування концепції дослідження, постановку наукової задачі та редакційне опрацювання матеріалів статті. Особистий внесок – розробка та створення експериментальної установки, програмного забезпечення для збору й обробки даних, проведення експериментальних досліджень, математична обробка та аналіз отриманих результатів, підготовка графічних матеріалів і основного тексту статті.

SUMMARY

Bereznyiuk M.M. Thermodynamic system based on the Stirling engine. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 Electric power, electrical engineering and electromechanics in the field of knowledge 14 Electrical engineering. National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2025.

The dissertation research is aimed at solving an urgent scientific problem – determining the nature of the influence of solar radiation energy factors on the stabilization of the output parameters of a Stirling engine-based thermoelectric plant through mathematical and physical modeling.

The work provides a comparative analysis of the main types of solar radiation concentration plants, in particular parabolic reflectors, Fresnel linear reflectors, concentration towers, parabolic dish concentrators and Fresnel lens-based systems. The comparison takes into account key technical characteristics: the type of focusing and features of tracking systems, operating temperature ranges, concentration coefficient, the possibility of integrating a Stirling engine as an absorber of concentrated solar radiation, types of energy storage systems, as well as the principles of implementing the solar radiation concentration mechanism. The analysis proves that the most rational solution for household power supply is a system that uses a Stirling engine integrated with solar energy concentrators based on Fresnel lenses. The Stirling engine as a solar radiation absorber can be used in parabolic dish-type concentrators and concentrators using Fresnel point-focusing lenses, which ensures higher system efficiency due to the absence of heat loss through the heat transfer medium. The main disadvantage of all such systems is the need to use a sun tracking system to ensure high efficiency throughout the day.

A method has been developed to determine the dependence of the concentration spot area and focus depth on the distance between the Fresnel lens and the absorbing surface, and the dependence of the concentration spot temperature on its area has been

established. The results obtained give grounds to assert that the focus depth is one of the key parameters of the lens, which determines the required accuracy of its positioning relative to the Stirling engine heater. The correct position of the lens ensures the formation of the smallest possible concentration spot, within which the maximum focusing of the solar flux occurs.

For a lens with geometric parameters $r=150\text{mm}$ and $f=200\text{mm}$, it has been established that the permissible deviation from the nominal focal length is $\pm 1.2\text{mm}$. The study also showed that the temperature in the radiation concentration zone significantly depends on the change in the distance between the lens and the focal surface. In particular, in the example given, a lens shift of $\pm 15\text{mm}$ from the focus position can cause a change in the maximum temperature of the concentration spot by more than 3000°C under insolation of $1000\text{W}/\text{m}^2$. It has also been found that the intensity of solar radiation has a much stronger effect on temperature when the concentration spot area is small. Thus, when the insolation decreases from 1000 to $400\text{W}/\text{m}^2$, the temperature difference for an area of 2.72mm^2 reaches about 850°C , while for an area of 400mm^2 , the temperature change is only about 240°C . This confirms the critical role of the geometric parameters of the concentration system in shaping the temperature regimes of the Stirling engine heater.

It has been established that the minimum operating temperature at the engine receiver is a key parameter for selecting the lens radius, since it is the temperature that determines the minimum amount of energy required for the engine to operate. Even with high insolation levels (over $1000\text{W}/\text{m}^2$), if the lens size is limited for certain reasons, additional solar reflectors must be used. This compensates for the insufficient lens size and ensures that the required amount of energy is obtained.

Two options for switching on an additional energy source during a 40-second decrease in insolation are considered: when a critical temperature is reached and when the power drops below the minimum level. It was determined that 1155J is required to compensate for the necessary energy in the first case and 1318J in the second, and taking into account the efficiency of the electric heater, 1283J and 1464J , respectively. The difference between these values is 181J (12%). This is due to the fact that the

activation of an additional energy source when the power decreases occurs 5 seconds earlier than in the case of a critical temperature. Activating an additional energy source when a critical temperature is reached is a more economical option, but the risk of system shutdown in this case remains high. If engine shutdown is unacceptable, it is recommended to use the option of switching on the additional energy source when the minimum insolation level is reached, as it provides a higher temperature at the engine receiver, stabilises the system operation and increases the efficiency of energy generation.

In addition, an approach has been formulated for assessing the feasibility of using an additional energy source to ensure stable operation of the Stirling engine. It has been established that the rationality of using an additional energy source is determined not only by the efficiency of the system and the current value of insolation, but also by the duration of its reduction. Therefore, taking into account the above, it becomes possible to reasonably determine the moments when the use of an additional energy source is most justified. This makes it possible to optimise the operation of the installation and ensure maximum total electricity generation even under conditions of unstable solar flux.

The dissertation considers the classification of mathematical models of Stirling engines from zero to fourth order of analysis, which differ in the level of detail of physical processes and the complexity of calculations. The features of empirical models (zero order), the first-order isothermal approach (Schmidt analysis), the second-order adiabatic model with separate consideration of losses, third-order node analysis, and fourth-order multidimensional modelling are analysed. The feasibility of using the second-order method as a compromise between the accuracy of reproducing thermodynamic processes and the complexity of numerical implementation is justified, which is optimal for engineering calculations and optimisation studies of the Stirling engine within the scope of this work.

A mathematical model has been developed in Simulink to study the output parameters of a DC generator (voltage, current and power) connected to a Stirling engine, as well as to analyse temperature changes in the hot part of the engine during

initial heating, at the moment of start-up and under conditions of reduced solar insolation at intervals of 20, 40 and 60 seconds – both without and with the use of an additional energy source. This approach makes it possible to evaluate the effectiveness of technical solutions aimed at stabilising the operation of the Stirling engine under variable thermal load conditions.

Since the operation of a Stirling engine is determined by the stability of the heat supply, the simulation results showed that even a short-term decrease in temperature on the hot part of the engine (approximately 20 seconds) leads to a disruption in the working cycle, which in turn can cause it to stop and reduce electricity generation during the thermal recovery phase. This behaviour demonstrates the high sensitivity of a system that uses concentrated solar energy to the dynamics of insolation and emphasises the importance of taking thermal fluctuations into account when evaluating the efficiency of the entire installation.

An experimental stand and software have been created to verify the reliability of the simulation results and study the response of the Stirling engine to fluctuations in solar radiation levels, as well as to assess the feasibility of using an additional energy source from the point of view of ensuring the stability and energy efficiency of the system. The developed stand includes three functional subsystems: energy – covering the Stirling engine, DC generator and heating system; a measuring subsystem, which includes temperature, insolation, voltage and current sensors, together with an Arduino Uno microcontroller; and an information and analytical subsystem, represented by a server part on Node.js, which receives data from Arduino, performs its initial processing and transfers it to Google Sheets for further analysis.

The use of the developed stand made it possible to experimentally confirm the operability of the system with a Stirling engine operating on the basis of concentrated solar radiation formed by a Fresnel lens. A comparison of the experimental data with the simulation results showed their general consistency, which confirms the correctness of the approaches chosen for constructing the mathematical model.

The results of the work established the nature of the influence of solar radiation factors on the stability indicators of the output parameters of a thermoelectric

installation based on a Stirling engine. The results obtained can be used to further optimise the system's operating modes, improve control algorithms and increase its energy efficiency under variable insolation conditions. In addition, the research provides a basis for scaling the proposed solution and adapting it to autonomous or hybrid energy systems.

Keywords: *renewable energy sources, Stirling engine, Fresnel lens, solar energy, electrical energy, thermal energy, solar radiation, solar radiation concentrators, thermoelectric installation, stabilisation of electrical parameters, energy balance, mechanical energy conversion, generation instability, insolation fluctuations, partial shading.*

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

The results of the dissertation research are highlighted in 8 scientific papers, including 4 articles in periodicals of scientific professional editions of Ukraine (at the time of publication) in the specialty 141 Electric power, electrical engineering and electromechanics (3 of which are indexed in Scopus databases), as well as 4 theses at international scientific and practical conferences.

1. M. Berezniuk, V. Golovko. Solar thermodynamic power plant based on Stirling engine. *Electrical Energy, Electromechanics and Technologies in the AIC: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, December 22, 2022.* / State Biotechnological University – Kharkiv, 2022. pp.27-28. Access mode: <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2023/01/tezy-conf-22-12-22n.pdf>. Co-author Golovko V.M. participated in setting the research task. Personal contribution: developing the concept of a thermoelectric installation based on a Stirling engine and describing its operating principle.

2. V. Golovko, M. Berezniuk. Analysis of solar radiation concentration plants to ensure the operation of the Stirling engine. *Vidnovluyana Energetika*, 2023. – №3 – pp.18-31 DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).18-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).18-31). (Category A, Scopus) Co-author Golovko V.M. – provided scientific advice. Personal

contribution – analysis of concentration systems, selection and justification of the type of concentrator for the Stirling engine.

3. V. Golovko, M. Berezniuk. Solar radiation concentration installation based on a Fresnel lens for ensuring the work of a Stirling engine. *XXV International scientific and practical conference «Renewable energy and energy efficiency in the XXI century»* – Kyiv. May 22-24, 2024. – pp.220-222. DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024>. Co-author V.M. Golovko – participated in setting the research task. Personal contribution – development of a method for calculating the area of the concentration spot formed by a circular Fresnel lens.

4. V. Golovko, M. Berezniuk. Analysis of changes in the distance of the Fresnel lens to the concentration surface to ensure the functioning of the Stirling engine. *Vidnovluvana Energetika*, 2024. – №2 – pp.32-40 DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).32-40](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).32-40). (Category A, Scopus) Co-author Golovko V.M. – performed editorial work. Personal contribution – development of methodology and calculations for analysing the impact of geometric and optical parameters of the lens on the efficiency of radiation concentration.

5. V. Golovko, M. Berezniuk. Stabilisation of the Stirling engine operation under variable solar radiation input. *XXVI International scientific and practical conference «Renewable energy and energy efficiency in the XXI century»* – Kyiv. May 21-23, 2025. – pp.114-115. DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.21-23.05.2025>. Co-author Golovko V.M. – performed editorial work. Personal contribution – research into the impact of insolation instability and development of an approach to stabilising engine operating modes.

6. V. Golovko, M. Berezniuk. Assessing the feasibility of using an additional energy source to ensure the stable operation of a Stirling engine. *Vidnovluvana Energetika*, 2025. – №2 – pp.75-87 DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).75-87](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).75-87). (Category A, Scopus) Co-author Golovko V.M. – provided scientific advice. Personal contribution – development of assessment methods, calculations and justification of connection modes for additional energy sources.

7. V. Golovko, M. Berezhniuk. Modelling and analysis of Stirling engine operation under conditions of unstable heat supply. *Electrical Energy, Electromechanics and Technologies in the AIC: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, November 5, 2025.* / State Biotechnological University – Kharkiv, 2025. pp. 64-65. Access mode: <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2025/11/conf-05-11-25-tezy.pdf>. Co-author Golovko V.M. – performed editorial work. Personal contribution – development of a mathematical model, modelling and analysis of the obtained dependencies.

8. V. Golovko, M. Berezhniuk. Experimental study of the operation of a Stirling engine with a solar concentrator and an additional energy source. *Energy and Automation*, 2025. – №4 – pp.99-120 DOI: [https://doi.org/10.31548/energiya4\(80\).2025.099](https://doi.org/10.31548/energiya4(80).2025.099). (Category B) Co-author V.M. Golovko – provided scientific guidance, developed the research concept, set the scientific task, and edited the article materials. Personal contribution – development and creation of an experimental setup, software for data collection and processing, conducting experimental research, mathematical processing and analysis of the results obtained, preparation of graphic materials and the main text of the article.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНЦЕНТРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА	29
1.1 Термодинамічний цикл та особливості функціонування двигуна Стірлінга.....	29
1.2 Рефлектори параболічного типу.....	33
1.3 Лінійні рефлектори Френеля.....	35
1.4 Концентраційна вежа.....	39
1.5 Параболічні концентратори тарілчастого типу	40
1.6 Конструкції з використанням лінз	43
1.7 Порівняння концентраційних технологій.....	47
Висновки до розділу 1	49
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМООПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНЦЕНТРАЦІЙНОЇ ПЛЯМИ В СИСТЕМІ З ЛІНЗОЮ ФРЕНЕЛЯ	50
2.1 Встановлення залежності площі концентраційної плями від відстані між лінзою та поверхнею.....	50
2.2 Встановлення залежності температури концентраційної плями від її площі (без врахування конвекції)	57
Висновки до розділу 2	61
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОЇ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА	62
3.1 Визначення необхідної кількості енергії та часу для досягнення температури старту на котлі двигуна Стірлінга	63
3.2 Визначення мінімальної потужності для забезпечення роботи двигуна Стірлінга.....	66
3.3 Визначення потужності додаткового джерела енергії для підтримки робочої температури в умовах недостатньої інсоляції	68

3.4 Визначення доцільності використання електричного нагрівача як додаткового джерела теплоти.....	73
Висновки до розділу 3	81
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА.....	83
4.1 Аналіз математичних моделей двигуна Стірлінга.....	83
4.1.1 Метод нульового порядку	83
4.1.2 Метод першого порядку	84
4.1.3 Метод другого порядку	85
4.1.4 Метод третього порядку.....	85
4.1.5 Метод четвертого порядку.....	86
4.2 Метод другого порядку в моделюванні двигуна Стірлінга: адіабатичний підхід та його термодинамічні особливості	86
4.3 Моделювання в Simulink роботи двигуна Стірлінга в умовах нестабільного сонячного нагріву з використанням додаткового джерела теплоти.....	89
4.3.1 Структура та принцип роботи імітаційної моделі двигуна Стірлінга в середовищі Simulink	90
4.3.2 Результати моделювання впливу зміни температури джерела теплоти на вихідні параметри двигуна Стірлінга	97
Висновки до розділу 4	115
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА З ВИКОРИСТАННЯМ ЛІНЗИ ФРЕНЕЛЯ ЯК КОНЦЕНТРАТОРА СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	117
5.1 Визначення параметрів та розробка стенду для експериментальних досліджень двигуна Стірлінга	117
5.2 Проведення експериментальних досліджень та аналіз отриманих результатів	123
Висновки до розділу 5	139
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	143

ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	150
ДОДАТОК Б. СКРИПТ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ МОДЕЛІ ДВИГУНА СТИРЛІНГА (GAMMASTIRLINGENGINEPARAMS.M)	152
ДОДАТОК В. СКРИПТ МІКРОКОНТРОЛЕРА ARDUINO UNO	155
ДОДАТОК Г. СКРИПТ NODE.JS СЕРВЕРА	158
ДОДАТОК Ґ. СКРИПТ GOOGLE APPS SCRIPT	161
ДОДАТОК Д. АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ ТА ВИКОРИСТАННЯ НАУКОВИХ І ПРАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	163
ПОДЯКА	167

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

1. ВДЕ – відновлювані джерела енергії
2. ДДЕ – додаткове джерело енергії
3. ККД – коефіцієнт корисної дії
4. DoF – глибина фокусу (depth of focus)
5. I²C – послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем (Inter-Integrated Circuit)
6. SPI – послідовний синхронний інтерфейс (Serial Peripheral Interface)

ВСТУП

Актуальність теми. Світова енергетична галузь перебуває у стані глибокої трансформації, зумовленої геополітичною нестабільністю, висвітленням проблем обмеженості традиційних ресурсів та гострою потребою у декарбонізації. Ці фактори обумовлюють стратегічний пошук та впровадження децентралізованих, стійких і екологічно чистих систем на базі відновлюваних джерел енергії. Особливу актуальність ця задача набуває для України в умовах пошкодження централізованої енергосистеми, що потребує розвитку розподіленої генерації, здатної забезпечити енергонезалежність критичної інфраструктури, підприємств та домогосподарств. [1][2]

Серед відновлюваних джерел сонячна енергія посідає одне з провідних місць завдяки своїй доступності та потенційній потужності. Однак масово поширені фотоелектричні технології мають низку недоліків: залежність від погодних умов, низький коефіцієнт використання встановленої потужності, втрати продуктивності при експлуатації, необхідність значної площі для їх встановлення та складність утилізації панелей.[3][4] Альтернативою є термодинамічні системи перетворення сонячної енергії, зокрема з використанням двигуна Стірлінга. Такі системи у контексті розподіленої генерації завдяки високому теоретичному показнику ефективності, здатності працювати від будь-якого джерела теплоти, довговічні та мають низький рівень шуму.

Розвиток теорії та практики використання двигуна Стірлінга в системах сонячної енергетики спирається на широкий науковий доробок. Фундаментальні засади термодинамічного моделювання циклу викладено у працях B. Kongtragool і S. Wongwises [5][50], I. Urieli та D. Berchowitz [55], а також R. Dyson і співавт. [52]. Питання впливу геометричних та режимних параметрів на ефективність двигуна досліджено у роботах Karabulut та співавт. [9] і Cengiz та Memiş [7]. Значний внесок у розвиток сонячних концентраційних технологій здійснили H. Müller-Steinhagen і F. Trieb [10], S. Kalogirou [13], а також сучасні дослідження

Sanchez Vega [34] і Shen Liang та співавт. [33], присвячені підвищенню оптичної та геометричної ефективності лінз Френеля. Практичні аспекти інтеграції двигуна Стірлінга з допоміжними тепловими системами висвітлено в роботах Cardozo та Erlich [43] і Thiers та Peuportier [44]. Сукупність цих праць формує наукове підґрунтя для подальшого вдосконалення сонячних енергетичних установок на основі двигуна Стірлінга.

Аналіз сучасних концентраційних установок для двигуна Стірлінга показав, що системи на основі лінз Френеля є найбільш перспективними для децентралізованого застосування. Вони забезпечують високу температуру ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), мають порівняно низьку собівартість, простоту конструкції та легкість масштабування. Проте їхній фундаментальний недолік полягає в жорсткій залежності від прямої сонячної інсоляції. Хмарність, атмосферні явища та неминуча змінність інтенсивності випромінювання протягом дня призводять до критичних коливань температури на нагрівачі двигуна, що обумовлює нестабільність його роботи, падіння вихідної потужності або повну зупинку. Ця нестабільність робить систему ненадійним джерелом енергопостачання без застосування допоміжних рішень.

Існуючі технічні підходи до компенсації даної нестабільності, такі як інтеграція з котлами на біомасі або використання великих теплоакумуючих ємностей, є ефективними, але значно ускладнюють систему, роблять її менш універсальною та збільшують капітальні витрати. Це обмежує їхнє широке впровадження в малих масштабах, наприклад, для окремого домогосподарства або невеликого підприємства.

Таким чином, виникає нагальна науково-практична потреба у розробці та дослідженні гібридних систем, що мають поєднували високу ефективність сонячного концентратора з простотою та керованістю резервного електричного джерела теплоти, що і складають актуальність даного дослідження.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження полягає у визначенні характеру впливу чинників надходження сонячного випромінювання на

показники стабільності вихідних параметрів термоелектричної установки на базі двигуна Стірлінга.

Для вирішення поставленої мети вирішені наступні задачі:

- провести аналіз сучасних конструкцій концентраційних установок сонячного випромінювання (параболічні тарілки, лінійні концентратори, лінзи Френеля) та визначити доцільного концентратора для забезпечення роботи двигуна Стірлінга;
- дослідити термооптичні характеристики концентраційної плями, сформованої лінзою Френеля;
- дослідити сценарії вмикання резервного нагрівача (за температурою та за рівнем інсоляції);
- встановити критерій доцільності використання додаткового джерела енергії на основі аналізу коефіцієнта корисної дії (ККД) системи при різній тривалості та інтенсивності зниження інсоляції;
- розробити імітаційну модель роботи системи в середовищі Simulink для: моделювання динаміки теплових та механічних процесів у двигуні; дослідження перехідних режимів роботи при зміні сонячної інсоляції; імітації роботи системи керування вмиканням/вимиканням додаткового джерела теплоти;
- експериментально підтвердити результати теоретичних та імітаційних досліджень на дослідному стенді;

Об’єкт дослідження – процес перетворення сонячної енергії в механічну та електричну енергію в автономній енергетичній установці.

Предмет дослідження – характер впливу чинників надходження сонячного випромінювання на вихідні параметри термоелектричної установки на базі двигуна Стірлінга.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у роботі завдань здійснювалося з використанням методів аналітичного моделювання на основі законів геометрії оптики, теплового балансу та термодинаміки, чисельного

моделювання динамічних процесів в середовищі Simulink, а також методів експериментального дослідження на фізичному стенді для вимірювання температурних і електричних характеристик системи та верифікації теоретичних результатів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Отримано нові аналітичні залежності, що пов'язують геометричні параметри лінзи Френеля (фокусна відстань, радіус) з термооптичними характеристиками концентраційної плями (площа, глибина фокусу, температура), які дозволяють кількісно оцінити вплив мікрозміщень лінзи відносно площини нагрівача на температурний режим роботи двигуна, що є критично важливим для ефективної роботи системи.
2. Набув подальшого розвитку метод стабілізації роботи сонячної термоелектричної установки на основі двигуна Стірлінга шляхом динамічного введення потужності від додаткового електричного нагрівача, що активується при досягненні критичної температури нагрівача або падіння сонячної інсоляції нижче мінімального рівня. На відміну від відомих рішень з використанням біомаси або громіздких теплоаккумуляторів, запропонований метод забезпечує швидкий відгук, простоту керування та підвищену надійність для систем малої потужності.
3. Встановлено критерій енергетичної доцільності застосування додаткового джерела енергії, який ґрунтується на аналізі коефіцієнта корисної дії системи. Критерій дає можливість визначити, при якому рівні та часовому проміжку зниження надходження сонячного випромінювання, є найбільш ефективним використання резервного нагрівання для забезпечення максимального загального виробітку електроенергії, що є теоретичною основою для створення алгоритмів інтелектуального керування такими термодинамічними системами.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено методику визначення залежності площі концентраційної плями від відстані між лінзою та поверхнею, а також залежності температури концентраційної плями від її площі;
2. Розроблено структурну схему для енергетичної установки на основі двигуна Стірлінга з комбінованим живленням від сонячного концентратора та додаткового електричного нагрівача, що дозволяє підвищити стабільність енергопостачання в умовах значної мінливості сонячної інсоляції;
3. Розроблено методику вибору геометричних параметрів лінзи Френеля та точності її позиціонування відносно нагрівача двигуна, що дозволяє оптимізувати конструкцію концентраційної системи для досягнення заданого температурного режиму;
4. Розроблено методику енергетичного розрахунку доцільності використання додаткового джерела енергії залежно від рівня та тривалості зниження інсоляції, що є основою для створення ефективних алгоритмів керування системами на основі двигуна Стірлінга;
5. Розроблено імітаційну модель в середовищі Simulink, яка дозволяє проводити випробування роботи системи за різних температурних режимах та оптимізувати параметри керування;
6. Спроектовано експериментальний стенд та програмне забезпечення для перевірки достовірності результатів моделювання й дослідження реакції двигуна Стірлінга на коливання рівня сонячного випромінювання, а також для оцінювання доцільності застосування додаткового джерела енергії з позиції забезпечення стабільності та енергоефективності роботи системи.

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи передано для використання у навчальному процесі та наукових дослідженнях кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та кафедри енергетики, факультету механіки, енергетики та інформаційних технологій

«Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького».

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно у процесі науково-дослідницької роботи. Безпосередньо дисертантом було:

- проведено аналіз сучасних конструкцій концентраційних установок сонячного випромінювання та обґрунтовано вибір лінзи Френеля як оптимального концентратора для забезпечення роботи двигуна Стірлінга в умовах децентралізованої генерації;
- розроблено аналітичні залежності, що описують термооптичні характеристики концентраційної плями лінзи Френеля (площі, форми, температури) та встановлено вплив мікрозміщень лінзи відносно площини поверхні двигуна Стірлінга на формування його температурного режиму роботи;
- визначено енергетичні параметри для запуску та стабільної роботи двигуна Стірлінга, досліджено два сценарії вмикання резервного нагріву (за температурою та за рівнем інсоляції) і встановлено критерій енергетичної доцільності використання додаткового джерела енергії;
- розроблено імітаційну модель роботи гібридної системи «лінза Френеля – двигун Стірлінга – електронагрівач» в середовищі Simulink, яка дозволила провести дослідження динаміки теплових та механічних процесів у системі;
- спроектовано та виконано монтаж дослідного стенду, що включає концентратор з лінзою Френеля, двигун Стірлінга, систему керування та зчитування даних на основі Arduino Uno та електронагрівач;
- розроблено методику та програмне забезпечення для вимірювання електричних параметрів генератора, інсоляції та температури;

- проведено експериментальні дослідження, здійснено обробку отриманих даних та проведено порівняльний аналіз результатів імітаційного та експериментального досліджень.

Співавтором наукових праць за темою дисертації є науковий керівник – Головка Володимир Михайлович, який здійснював наукові консультації, брав участь у постановці задач дослідження, обговоренні результатів та виконував роботи редакційного характеру.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок.

Постановку мети та завдань виконано разом з науковим керівником. Наукові та практичні результати, які висвітлено у дисертаційній роботі, отримано здобувачем особисто під керівництвом професора кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доктора технічних наук Головка Володимира Михайловича.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові та практичні результати роботи передані кафедрі відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» для використання у навчальному процесі при проведенні лекційних занять та лабораторних робіт з дисциплін «Низькопотенційні джерела енергії» та «Технічна термодинаміка» (бакалаврський рівень), а також у дипломному проектуванні за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Також передані кафедрі енергетики, факультету механіки, енергетики та інформаційних технологій «Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького» для використання у навчальному процесі при проведенні лекційних занять, практичних та лабораторних робіт з дисциплін «Засоби та обладнання відновлюваної енергетики» та «Проектування засобів та систем відновлюваної енергетики», а також у дипломному проектуванні для студентів за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка, «Сонячна енергетика» та «Проектування, монтаж та експлуатація систем відновлюваної енергетики» за спеціальністю 145 Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика (бакалаврський рівень).

Апробація результатів дисертації. Положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на Міжнародній науково-практичній конференції «Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК» в м. Харків, 2022 р., XXV Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» в м. Київ, 2024 р. та XXVI Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» в м. Київ, 2025 р., «Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК» в м. Харків, 2025 р.,

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 8 друкованих працях, з них: 1 стаття – у науковому фаховому виданні України категорії Б, 3 статті – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS та 4 тези доповідей на науково-практичних конференціях із публікацією результатів.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 167 сторінках машинописного тексту, складається із анотації, вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 115 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 76 рисунками та 1 таблицею. Список використаних джерел містить 56 найменування.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНЦЕНТРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА

1.1 Термодинамічний цикл та особливості функціонування двигуна Стірлінга

Двигун Стірлінга не є новою технологією, його винахід датується 1816 роком [5]. Тим не менш, існує певний інтерес до його застосування як розподільчого джерела генерації електроенергії, при якій електроенергія виробляється в точці споживання.

Двигун Стірлінга працює шляхом почергового нагрівання та охолодження газу зовнішнім джерелом теплоти (яким може бути сонячне випромінювання), отримуючи енергію від розширення та стиснення газу. Це призводить до різниці тисків, що в свою чергу використовується для зміни положення поршня всередині двигуна. Термодинамічна нагрівальна машина перетворює різницю температур (теплову енергію) у механічну енергію (кінетичну енергію). Електричний генератор, безпосередньо з'єднаний з валом двигуна Стірлінга, перетворює механічну енергію в необхідну електричну енергію і є системою, в якій різниця температур відіграє важливу роль. Вихідна потужність двигуна Стірлінга в основному регулюється зміною робочого тиску газу всередині поршневого циліндра [6].

Ідеальний термодинамічний цикл двигуна Стірлінга складається з чотирьох процесів (рис. 1.1), а саме двох ізотермічних процесів (процес 1-2 і процес 3-4) і двох ізохорних процесів (процес 2-3 і процес 4-1). Відображення цих процесів у вигляді циліндра, що містить два протилежні поршні з регенератором між ними, наведено на рис. 1.2, де ліва частина нагрівається певним джерелом теплоти (яким може бути сонячне випромінювання), тому його зазвичай називають нагрівачем (простір розширення робочого тіла), а права частина називається охолоджувачем (простір стиснення робочого тіла). Сітчаста частина в середині поршня називається регенератором, який функціонує як

теплова губка, поперемінно поглинаючи і віддаючи теплоту і є матрицею з дрібнодисперсного металу. Простір між лівим поршнем і регенератором називається простором розширення, а простір між правим поршнем і регенератором – простором стиснення. Між кінцями регенератора утворюється різниця температур (температурний градієнт $T_h - T_k$).

Початок циклу Стірлінга розпочинається у точці 1 (рис. 1.1), поршень простору стиснення максимально зміщений до правого краю циліндра, поршень простору розширення – у внутрішній крайній точці, близько до регенератора, робоче тіло знаходиться в холодному просторі стиснення. Об'єм робочого тіла при цьому є максимальний, а тиск і температура мають мінімальні значення.

Процес 1-2 є ізотермічним процесом стиснення: під час процесу стиснення правий поршень переміщується вліво, а лівий залишається нерухомим, отже, робочий газ стискається, тиск підвищується, а температура не змінюється через ізотермічність цього процесу.

Процес 2-3 є ізохорним процесом перенесення робочого тіла: робоче тіло більше не може бути стиснуте, завдяки чому лівий поршень переміститься вліво разом з правим поршнем, а робоче тіло пройде через регенератор до простору розширення. Загальний об'єм при цьому залишається постійним, але зі збільшенням тиску та температури за рахунок теплопередачі від регенератора.

Процес 3-4 є ізотермічним розширенням: правий поршень припинить рух, коли досягне регенератора. Однак лівий поршень все ще буде рухатися вліво, оскільки робоче тіло розширюється за рахунок передачі теплоти від нагрівача. Об'єм загального робочого простору збільшується, а це означає, що робоче тіло виконує роботу.

Процес 4-1 є ізохорним процесом регенеративного перенесення робочого тіла: обидва поршні одночасно рухаються вправо і переміщують робоче тіло з простору розширення в простір стиснення. Теплота зберігається в регенераторі, таким чином внутрішня енергія зменшується, що призводить до зниження температури.

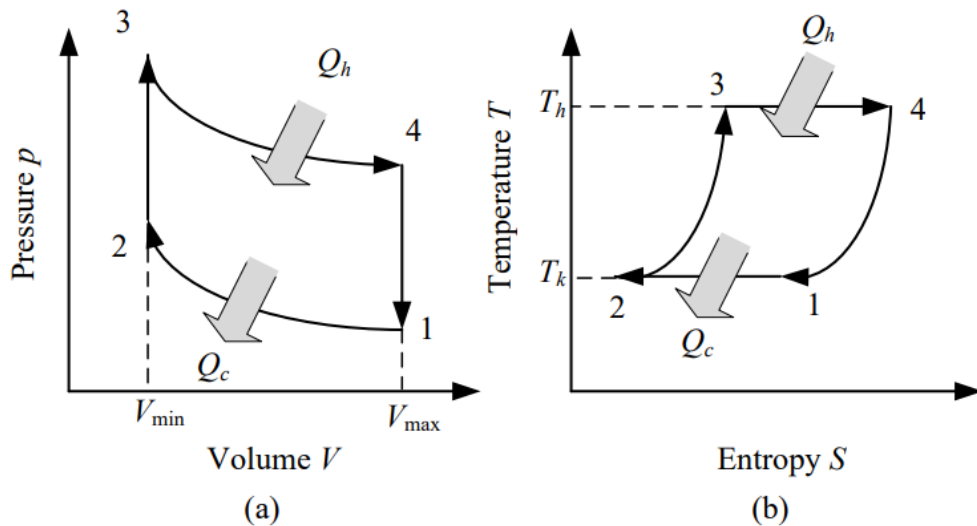


Рисунок 1.1 – P-V(a) і T-S(b) діаграми для циклу Стірлінга [8]

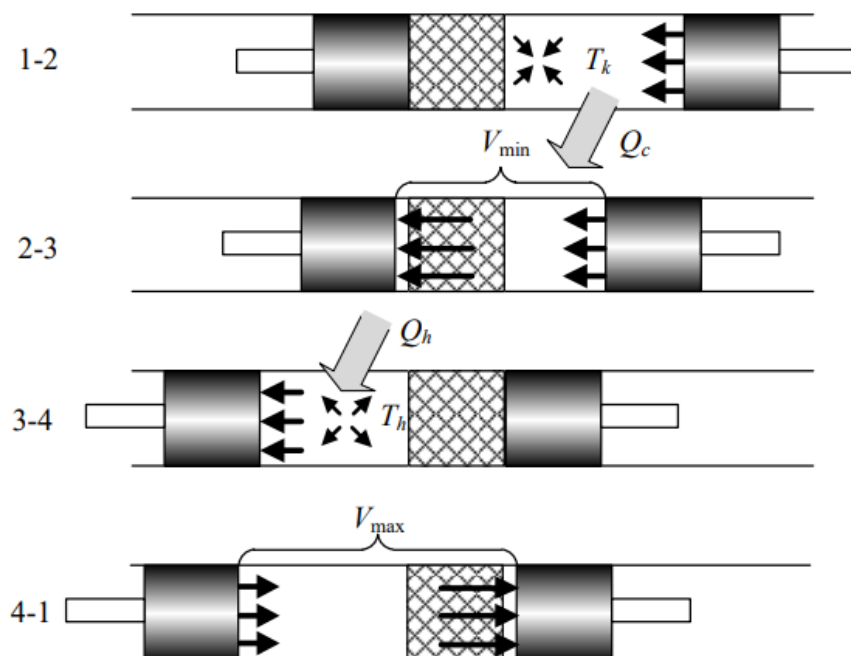


Рисунок 1.2 – Візуальне відображення процесів циклу Стірлінга [8]

Отже, для ефективної роботи двигуна Стірлінга потрібна достатньо велика різниця температур між нагрівачем та охолоджуючою частиною двигуна. Ця різниця температур – є основним фактором, що дозволяє досягти високої продуктивності двигуна. Зазвичай, для роботи двигуна Стірлінга різниця температур повинна бути від 200°C [7]. На рис. 1.3 зображено залежність вихідної потужності двигуна Стірлінга від температури охолоджувача при двох різних температурах нагрівача.

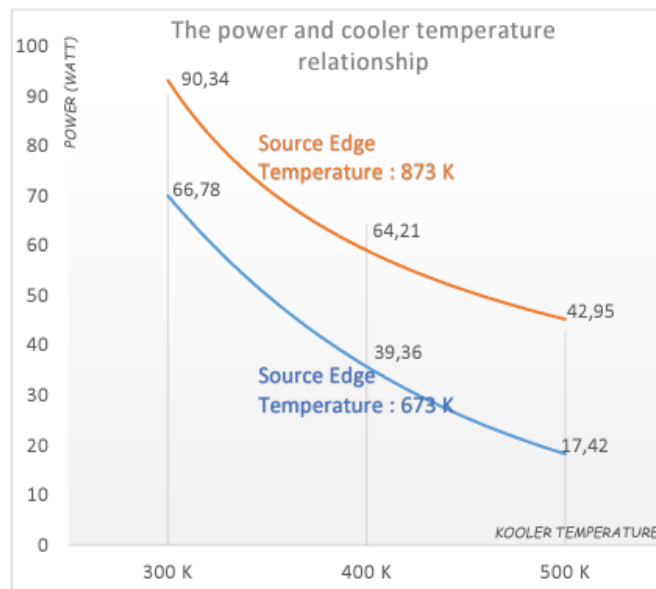


Рисунок 1.3 – Залежність вихідної потужності двигуна Стірлінга від температури охолоджувача при двох різних температурах нагрівача [9]

Щоб забезпечити необхідну різницю температур використовують різні типи та методи охолодження для підтримання низьких температур охолоджувача та джерел теплоти, які можуть досягати високих температур на боці нагрівача двигуна Стірлінга. Для використання Сонця, як джерела теплоти необхідно використовувати концентраційні установки.

Сонячні концентраційні установки зазвичай класифікуються відповідно до геометрії фокусування сонячного випромінювання, а саме [10]:

- концентратори лінійного фокусу (трекінг Сонця за однією віссю):
 - рефлектори параболічного типу (параболічний жолоб) - А
 - лінійні рефлектори Френеля - В
- концентратори точкового фокусу (трекінг Сонця за двома осями):
 - концентраційна вежа - С
 - параболічні концентратори тарілчастого типу – D

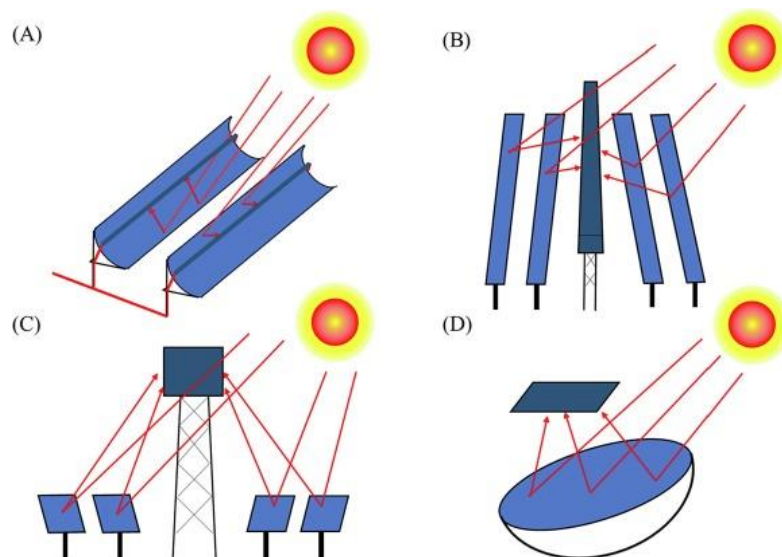


Рисунок 1.4 – Технології концентрації сонячного випромінювання [11]

1.2 Рефлектори параболічного типу

Рефлектори параболічного типу складаються з п'яти основних компонентів: дзеркал, опорної конструкції, приймача, робочої рідини і системи стеження. Зазвичай дзеркала виготовляють з срібним покриттям, анодованого листового алюмінію (іноді покритий полімерною плівкою), алюмінізовані полімери та посріблені полімерні плівки. Усі ці матеріали здатні відбивати більше 90% сонячного проміння [12]. Дзеркало циліндрично-параболічної форми з приймачем розташоване уздовж параболічного жолоба на фокусній відстані, як показано на рис. 1.5. Така конфігурація збільшує інтенсивність енергії сонячного випромінювання вздовж приймача, де сонячне випромінювання перетворюється в теплоту і передається рідині, що циркулює через приймач. Такі системи працюють при низьких і середніх температурах, при цьому робоча рідина досягає температури від 50°C до 400°C [13].

Дана система використовує пряме сонячне випромінювання як джерело теплоти. Оскільки відносне положення Сонця змінюється щосекунди, то для підвищення ефективності установки необхідна система стеження за Сонцем. Існує два типу стеження за Сонцем для даної установки, а саме: з півночі на

південь та зі сходу на захід, як показано на рис. 1.6. Відстеження названі на основі напрямку обертання площини колектора. Метод відстеження з півночі на південь має менше споживання електроенергії, тому має більш вищий кінцевий ефект отримання енергії. [14]

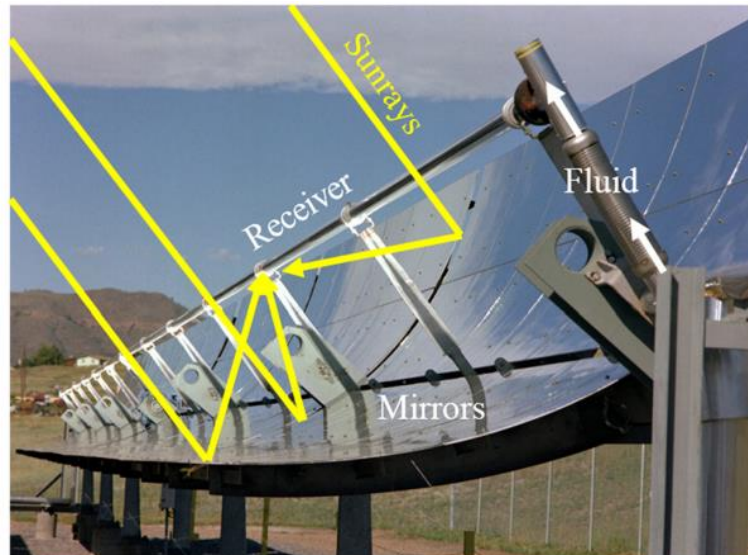


Рисунок 1.5 – Рефлектори параболічного типу (параболічний жолоб) [14]

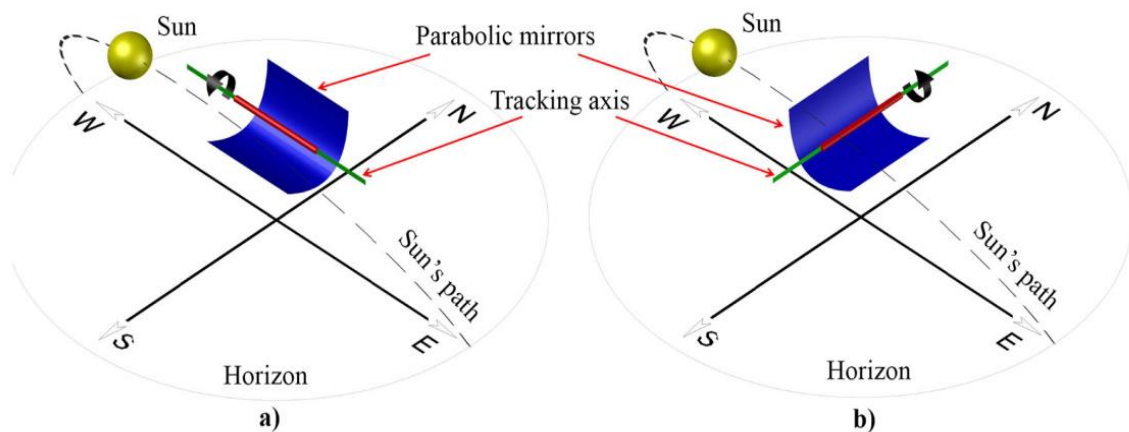


Рисунок 1.6 – Загальні методи відстеження: (а) північ-південь, (b) схід-захід [14]

До основних переваг рефлекторів параболічного типу відноситься:

- низькі викиди в навколишнє середовище протягом життєвого циклу системи. Починаючи з виробництва компонентів до їх використання вплив на навколишнє середовище залишається на низькому рівні [15] [16];

- простота конструкції;
- низькі витрати на технічне обслуговування та експлуатацію;
- довгий термін експлуатації, за рахунок відносно низьких робочих температур.

До основних недоліків рефлекторів параболічного типу відноситься:

- необхідна велика площа установки, щоб досягти необхідної робочої температури;
- працює лише з прямим сонячним випромінюванням;
- високі початкові витрати;
- відносно низька максимальна температура - до 400°C [13].

1.3 Лінійні рефлектори Френеля

Лінійні рефлектори Френеля мають лінійне фокусування і складаються з дзеркального поля, системи стеження за Сонцем і приймального елемента, як показано на рис. 1.7. Сонячне випромінювання потрапляє на дзеркальне поле, яке відбиває його до приймача. Дзеркальне поле складається з масивів дзеркал, що слідують за сонячною траєкторією протягом дня. Рух дзеркал відбувається за допомогою системи сонячних трекерів [17].

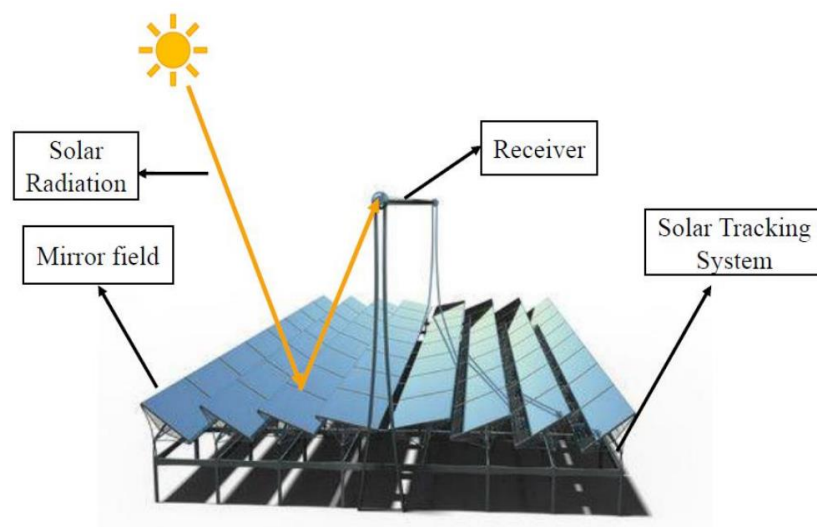


Рисунок 1.7 – Лінійні рефлектори Френеля [17]

У даних системах кожна лінія дзеркал переміщується таким чином, щоб її нахил дозволяв відбивати пряме випромінювання на поглинач. Однак дзеркала піддаються впливу затінення і блокування від сусідніх дзеркал. Затінення дзеркала – це блокування сонячних променів, що потрапляють на дзеркало, його сусідом(ами) (рис. 1.8 – а), а блокування – це затінення відбитих сонячних променів, що досягають приймача, сусіднім(и) дзеркалом(ами) (рис. 1.8 – б). Також у даних системах відслідковується рух Сонця тільки за віссю Схід-Захід, що призводить до того що, частина відбитих променів не доходить до нагрівача. Цей ефект називається кінцевими втратами – рис. 1.8 – с. Крім цього, ще одним важливим обмеженням системи є затінення, спричинене елементом поглинача на дзеркала (рис. 1.8 – d). Косинусний ефект виникає через те, що видима площа дзеркал змінюється залежно від кута падіння сонячного променя на нормаль до поверхні (рис. 1.8 – е). Крім того, частина падаючого випромінювання втрачається у проміжку між дзеркалами і не потрапляє на поверхню поглинача (рис. 1.8 – f). На рис. 1.9 зображена залежність всіх перерахованих вище втрат від відстані між дзеркалами (від 0 мм до 40 мм). Також ефективність дзеркал залежить від їхньої наближеності до приймача (чим більша відстань – тим нижча ефективність) (рис. 1.10) [18][19][20].

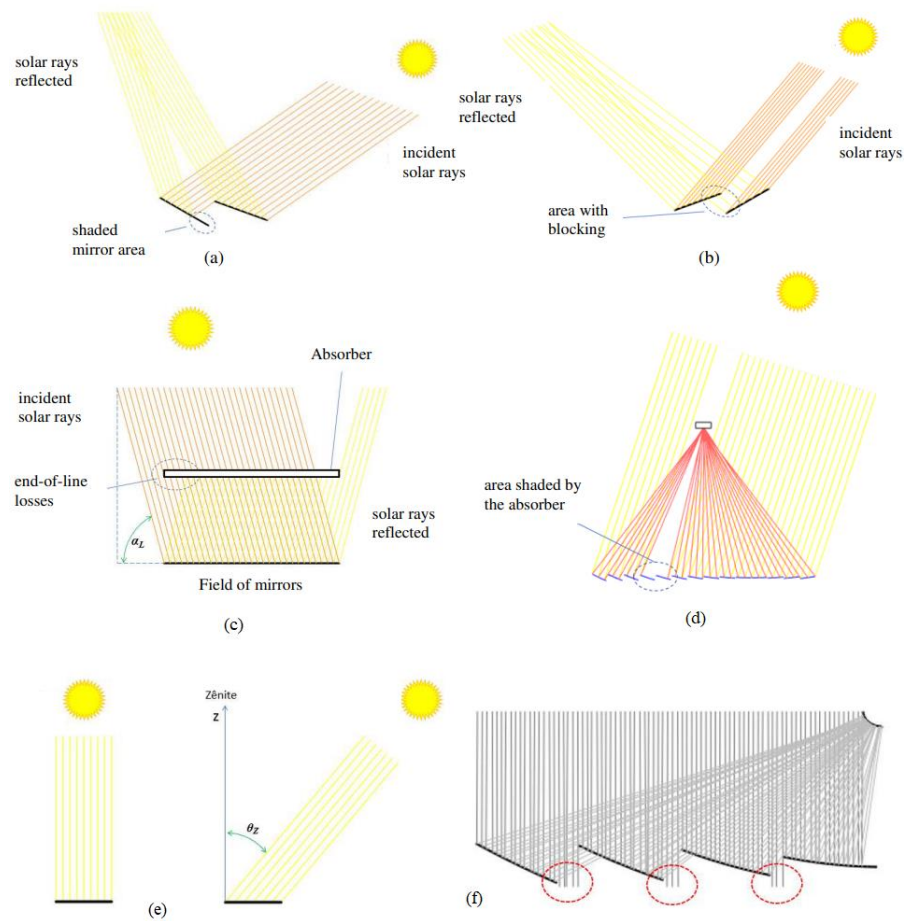


Рисунок 1.8 – Представлення втрат внаслідок (а) затінення та (б) блокування між сусідніми дзеркалами; (с) кінцеві втрати та (д) затінення спричинене поглиначем; (е) косинусний ефект та (ф) втрати між дзеркалами [19][20]

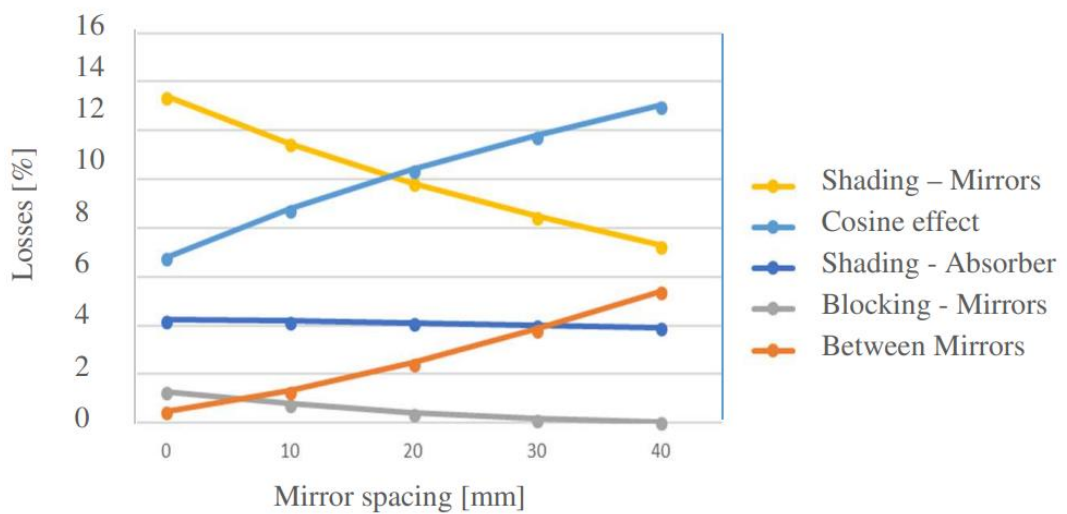


Рисунок 1.9 – Залежність втрат від відстані між дзеркалами (від 0 мм до 40 мм) [18]

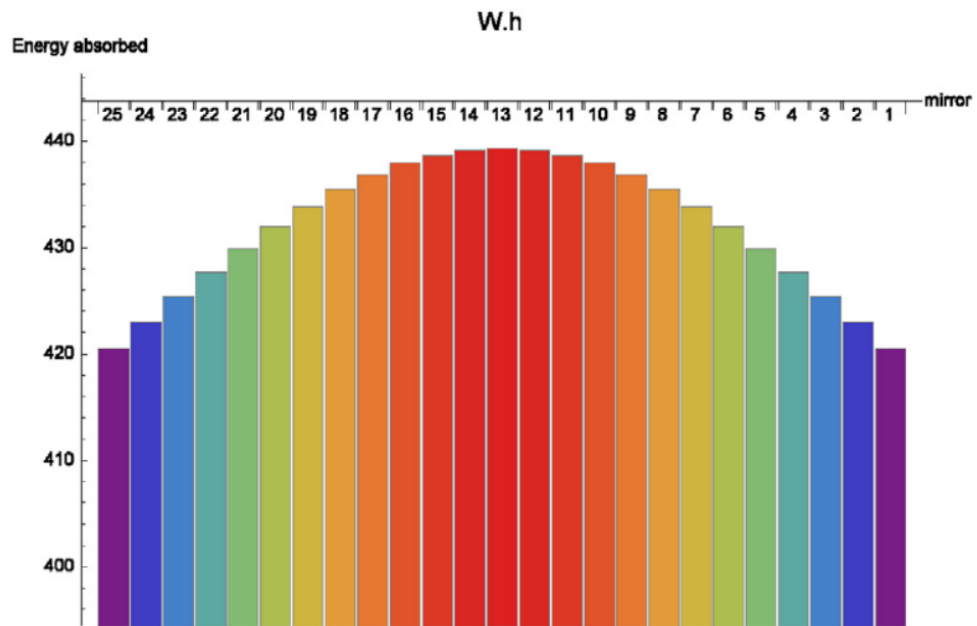


Рисунок 1.10 – Поглинена потужність (21 червня) в кожному дзеркалі системи [20]

До основних переваг лінійних рефлекторів Френеля відноситься:

- гнучкість у масштабуванні. Ці рефлектори можуть бути масштабовані від дрібних установок для домашнього використання і до великих електростанцій. Вони можуть адаптуватися до різних потреб та розмірів проєктів;
- простота конструкції плоских дзеркал полегшує обслуговування та знижує вартість на будівництво та експлуатацію;
- низьке вітрове навантаження.

До основних недоліків лінійних рефлекторів Френеля відноситься:

- необхідна велика площа установки, щоб досягти необхідної робочої температури;
- працює лише з прямим сонячним випромінюванням;
- високі оптичні втрати, які можуть сягати до 30% [18] ;
- порівняно низька максимальна температура, що може обмежити їхнє застосування – до 400°C [21].

1.4 Концентраційна вежа

Концентраційна вежа відноситься до систем точкового фокусування і складається з великої кількості дзеркал з системами трекінгу за Сонцем для концентрації сонячного випромінювання на нагрівачу, який розміщений на вершині вежі (рис. 1.11). Уся теплова енергія, отримана на нагрівачі, передається теплоносію. Теплоносієм у даних системах може бути водяна пара, розплавлена сіль, рідкий натрій, надкритичний двоокис вуглецю (це рідкий стан вуглекислого газу, де він утримується при критичній температурі та критичному тиску або вище) та повітря, яке є найдешевшим варіантом, може досягати температури більше 1000°C , не є корозійним та є стійким до замороження та кипіння, проте має низьку теплоємність [23]. Залежність температури та ефективності нагрівача від типу теплоносія зображено на рисунку 1.12.



Рисунок 1.11 – Концентраційна вежа [22]

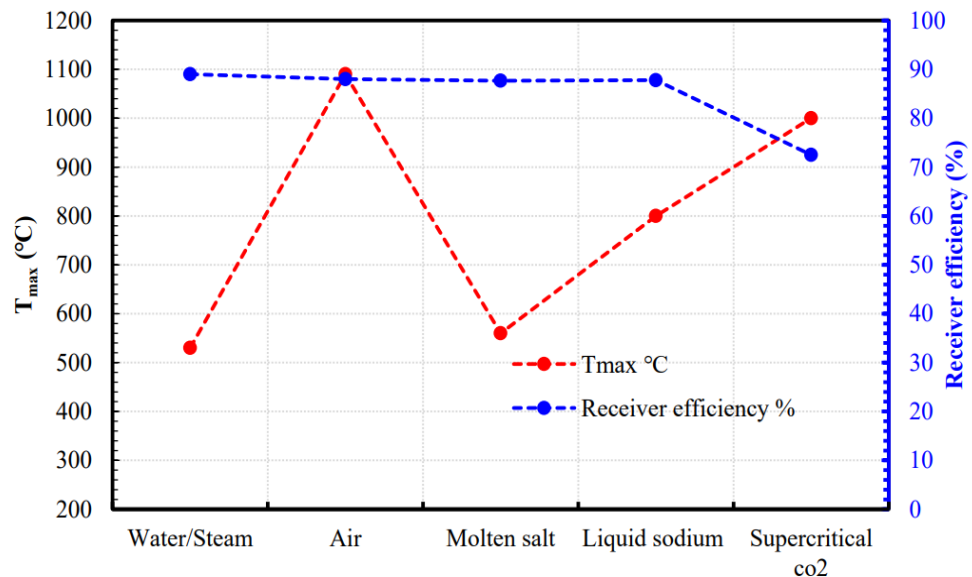


Рисунок 1.12 – Залежність температури та ефективності нагрівача від типу теплоносія [23]

До основних переваг концентраційних веж відноситься:

- висока робоча температура, яка може досягати більше 1000°C [23];
- стабільна робота за рахунок накопичувача енергії;
- високий концентраційний коефіцієнт – більше 1000 [24] ;
- висока ефективність системи – до 35% [24].

До основних недоліків концентраційних веж відноситься:

- велика площа системи;
- працює лише з прямим сонячним випромінюванням;
- високий кошторис будівництва;
- складність системи та, як наслідок, висока вартість експлуатації.

1.5 Параболічні концентратори тарілчастого типу

Параболічні концентратори тарілчастого типу є системою точкового фокусування і складаються з трьох основних компонентів:

- концентратора, який має форму параболічного диску з рефлекторного матеріалу та концентрує сонячне випромінювання на фокусній

відстані. У даних установках коефіцієнт концентрації може досягати більше 5000 [26][27]. Основним параметром під час проєктування концентратора є його діаметр, оскільки загальна ефективність установки прямо пропорційно залежить від нього [26][28]. Як видно з рис. 1.14, загальна ефективність системи опівдні немає ніяких змін, проте вранці та у вечері ефективність системи більша в установках з більшим діаметром концентратора;

- приймача (нагрівача) – розміщений на фокусній відстані від концентратора та який перетворює відбиті сонячні промені у теплову енергію. Зазвичай у даних системах, як приймач виступає нагрівач двигуна Стірлінга, який безпосередньо перетворює теплову енергію в механічну. Залежність оптичної та температурної ефективності системи від відстані між приймачем та концентратором наведена на рис. 1.15;

- системи стеження за Сонцем – відстежує положення Сонця за двома осями та підвищує ефективність системи за рахунок більшої концентрації сонячних променів протягом дня [25]. Структура параболічної концентраційної установки тарілкового типу зображено на рис. 1.13.

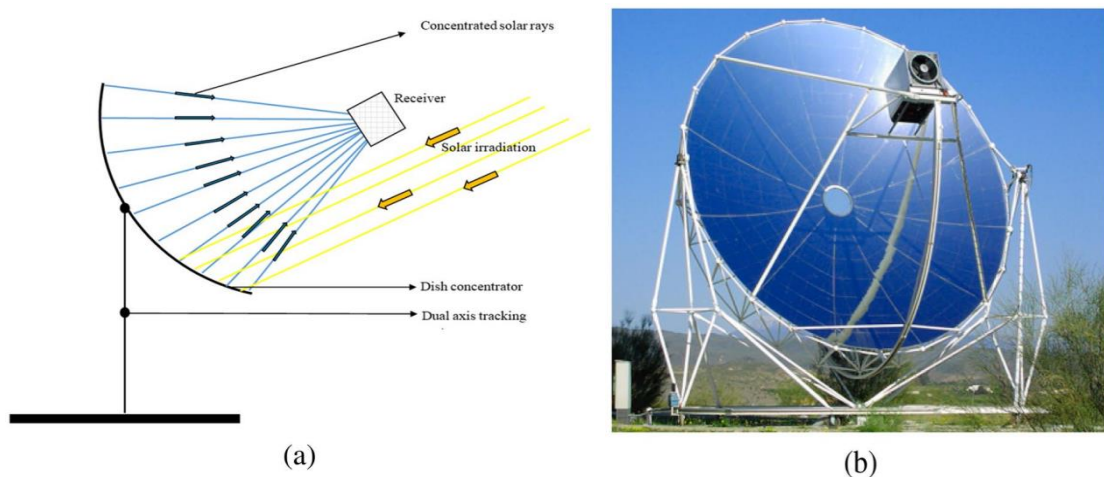


Рисунок 1.13 – Модель параболічного концентратора тарілкового типу (a); Система концентраційної установки тарілкового типу з двигуном Стірлінга (b) [25]

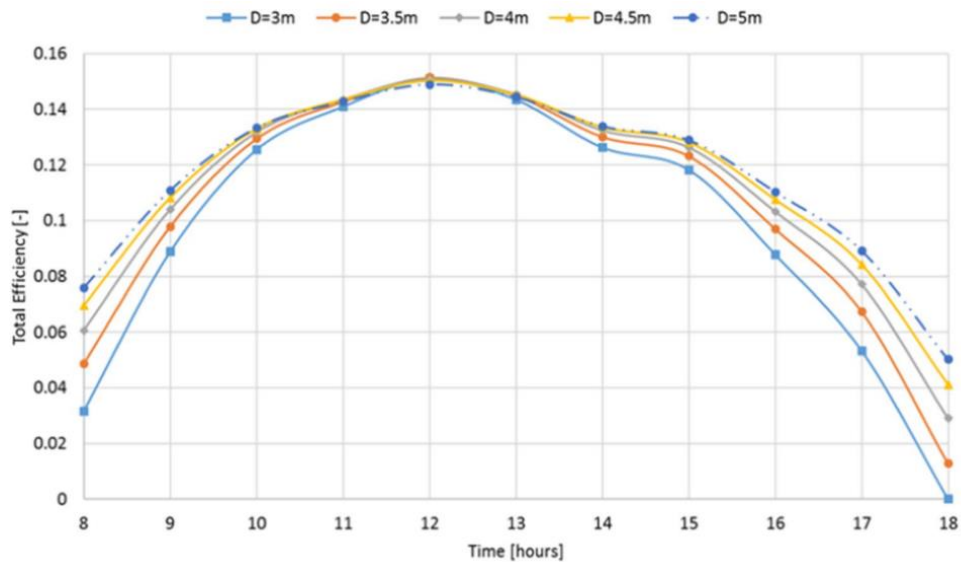


Рисунок 1.14 – Залежність загальної ефективності системи від діаметру диску протягом дня [29]

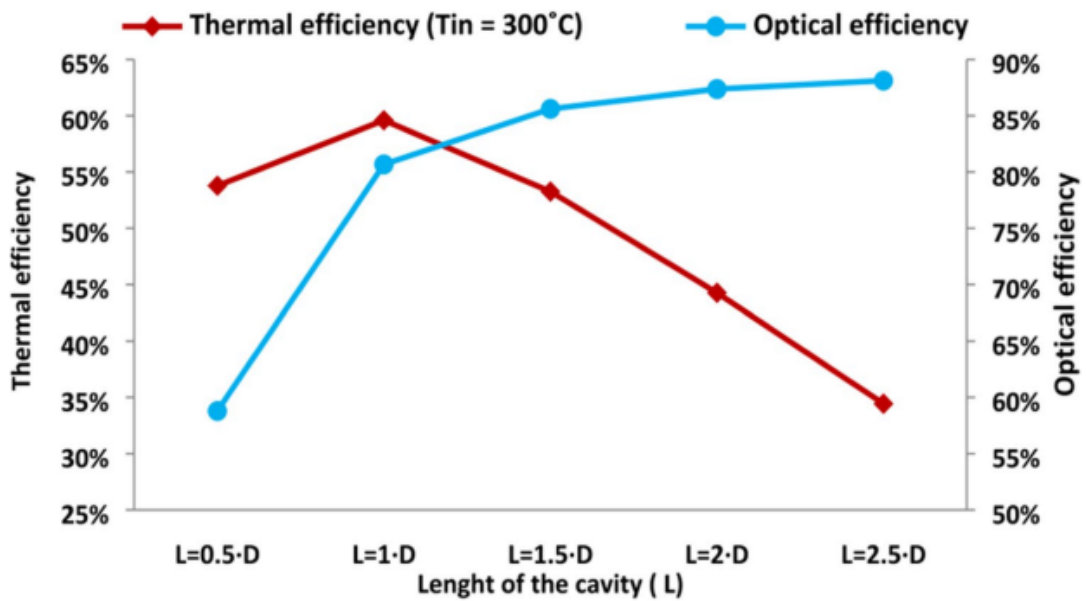


Рисунок 1.15 – Залежність оптичної та температурної ефективності системи від відстані між приймачем та концентратором [30]

До основних переваг параболічних концентраторів тарілчастого типу відноситься:

- висока температура на приймачі, яка може досягати більше 1200°C [23];

- висока ефективність за рахунок розміщення двигуна Стірлінга безпосередньо на конструкції установки. Може сягати 30% [24];
- високий концентраційний коефіцієнт – більше 5000 [26];
- високий робочий час системи протягом дня за рахунок двохосової системи трекінгу за Сонцем;
- мала площа системи;
- можливість працювати в автономному режимі;
- легко масштабується.

До основних недоліків параболічних концентраторів тарілчастого типу відноситься:

- низька стабільність системи;
- працює лише з прямим сонячним випромінюванням;
- низька потужність системи;
- високе вітрове навантаження на систему.

1.6 Конструкції з використанням лінз

Ще одним варіантом установок для концентрації сонячного проміння є конструкції з використанням лінз. Вони мають просту конструкцію, що складається з нагрівача, лінзи і системи трекінгу за Сонцем та поділяються на дві групи: лінійного фокусування та точкового фокусування (рис. 1.16). Зазвичай дані установки використовують лінзи Френеля, оскільки вони мають менший об'єм та масу, коротшу фокусну відстань, меншу вартість виробництва порівняно зі звичайними випуклими лінзами [31] та високу оптичну ефективність, що досягає 90% залежно від фокусної відстані (рис. 1.17) [36]. Також лінзи Френеля мають досить високий концентраційний коефіцієнт, що може становити більше 2500 [32]. Залежність концентраційного ефекту відносно відстані від центру концентраційної плями при різних відстанях нагрівача від

фокусної відстані зображено на рис. 1.18. Однією з переваг даних установок є висока ефективність завдяки розміщенню нагрівача двигуна Стірлінга під фокусною плямою лінзи, за рахунок чого температура на ньому може сягати більше 1000°C [35]. Залежність температури на нагрівачі двигуна Стірлінга від часу при різних положеннях нагрівача відносно фокусу лінзи зображено на рис. 1.19 та залежність температури на нагрівачі двигуна Стірлінга від сонячної інсоляції протягом дня на рис. 1.20.

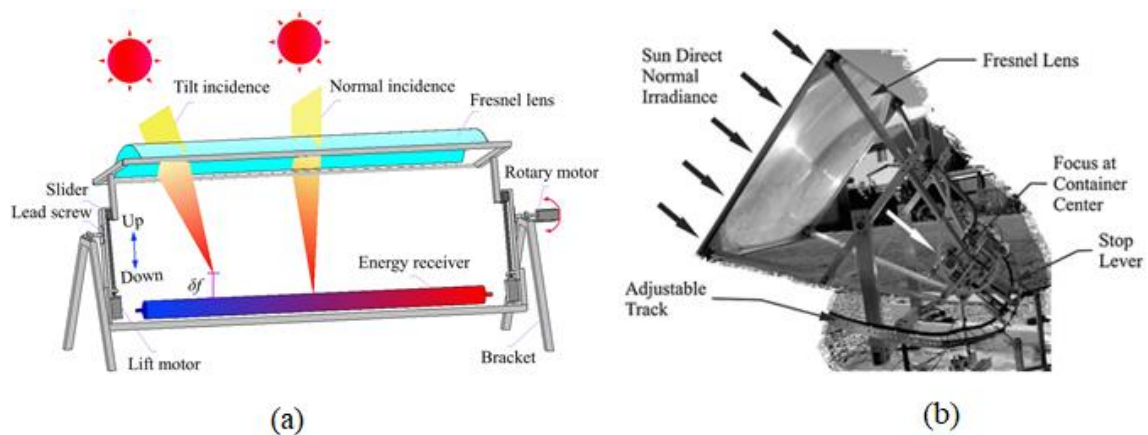


Рисунок 1.16 – (a) - концентратор з лінзою Френеля з лінійним фокусуванням, (b) - концентратор з лінзою Френеля з точковим фокусуванням [33][34]

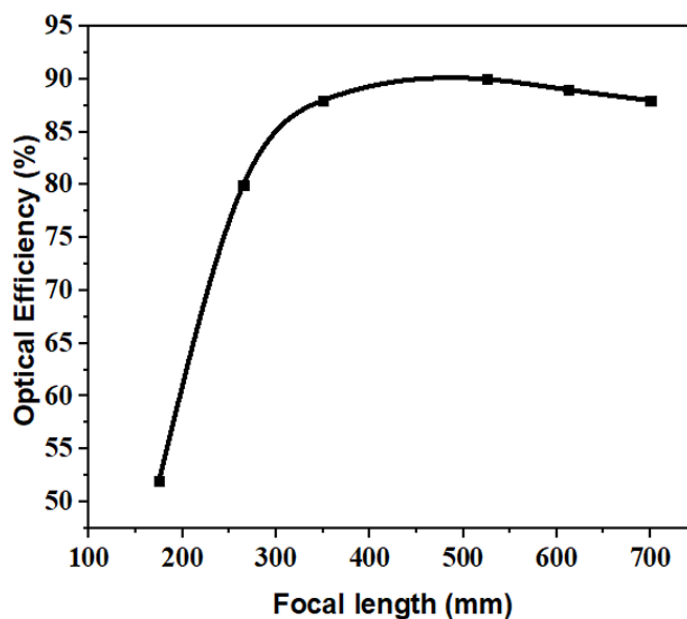


Рисунок 1.17 – Залежність оптичної ефективності від фокусної відстані [36]

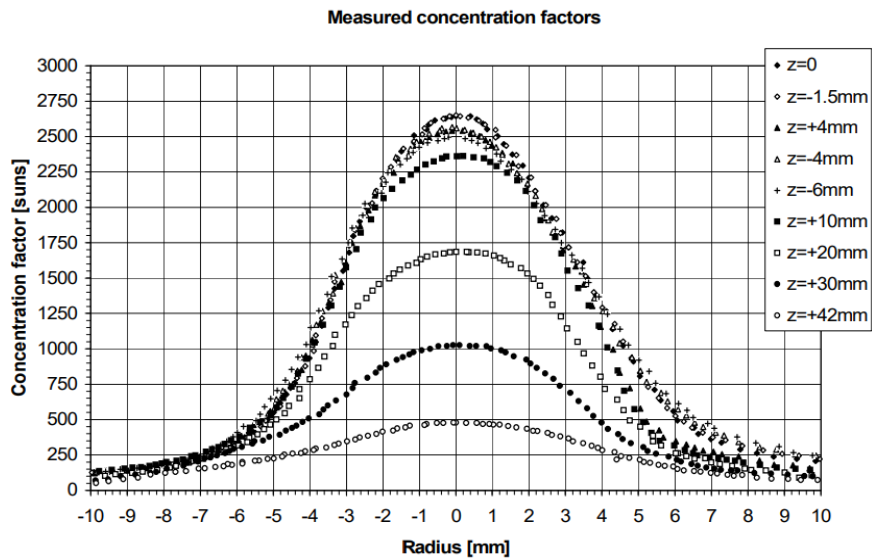


Рисунок 1.18 – Концентраційний коефіцієнт лінзи Френеля [32]

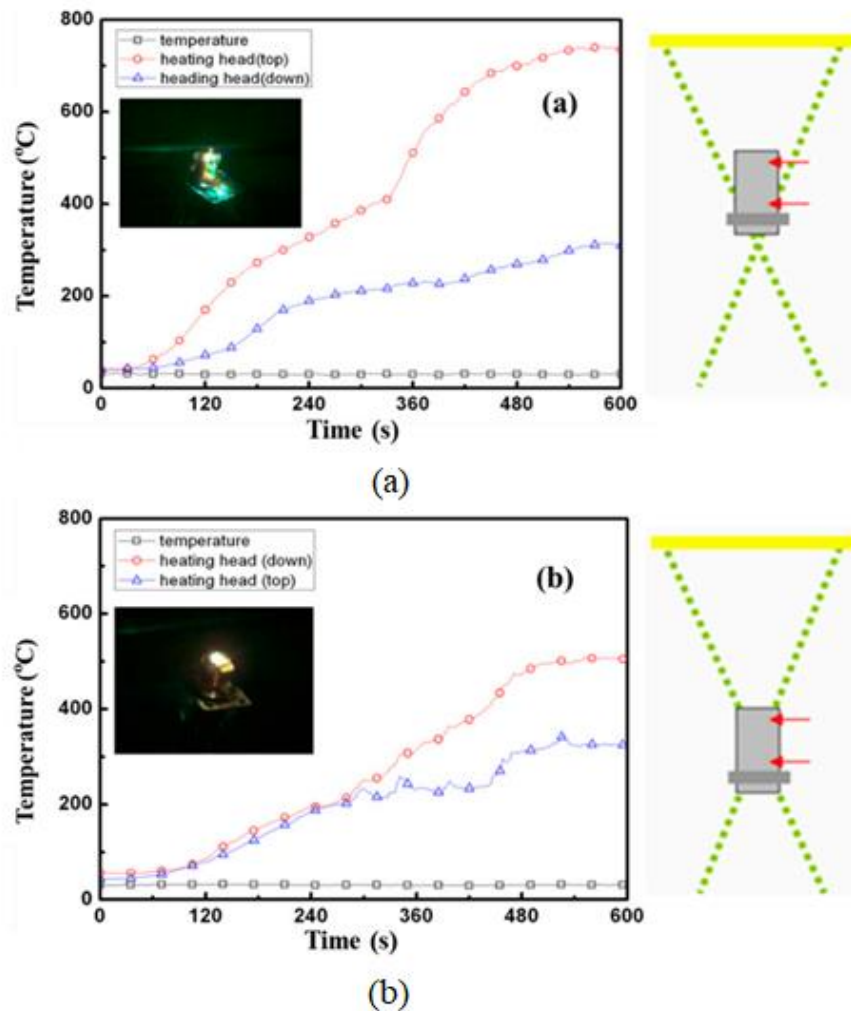


Рисунок 1.19 – Залежність температури на нагрівачу двигуна Стірлінга від часу з різним фокусуванням. (а) Фокусування знизу нагрівача (б) Фокусування зверху нагрівача [35]

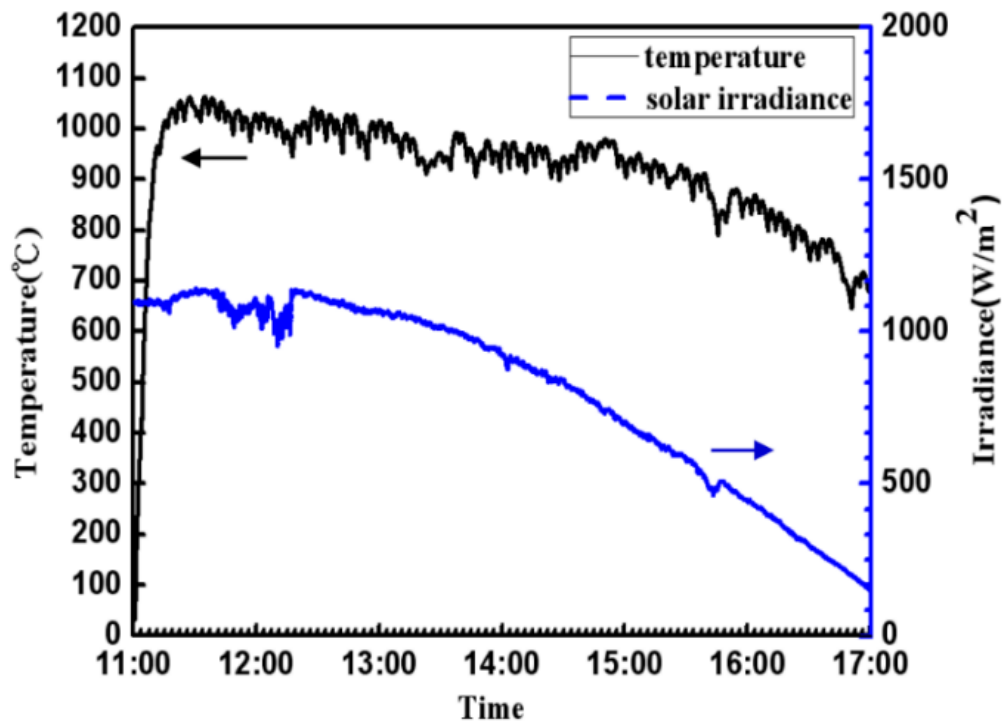


Рисунок 1.20 – Залежність температури на нагрівачу двигуна Стірлінга від сонячної радіації [35]

До основних переваг концентраторів з лінзою Френеля відноситься:

- висока температура на приймачі, яка може досягати більше 1000°C[35];
- висока ефективність роботи за рахунок розміщення двигуна Стірлінга безпосередньо на конструкції установки. Може сягати більше 30% для виробництва електроенергії та більше 50% для комбінованого виробництва електроенергії та теплоти [35];
- високий концентраційний коефіцієнт – більше 2500 [32];
- високий робочий час системи протягом дня за рахунок двохосової системи трекінгу за Сонцем;
- висока оптична ефективність - більше 90%;
- мала площа системи;
- можливість працювати в автономному режимі;
- легко масштабується;
- дешевизна встановлення та експлуатації.

До основних недоліків параболічних концентраторів тарілчастого типу відноситься:

- низька стабільність системи;
- низька потужність системи;
- високе вітрове навантаження на систему;
- лінзи Френеля можуть бути вразливі до бруду, пилу, вологості та інших факторів навколишнього середовища. Це може вплинути на їхню оптичну ефективність та потребувати регулярного обслуговування.

1.7 Порівняння концентраційних технологій

Проведемо порівняльний аналіз основних концентраційних технологій, що використовуються у сонячній енергетиці. У таблиці 1.1 наведено ключові характеристики різних типів концентраторів, зокрема їхній тип фокусу та системи трекінгу, робочу температуру, концентраційний коефіцієнт, можливість інтеграції двигуна Стірлінга як поглинача концентрованого сонячного випромінювання, тип накопичувача енергії та механізм концентрації сонячного випромінювання. Зокрема, параболічні тарілчасті концентратори демонструють найвищий концентраційний коефіцієнт (>5000) та температуру ($>1200^{\circ}\text{C}$), що робить їх придатними для високоефективних термодинамічних циклів, тоді як лінійні системи (наприклад, рефлектори Френеля) мають обмежену робочу температуру ($<400^{\circ}\text{C}$).

Таблиця 1.1 Порівняння концентраційних технологій

Тип концентраційної установки	Рефлектори параболічного типу	Лінійні рефлектори Френеля	Концентраційна вежа	Параболічні концентратори тарілчастого типу	Концентратори з використанням лінз (Френеля)
Тип фокусу	Лінійний	Лінійний	Точковий	Точковий	Лінійний та Точковий

Тип трекінгу за Сонцем	Одно-вісний	Одно-вісний	Дво-вісний	Дво-вісний	Одно-вісний та Дво-вісний (В залежності від типу фокусу)
Робоча температура	> 400°C	< 400°C	> 1000°C	> 1200°C	> 1000°C
Концентраційний коефіцієнт	< 80	> 60	> 1000	> 5000	> 2500
Двигун Стірлінга в якості поглинача випромінювання	Ні	Ні	Ні	Так	залежить від типу конструкції
Накопичувач енергії	Резервуар з розправленою сіллю (400°C)	Короткотерміновий накопичувач енергії за рахунок водяної пари (до 10хв)	Резервуар з розправленою сіллю (550°C)	Немає	Немає
Тип концентрації	Відбиті сонячні промені	Відбиті сонячні промені	Відбиті сонячні промені	Відбиті сонячні промені	Прямі сонячні промені

Висновки до розділу 1

1. Аналіз концентраційних установок сонячного випромінювання показав, що вони здатні забезпечити необхідну різницю температур для роботи двигуна Стірлінга. Найнижча температура досягається за допомогою лінійних рефлекторів Френеля (приблизно $400\text{ }^{\circ}\text{C}$), а найвища – за допомогою параболічних концентраторів тарілчастого типу (понад $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2. Двигун Стірлінга як поглинач сонячного випромінювання може застосовуватися в параболічних концентраторах тарілчастого типу та концентраторах із використанням лінз Френеля точкового фокусування, що забезпечує вищу ефективність системи завдяки відсутності втрат теплоти через теплоносії.

3. Основним недоліком усіх таких систем є необхідність використання системи відстеження руху Сонця (трекінгу) для забезпечення високої ефективності протягом дня.

4. Концентратор із використанням лінз Френеля, порівняно з іншими установками, є більш доцільним рішенням для забезпечення електроенергією домогосподарств завдяки простоті конструкції, дешевизні встановлення та експлуатації, здатності до досягнення високих температур ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), легкості масштабування та відносно високій ефективності, що становить понад 30 % для виробництва електроенергії та понад 50 % – для комбінованого виробництва електроенергії й теплоти.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМООПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНЦЕНТРАЦІЙНОЇ ПЛЯМИ В СИСТЕМІ З ЛІНЗОЮ ФРЕНЕЛЯ

2.1 Встановлення залежності площі концентраційної плями від відстані між лінзою та поверхнею

Регулювання роботи термодинамічної установки можливе шляхом зміни температури в нагрівальній частині двигуна Стірлінга, яка визначається інтенсивністю поглинутого сонячного випромінювання. Цю температуру можна ефективно контролювати шляхом зміни розміру та форми концентраційної плями, сформованої за допомогою лінзи Френеля, яка фокусує сонячне випромінювання на нагрівальну поверхню.

Існує велика кількість методів створення плями різної форми на поверхні фокусування, а саме: використання лінзи Френеля різної форми (прямокутної або круглої для лінійного та точкового фокусування відповідно), зміни кута нахилу лінзи відносно потоку сонячних променів, зміни положення площини фокусування відносно лінзи та використання додаткових оптичних елементів. Для зміни площі концентраційної плями на поверхні фокусування, використовують наступні методи: зміна відстані між лінзою та площиною фокусування, зміна кута нахилу лінзи, зміна розміру (радіусу) або фокусної відстані лінзи та використання додаткових оптичних елементів – лінзи або дзеркала.

Розглянемо зміну площі концентраційної плями від сонячного випромінювання на поверхні фокусування шляхом зміни відстані між лінзою та площиною фокусування, щоб встановити залежність температури концентраційної плями від її площі, для забезпечення роботи та регулювання вихідної потужності двигуна Стірлінга.

Для розрахунку площі концентраційної плями, прийнята лінза у формі кола, яка розміщена паралельно до концентраційної поверхні (кривизна поверхні не враховується), де сонячне випромінювання створює уявну фігуру у вигляді

конуса (рис. 2.1), де r – радіус лінзи, відрізок OP – фокусна відстань лінзи, H – відстань між лінзою та поверхнею на якій буде концентруватися сонячне випромінювання, а r' – радіус концентраційної плями.

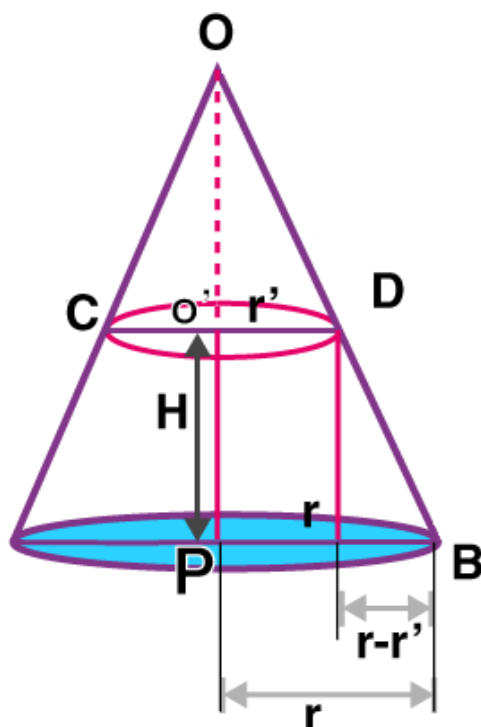


Рисунок 2.1 – Уявний конус, утворений концентрацією сонячного випромінювання за допомогою круглої лінзи

Якщо в трапеції $PO'DB$ провести перпендикуляр з точки D до поверхні лінзи, то радіус плями визначається як:

$$r' = r - (r - r'), \quad (2.1)$$

де $r - r'$:

$$(r - r') = \frac{H}{\operatorname{tg}(\angle OBP)} = \frac{H}{OP/r} \quad (2.2)$$

Тоді залежність площі концентраційної плями від відстані між лінзою та поверхнею, на якій буде концентруватися сонячне випромінювання, дорівнює:

$$S(H) = \pi \cdot r'^2 = \pi \cdot \left(r - \frac{H}{OP/r}\right)^2 \quad (2.3)$$

Розрахуємо залежність $S(H)$ за формулою 2.3, для лінзи Френеля з поширеним форм-фактором, а саме із співвідношенням діаметру лінзи до фокусної відстані – $3/2$. Залежність площі концентраційної плями від відстані між лінзою та поверхнею для лінзи із радіусом 150 мм та фокусною відстанню 200 мм наведена на рис. 2.2.

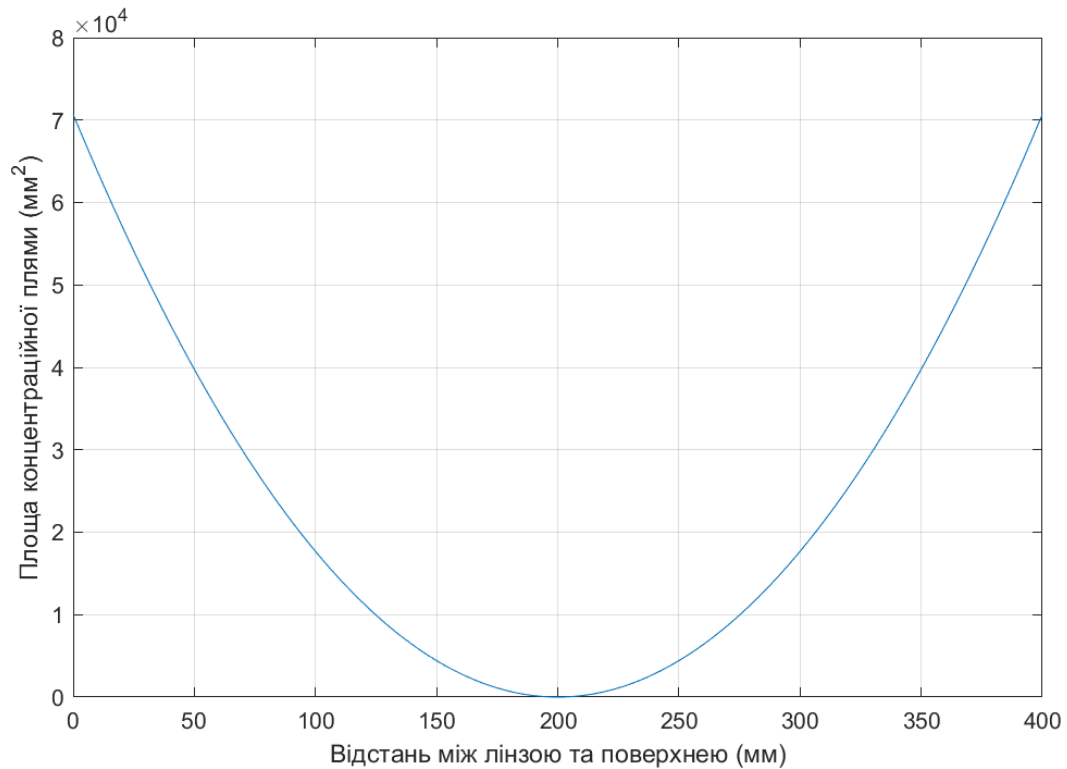


Рисунок 2.2 – Залежність площі концентраційної плями від відстані між лінзою та поверхнею

Проте враховуючи правила поведінки світлових променів через концентруючу лінзу [37]:

1. Світловий промінь, який паралельний головній осі, після заломлення проходить через фокус з іншого боку лінзи.
2. Світловий промінь, який проходить через оптичний центр лінзи, не змінює напрямку.
3. Світловий промінь, який проходить через фокус, після заломлення рухається паралельно головній осі.

Можна визначити принцип формування зображення (плями) за допомогою концентраційної лінзи, у випадку коли об'єкт (Сонце) розміщується за

подвійною фокусною відстанню, буде утворюватися зображення: справжнє, зменшене, перевернуте та сформоване поза фокусом, але перед двома фокусними відстанями (рис. 2.3) [37].

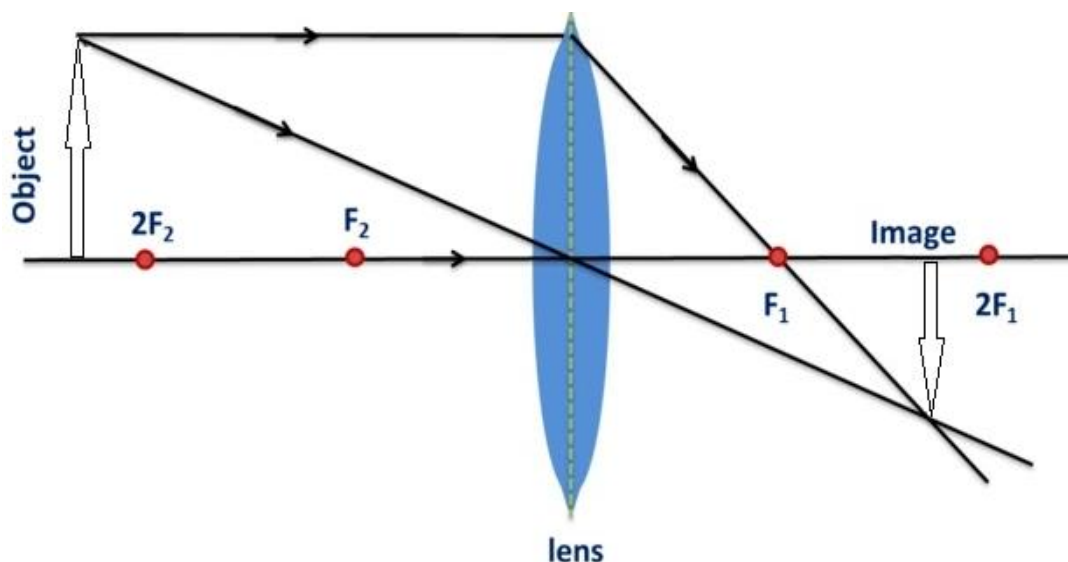


Рисунок 2.3 – Формування зображення концентрованими лінзами, якщо об'єкт знаходиться за межами двох фокусних відстаней [37]

Отже, площа концентраційної плями (зображення об'єкта) не може дорівнювати нулю та може розміщуватися поза фокусом, тому для розрахунку розміщення зображення використовуємо формулу плоскої лінзи [38]:

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{f}, \quad (2.4)$$

де d_o – відстань від лінзи до об'єкта (Сонця), d_i – відстань від лінзи до зображення (концентраційної плями), f – фокусна відстань лінзи.

Відстань до Сонця (d_o) становить $\approx 149,6$ млн. км [39], що у відношенні з розміром лінзи, відстанню від лінзи до зображення та фокусною відстанню лінзи є “нескінченною” величиною. Тому підставивши $d_o = \infty$ у формулу плоскої лінзи(2.4), отримуємо:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_i} + \frac{1}{\infty} = \frac{1}{d_i}, \quad (2.5)$$

тоді:

$$f = d_i \quad (2.6)$$

Отже, всі об'єкти, які розміщуються на великій відстані від лінзи, будуть формувати зображення, що максимально наближене до фокусної відстані лінзи.

Для розрахунку розміру зображення (плями) використаємо формулу, коефіцієнта збільшення лінзи [38]:

$$M = \frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i}{d_o}, \quad (2.7)$$

де d_o – відстань від лінзи до об'єкта (Сонця), d_i – відстань від лінзи до зображення (концентраційної плями), h_o – висота об'єкта (що у нашому випадку радіус Сонця – 695700 км [39]), h_i – висота зображення (радіус концентраційної плями), M – коефіцієнт збільшення лінзи. Отже, мінімальний радіус концентраційної плями h_i з виразу 2.7, дорівнює:

$$h_i = \frac{h_o}{d_o} \cdot d_i, \quad (2.8)$$

де $d_i = f$, що було визначено у виразах (2.5 та 2.6), а співвідношення $\frac{h_o}{d_o}$ дорівнює:

$$\frac{h_o}{d_o} = \frac{695700 \text{ (км)}}{149600000 \text{ (км)}} = \frac{1}{215}, \quad (2.9)$$

тоді мінімальний радіус концентраційної плями h_i , для лінзи з фокусною відстанню 200 мм, рівний:

$$h_i = \frac{f}{215} = \frac{200 \text{ (мм)}}{215} = 0,93 \text{ (мм)}, \quad (2.10)$$

а мінімальна площа концентраційної плями дорівнює:

$$S = \pi \cdot h_i^2 = \pi \cdot 0,93^2 = 2,72 \text{ (мм}^2\text{)}, \quad (2.11)$$

Залежність мінімальної площі концентраційної плями від фокусної відстані лінзи наведено на рис. 2.4.

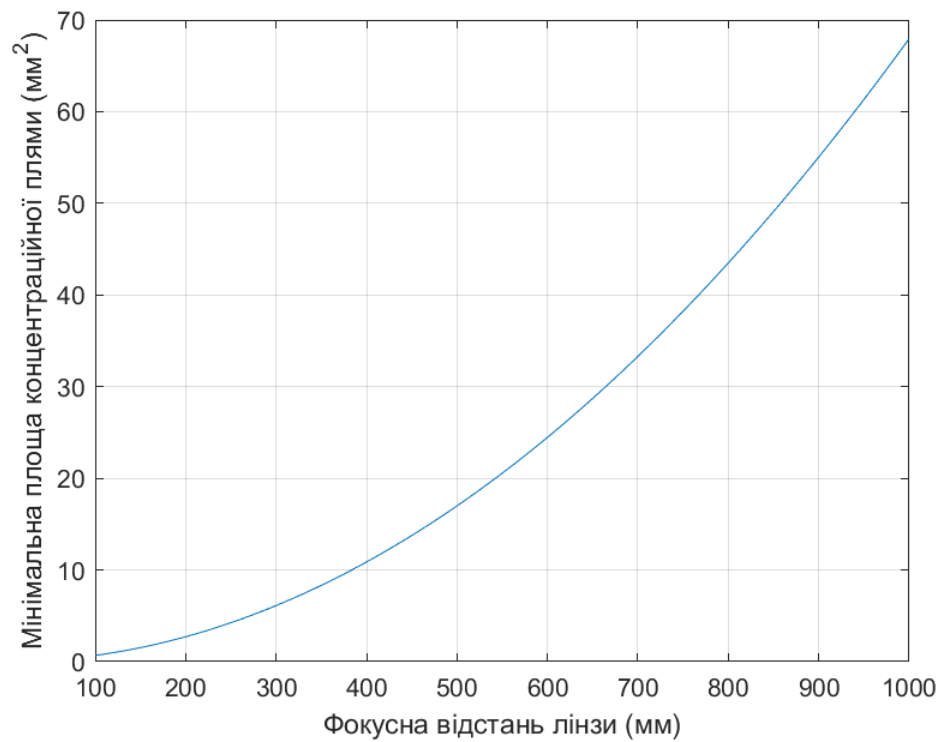


Рисунок 2.4 – Залежність мінімальної площі концентраційної плями від фокусної відстані лінзи

Із врахуванням мінімальної площі концентраційної плями, з виразу 2.3, формуються наступні умови:

$$\begin{aligned} \text{якщо } S(H) > S_{min}, \text{ тоді } S_{result} &= S(H), \\ \text{якщо } S(H) < S_{min}, \text{ тоді } S_{result} &= S_{min} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Залежність площі концентраційної плями від відстані між лінзою та поверхнею, з урахуванням системи рівнянь 2.12, наведено на рис. 2.5.

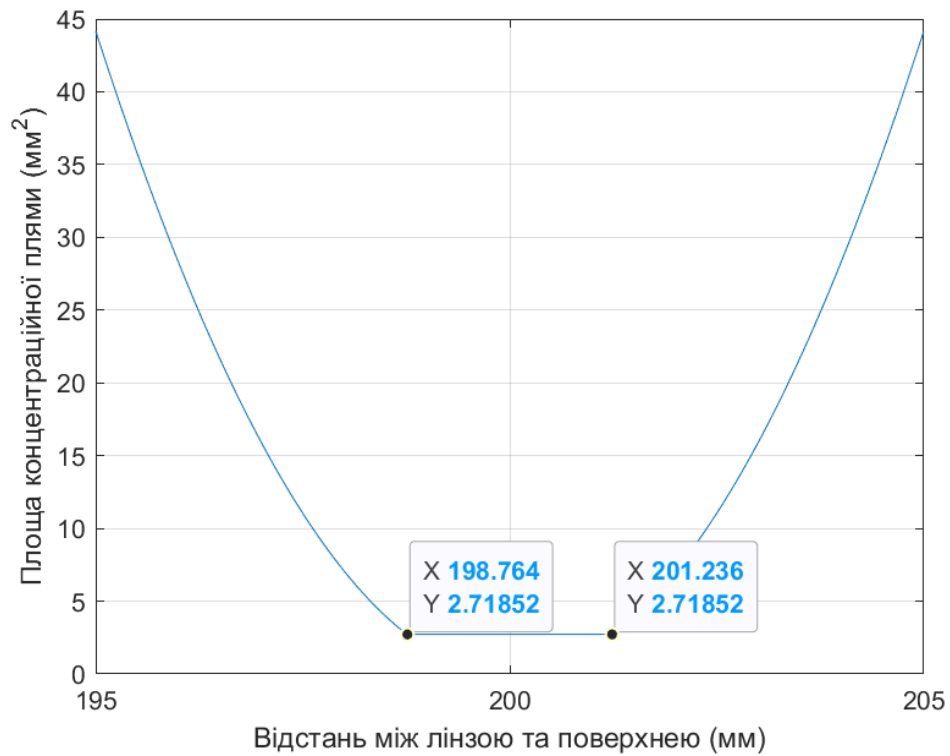


Рисунок 2.5 – Залежність площі концентраційної плями від відстані між лінзою та поверхнею з урахуванням мінімальної площі концентраційної плями

Із рис. 2.5 видно, що площа концентраційної плями від Сонця не змінюється на відстані до поверхні від 198.8 мм до 201.2 мм, тоді глибина фокусу дорівнює:

$$DoF = X_2 - X_1 = 201.2 - 198.8 = 2.4 \text{ (мм)}, \quad (2.13)$$

Отже, щоб забезпечити мінімальну площу концентраційної плями, для лінзи ($r = 150$ (мм) та $f = 200$ (мм)), поверхня на якій концентрується сонячне випромінювання має розташовуватися на відстані ± 1.2 мм від фокусної відстані лінзи. Залежність глибини фокусу від радіусу та фокусної відстані лінзи наведено на рис. 2.6.

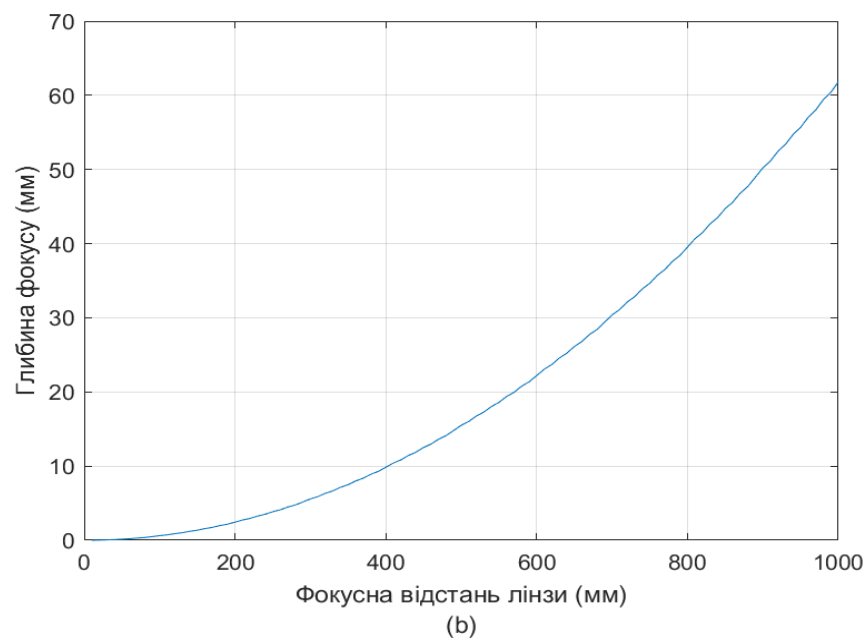
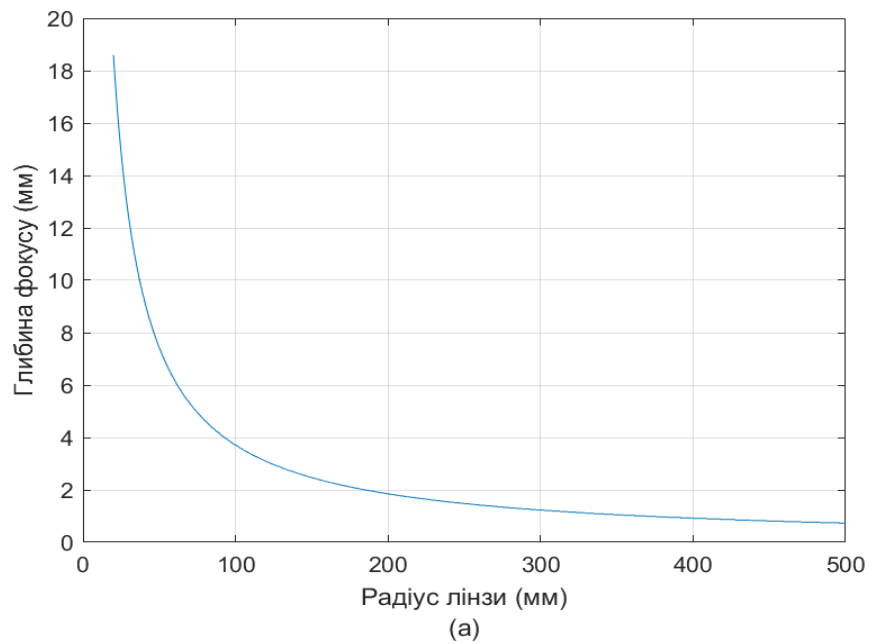


Рисунок 2.6 – Залежність глибини фокусу лінзи: а) від радіусу лінзи при сталій фокусній відстані 200мм, б) від фокусної відстані лінзи при сталому радіусі 150мм

2.2 Встановлення залежності температури концентраційної плями від її площі (без врахування конвекції)

Для визначення температури сонячної концентраційної плями на поверхні нагрівача двигуна Стірлінга використаємо закон Стефана-Больцмана:

$$I = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4, \quad (2.14)$$

де e – випромінювальна здатність поверхні (для сталі становить 0,85 в.о. [40]), σ – стала Стефана-Больцмана ($5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К)), A – площа поверхні (концентраційної плями) (м²), T – температура (К), I – загальна потужність випромінювання (Вт). Отже, вираз знаходження температури матиме наступний вигляд:

$$T = \sqrt[4]{\frac{I}{e \cdot \sigma \cdot A}} \quad (2.15)$$

Для розрахунку температури концентраційної плями від Сонця потрібно також врахувати параметри, такі як: площа лінзи, коефіцієнт поглинання поверхні та оптичний коефіцієнт ефективності лінзи. Вираз 2.15 прийме наступний вигляд:

$$T = \sqrt[4]{\frac{J \cdot S \cdot \eta \cdot \alpha}{e \cdot \sigma \cdot A}} - 273, \quad (2.16)$$

де J – питома потужність (в даному випадку це інсоляція) (Вт/м²), S – площа лінзи (м²), η – оптичний коефіцієнт ефективності лінзи (в.о.), α – коефіцієнт поглинання поверхні (для сталі становить 0,64 в.о. [41]). Оптичний коефіцієнт ефективності лінзи визначається за допомогою кратності лінзи, що знаходиться за формулою:

$$N = \frac{f}{D}, \quad (2.17)$$

де D – діаметр лінзи, f – фокусна відстань лінзи. Тоді кратність лінзи з діаметром 300 мм та фокусною відстанню 200 мм буде дорівнювати:

$$N = \frac{200}{300} = 0.67 \quad (2.18)$$

Отже, із залежності оптичної ефективності лінзи від її кратності, що наведена на рис. 2.7, можна визначити її ефективність, яка дорівнює 87% при кратності лінзи 0,67.

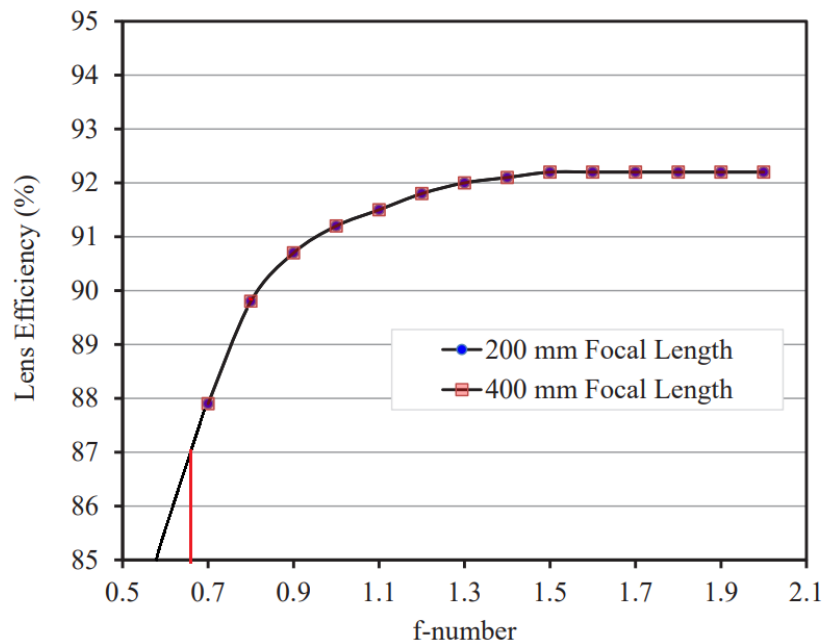


Рисунок 2.7 – Залежність оптичної ефективності лінзи від її кратності[42]

Тоді на основі виразу 2.16 визначається залежність температури сонячної концентраційної плями (на металевій поверхні без врахування конвекції) для різної інсоляції від площі концентраційної плями та від відстані між лінзою та поверхнею. Залежність наведена на рис. 2.8.

Отже, із залежностей, наведених на рис. 2.8, можна зробити висновок, що зміна температури від площі концентраційної плями має залежність у вигляді гіперболи з найвищою температурою для найменшої площі концентраційної плями, а від відстані між лінзою та поверхнею – у вигляді гілки параболи, з вершиною на відстані рівній фокусній відстані лінзи. Розташування лінзи на ± 15 мм від фокусної відстані може змінити максимальну температуру концентраційної плями на $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ при інсоляції 1000 Вт/м^2 . Також інсоляція має більший вплив на температуру концентраційної плями при меншій її площі.

Проте варто зазначити, що дані розрахунки проведені без врахування втрат на конвекцію та випромінення, які можуть складати більше 50%. А під час проведення експерименту, за допомогою лінзи з $r = 150$ (мм) та $f = 200$ (мм) при інсоляції 1000 Вт/м^2 та швидкості вітру $0.5\text{--}2\text{ м/с}$ можна отримати температуру на ділянці котла двигуна Стірлінга, наближеної до концентраційної плями, близько $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

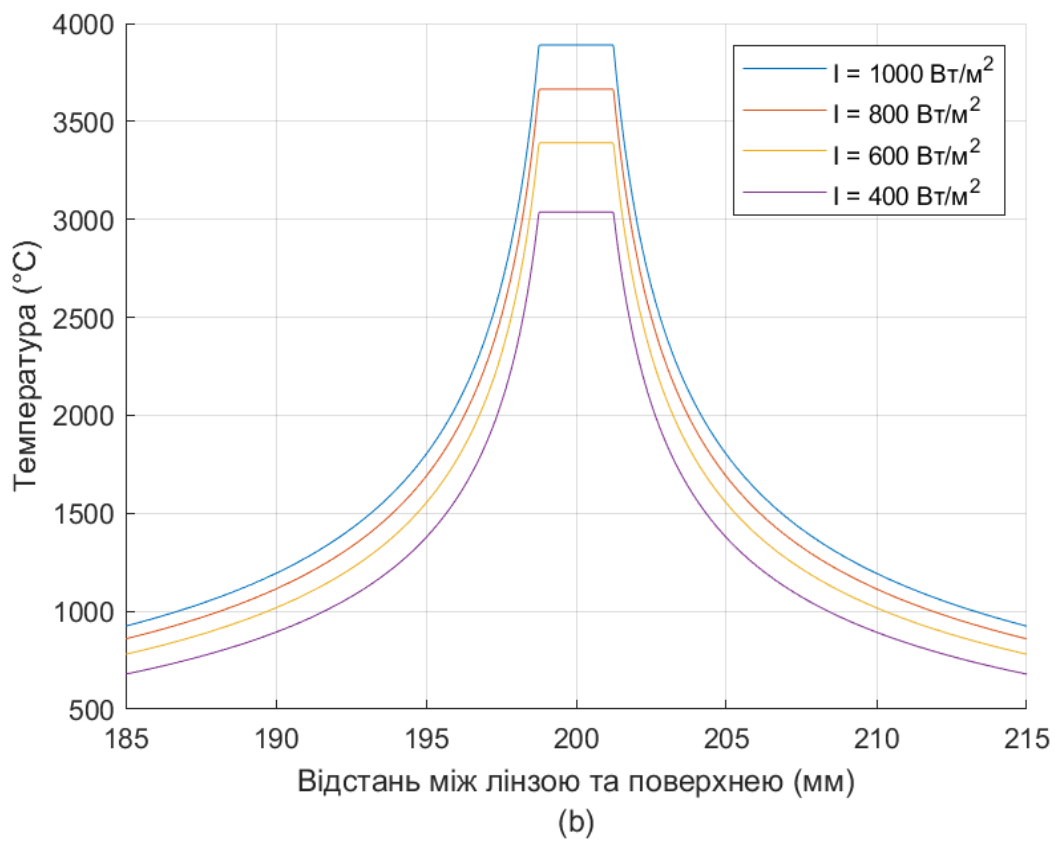
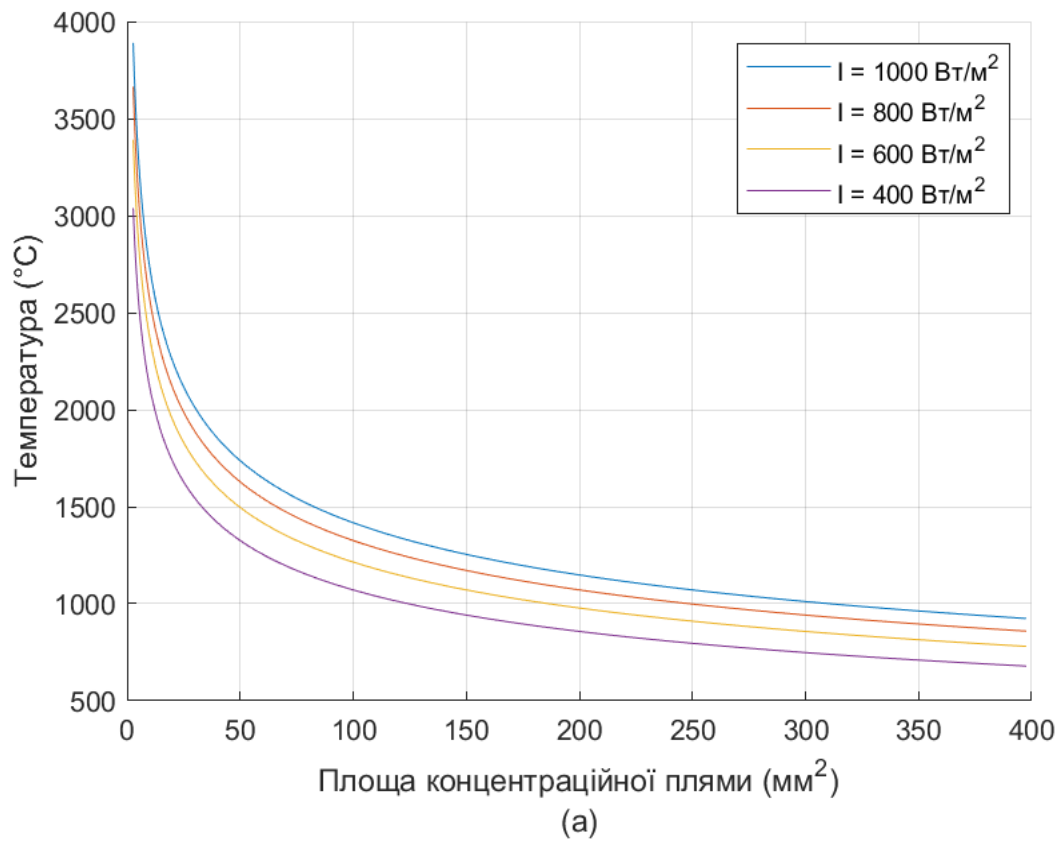


Рисунок 2.8 – Залежність температури сонячної концентраційної плями: а) від площі концентраційної плями, б) від відстані між лінзою та поверхнею

Висновки до розділу 2

1. Залежність площі концентраційної плями від відстані між лінзою та поверхнею має вигляд параболи з мінімальною площею на фокусній відстані. Водночас мінімальна площа сонячної концентраційної плями залежить тільки від фокусної відстані лінзи, а радіус мінімальної плями дорівнює: $\frac{f}{215}$.

2. Глибина фокусу – є основною характеристикою лінзи, що визначає вимоги точності розташування лінзи до нагрівача двигуна Стірлінга, для забезпечення мінімальної концентраційної плями. Для наведеного прикладу (лінзи з $r = 150$ (мм) та $f = 200$ (мм)), глибина фокуса дорівнює – 2,4 мм. Це означає, що нагрівач двигуна Стірлінга, на якому концентрується сонячне випромінювання, має розташовуватися на відстані ± 1.2 мм від фокусної відстані лінзи. Залежність глибини фокусу лінзи від її радіусу має вигляд гіперболи, з найменшою глибиною фокусу для найменшого радіусу, а залежність глибини фокусу лінзи від її фокусної відстані має вигляд гілки параболи, з найменшою глибиною фокусу для найменшої фокусної відстані.

3. Залежність температури сонячної концентраційної плями від її площі і від відстані між лінзою та поверхнею, на якій концентрується сонячне випромінювання, є критично важливою, оскільки для наведеного прикладу лінзи при розташуванні її на відстані ± 15 мм від фокусної відстані може змінити максимальну температуру концентраційної плями на 3000°C при інсоляції 1000 Вт/м^2 .

4. Інтенсивність сонячного випромінювання має більший вплив на величину температури концентраційної плями при меншій її площі. Різниця температури при величині сонячного випромінювання між 1000 Вт/м^2 та 400 Вт/м^2 для площі концентраційної плями $2,72 \text{ мм}^2$ становить 850°C , а при площі 400 мм^2 – становить 240°C .

РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОЇ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА

Оскільки інтенсивність сонячного випромінювання має випадковий характер, виникає необхідність у додатковому джерелі теплоти для досягнення стартової температури двигуна та підтримання мінімального рівня різниці температур.

Щоб компенсувати нестабільність сонячного випромінювання, дослідження [43][44] пропонують інтеграцію двигуна Стірлінга з додатковими джерелами теплоти, такими як пальники на дерев'яних палетах [43] та системи на біомасі [44]. 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 теплоакумуючими ємностями [45], що забезпечують стабільність роботи установки незалежно від часу доби та погодних умов.[46][47]

Комбінація сонячного випромінювання з додатковими джерелами теплоти, такими як електричні нагрівачі, є перспективним напрямком підвищення стабільності роботи двигуна Стірлінга. Електричні нагрівачі компенсують зниження температури робочого тіла в моменти низької сонячної активності, забезпечуючи стабільну роботу двигуна. Використання лінзи Френеля як концентратора сонячної енергії сприяє ефективному використанню сонячного випромінювання, мінімізуючи його втрати та забезпечуючи підвищений ККД системи. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати природні ресурси та підвищує надійність систем у регіонах із високою хмарністю чи нестабільними кліматичними умовами.

3.1 Визначення необхідної кількості енергії та часу для досягнення температури старту на котлі двигуна Стірлінга

Для розрахунку температури на котлі двигуна Стірлінга скористаємося законом збереження енергії. Відповідно до даного закону, зміна внутрішньої енергії системи дорівнює різниці між отриманою та втраченими енергіями:

$$\Delta Q = Q_{\text{отр}} - Q_{\text{втр}}, \quad (3.1)$$

де ΔQ , $Q_{\text{отр}}$, $Q_{\text{втр}}$ – зміна внутрішньої енергії системи, енергія поглинута приймачем двигуна Стірлінга та енергія, яка втрачена через тепловіддачу за певний проміжок часу dt відповідно. Зміна внутрішньої енергії системи згідно з формули теплоємності дорівнює:

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (3.2)$$

де m – маса приймача (кг), c – питома теплоємність матеріалу приймача (для сталі становить 460 Дж/(кг · °C)), $\frac{dT}{dt}$ – швидкість зміни температури. Отримана енергія приймачем розраховується за наступною формулою:

$$Q_{\text{отр}} = P \cdot dt = J \cdot S \cdot \eta \cdot \alpha \cdot dt, \quad (3.3)$$

де P – поглинена потужність приймачем (Вт), J – інсоляція (Вт/м²), S – площа лінзи (м²), η – оптичний коефіцієнт ефективності лінзи (в.о.), α – коефіцієнт поглинання поверхні (для сталі становить 0,64 в.о.). Втрати енергії через тепловіддачу визначаються за законом Ньютона для охолодження:

$$Q_{\text{втр}} = h \cdot A \cdot (T - T_{\text{ambient}}) \cdot dt, \quad (3.4)$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі (для подальших розрахунків використовується 35 Вт/(м²·°C)); A – сприймаюча площа котла двигуна Стірлінга (м²); T – поточна температура на котлі (°C); T_{ambient} – температура навколишнього середовища (°C); Втрати на теплове випромінювання окремо не враховуються, оскільки вони включені до узагальненого коефіцієнта тепловіддачі, прийнятого із завищенням. Після підстановки у формулу 3.1 значення виразів 3.2, 3.3 і 3.4, отримуємо наступне співвідношення:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = J \cdot S \cdot \eta \cdot \alpha \cdot dt - h \cdot A \cdot (T - T_{ambient}) \cdot dt, \quad (3.5)$$

тоді:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{J \cdot S \cdot \eta \cdot \alpha - h \cdot A \cdot (T - T_{ambient})}{m \cdot c} dt, \quad (3.6)$$

Для чисельного розв'язання рівняння теплового балансу (3.6) використовується метод Ейлера з часовим кроком $\Delta t = 1c$, а початкова температура приймача $T(0)$ приймається рівною температурі навколишнього середовища $T_{ambient} = 25^\circ C$. Температура в момент часу $T(t + \Delta t)$ визначається за формулою:

$$T(t + \Delta t) = T(t) + \frac{J \cdot S \cdot \eta \cdot \alpha - h \cdot A \cdot (T(t) - T_{ambient})}{m \cdot c} \cdot \Delta t, \quad (3.7)$$

Наведемо приклад розрахунків у початковий момент часу, для лінзи Френеля, яка використовувалася для прикладу розрахунків у 2 розділі. А саме із співвідношенням діаметру лінзи до фокусної відстані – 3/2 (радіусом 150 мм та фокусною відстанню 200 мм) та стендового двигуна Стірлінга з циліндричним котлом висотою 45 мм та зовнішнім діаметром 15 мм та масою 20 г. Тоді площа лінзи дорівнює:

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 150^2 \cdot 10^{-6} = 0.0707 \text{ (м}^2\text{)}, \quad (3.8)$$

Оптичний коефіцієнт ефективності лінзи визначається за допомогою кратності лінзи, що знаходиться за формулою 2.18 і залежності оптичної ефективності лінзи від її кратності, що наведена на рис. 2.7, який дорівнює 0.87.

Для точного визначення площі теплопередачі A – враховується площа бічної поверхні та площа обох основ циліндра:

$$A_{side} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot 7.5 \cdot 45 = 2120,6 \text{ мм}^2, \quad (3.9)$$

$$A_{bases} = 2 \cdot \pi \cdot r^2 = 2 \cdot \pi \cdot 7,5^2 = 353,4 \text{ мм}^2, \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} A &= (A_{side} + A_{bases}) \cdot 10^{-6} = (2120,6 + 353,4) \cdot 10^{-6} \\ &= 0,0025 \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Після підстановки усіх значень у вираз 7, температура для першої секунди часу складе:

$$\begin{aligned}
 &T(1) \\
 &= 25 + \frac{1000 \cdot 0,07 \cdot 0,87 \cdot 0,64 - 35 \cdot 0,0025 \cdot (25 - 25)}{0,02 \cdot 460} \cdot 1 \quad (3.12) \\
 &= 25 + 4,24 = 29,24 \text{ }^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

Проте варто зазначити, що дана температура є середньою температурою всього приймача, а не в місці концентрації сонячних променів. Для подальших розрахунків у інші проміжки часу використано програмний пакет MATLAB, за різного рівня інсоляції, з математичним очікуванням – 1000 Вт/м² та середньоквадратичним відхиленням – 18,8 Вт/м². Залежність температури на приймачі двигуна Стірлінга від рівня інсоляції з кроком у часі 1 с зображено на рис. 3.1.

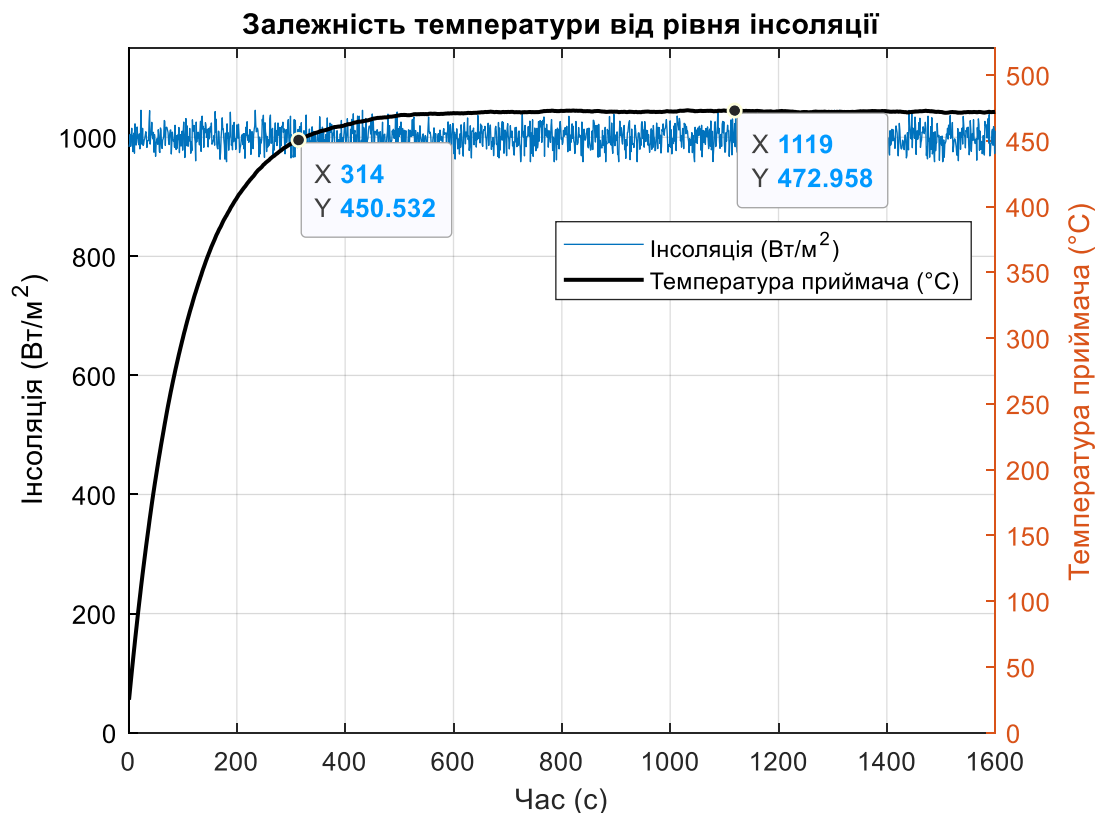


Рисунок 3.1 – Залежність температури на приймачі двигуна Стірлінга від рівня інсоляції (на позначених точках: X – час (с), Y – температура(°C))

Якщо взяти мінімальну робочу температуру на гарячій частині двигуна 450°C (робота двигуна при неробочому ході), тоді із рис. 3.1 можна зробити

висновок, що двигун почне працювати на 314с після початку нагрівання, а максимальна температура, яку можна досягнути, становитиме 473°C. Для визначення кількості енергії, яка необхідна для початку роботи визначимо площу під кривою використаної потужності до моменту досягнення робочої температури за допомогою методу числового інтегрування. Тоді необхідна кількість енергії дорівнюватиме 12.3 кДж.

3.2 Визначення мінімальної потужності для забезпечення роботи двигуна Стірлінга

Щоб визначити мінімальну потужність, при якій температура приймача не опускається нижче робочої (у даному прикладі це – 450 °C), потрібно врахувати тепловий баланс системи. Основна ідея полягає в тому, щоб підтримувати тепловий потік, який компенсує втрати теплоти через конвекцію та інші механізми. Тоді із виразів 3.1, 3.2, 3.3 та 3.4 можна визначити поглинуту потужність за одиницю часу:

$$P = h \cdot A \cdot (T - T_{ambient}) - m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3.13)$$

Для підтримки стабільної температури $T = 450^\circ\text{C}$, швидкість зміни температури $\frac{dT}{dt} = 0$. Тоді попереднє рівняння спрощується та дорівнює:

$$\begin{aligned} P &= h \cdot A \cdot (T - T_{ambient}) = 35 \cdot 0,0025 \cdot (450 - 25) \\ &= 37.2 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Щоб визначити необхідний рівень інсоляції для забезпечення потрібної поглиненої потужності на приймачі, скористаємося формулою 3.3, яка виражає цю залежність. Тоді мінімальний рівень інсоляції буде дорівнювати:

$$J = \frac{P}{S \cdot \eta \cdot \alpha} = \frac{37.2}{0.0707 \cdot 0,87 \cdot 0,64} = 945 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (3.14)$$

Отже, для стабільної роботи двигуна Стірлінга необхідно забезпечувати постійну подачу енергії у розмірі 37,2 Вт щосекунди. Це відповідає рівню

сонячної радіації 945 Вт/м^2 при використанні лінзи з радіусом 150 мм. Однак такі високі показники інсоляції можуть бути досягнуті лише за умови ясного неба та мінімальної хмарності, і навіть тоді лише протягом короткого проміжку часу, коли Сонце знаходиться у зеніті. Це обмежує тривалість роботи двигуна та його ефективність у реальних умовах.

Для підвищення стабільності системи та збільшення часу її роботи розглянуті два основні підходи: збільшення розміру лінзи для захоплення більшої кількості сонячної енергії або інтеграція додаткового джерела енергії, наприклад, акумуляторної системи, яка дозволить компенсувати періоди зниженої інсоляції. Такі заходи забезпечать більш надійну та тривалу роботу двигуна навіть за умов нестабільного сонячного освітлення.

Залежність між рівнем інсоляції для роботи двигуна Стірлінга та необхідним радіусом лінзи (при однаковій кратності оптичної системи та поглинутій потужності) наведена на рис. 3.2. Ця залежність демонструє, як зміна надходження інсоляції впливає на необхідний радіус лінзи, щоб забезпечити мінімальну робочу температуру на котлі двигуна Стірлінга.

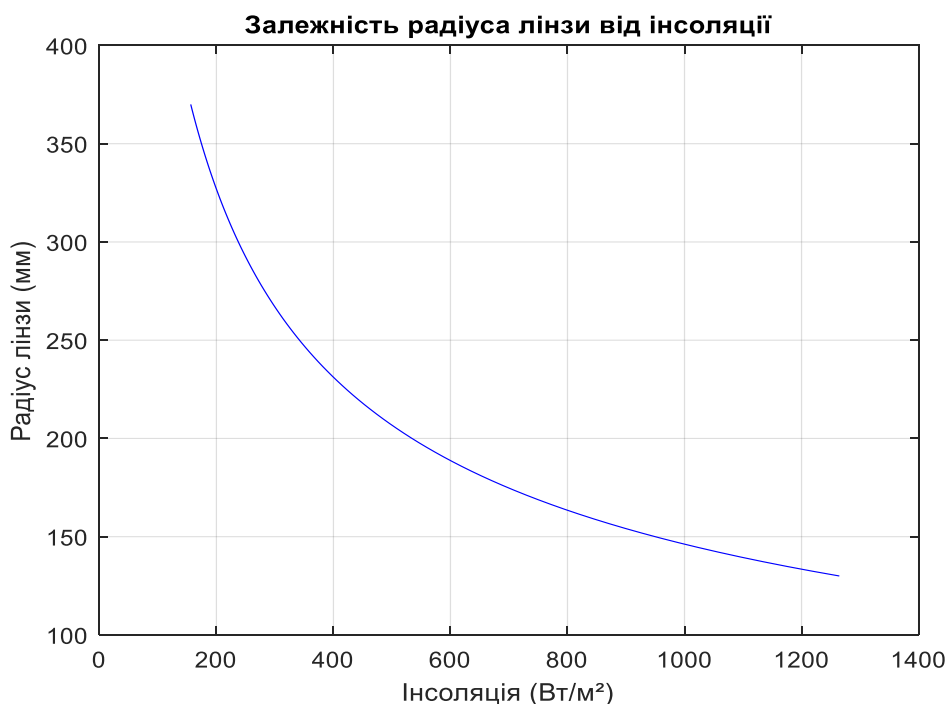


Рисунок 3.2 – Залежність необхідного радіуса лінзи від надходження інсоляції для забезпечення роботи двигуна Стірлінга

Отже, з рис. 3.2 можна зробити висновок, що для лінз малого діаметру необхідно використовувати додаткові відбивачі сонячного випромінювання, щоб забезпечити достатній рівень інсоляції. Зі збільшенням радіусу лінзи необхідний рівень інсоляції зменшується за гіперболічним законом, що робить великі лінзи більш ефективними для досягнення потрібної температури, оскільки вони зможуть забезпечувати роботу двигуна при нижчій інсоляції. Однак важливо враховувати, що ця залежність справедлива переважно для прямої сонячної інсоляції, коли сонячне випромінювання падає на лінзу без перешкод. У випадку дифузного випромінювання (наприклад, при хмарності або розсіяному світлі) ефективність лінзи знижується.

3.3 Визначення потужності додаткового джерела енергії для підтримки робочої температури в умовах недостатньої інсоляції

Насамперед побудуємо графік залежності температури від інсоляції, враховуючи зниження надходження сонячної радіації з центром на 200 с та тривалістю 40 с. Дане зниження характеризується математичним очікуванням 122 Вт/м^2 та середнім квадратичним відхиленням $7,5 \text{ Вт/м}^2$, а початкова температура на приймачі дорівнює $-470 \text{ }^\circ\text{C}$. Цей аналіз дозволяє визначити момент часу, коли температура опускається нижче критичної, що є необхідним для вмикання додаткового джерела теплоти. Отримана залежність наведена на рис. 3.3.

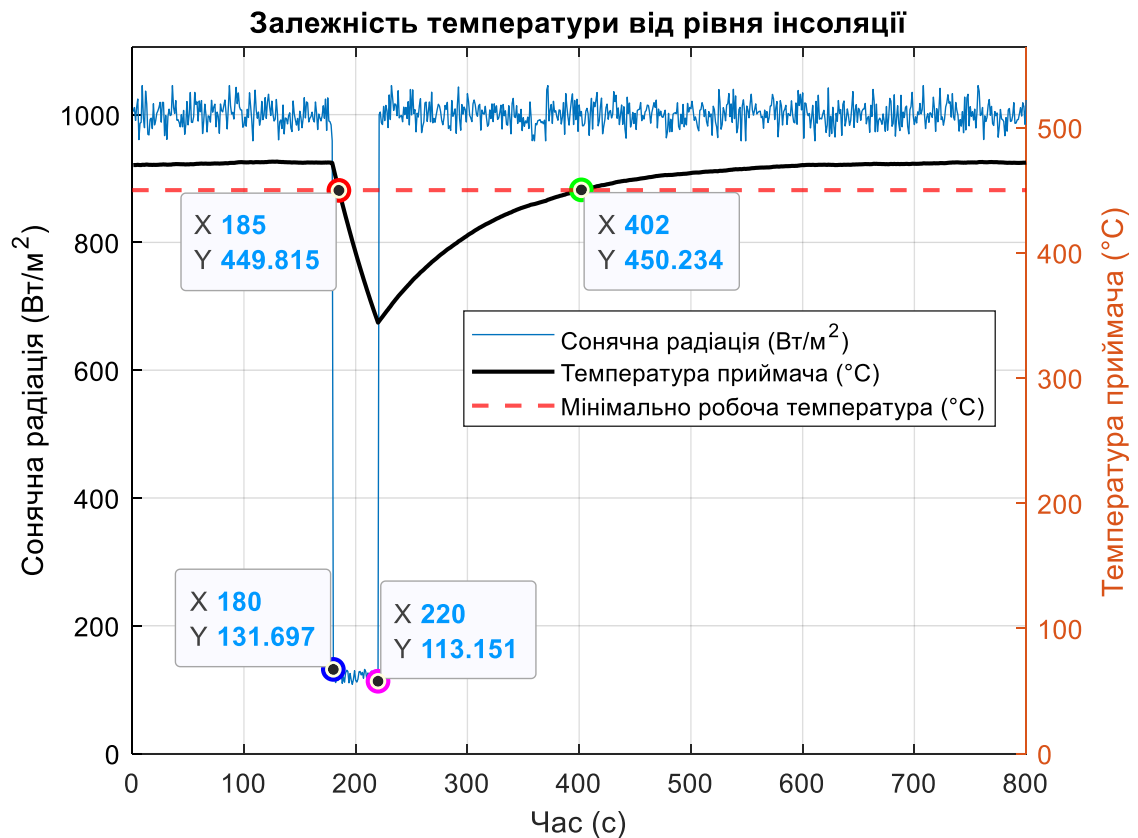


Рисунок 3.3 – Залежність температури на приймачі двигуна Стірлінга від рівня інсоляції (із зниженням надходження інсоляції) – (на позначених точках (червоний та зелений колір): X – час (с), Y – температура(°C); (синій та рожевий колір): X – час (с), Y – інсоляція(Вт/м²))

Отже, аналіз рис. 3.3 дозволяє виявити ключові зміни в надходженні сонячної радіації та температурі під час експерименту. Зниження інсоляції спостерігається між 180 та 220 секундами після початку експерименту (позначено синьою та рожевою мітками на графіку). Це призводить до того, що температура опускається нижче критичної позначки вже на 185 секунд (червона мітка). Відновлення температури до робочого рівня відбувається лише на 402 секунд (зелена мітка). Таким чином, за умови відсутності додаткового джерела теплоти, зниження інсоляції до 122 Вт/м² протягом 40 секунд призводить до зупинки двигуна на період між 185 та 402 секундами (загалом 217 секунд). Щоб уникнути зупинки двигуна в таких умовах, необхідно забезпечити додаткове джерело теплоти, яке компенсуватиме тимчасове зниження сонячної радіації.

Додаткове джерело енергії (ДДЕ) може бути увімкнене за двох умов:

1. Коли температура на приймачі досягає критичного рівня.
2. Коли кількість енергії сонячної радіації опускається нижче критичного рівня.

Візуальне відображення необхідної кількості енергії для цих двох варіантів наведено на рис. 3.4. На графіку вертикальна лінія вказує на момент часу, коли температура в системі вперше опустилася нижче заданого порогового значення $T_{min} = 450^{\circ}\text{C}$. Горизонтальна лінія відображає мінімальну робочу потужність $P_{min} = 37.2$ Вт, необхідну для стабільної роботи системи.

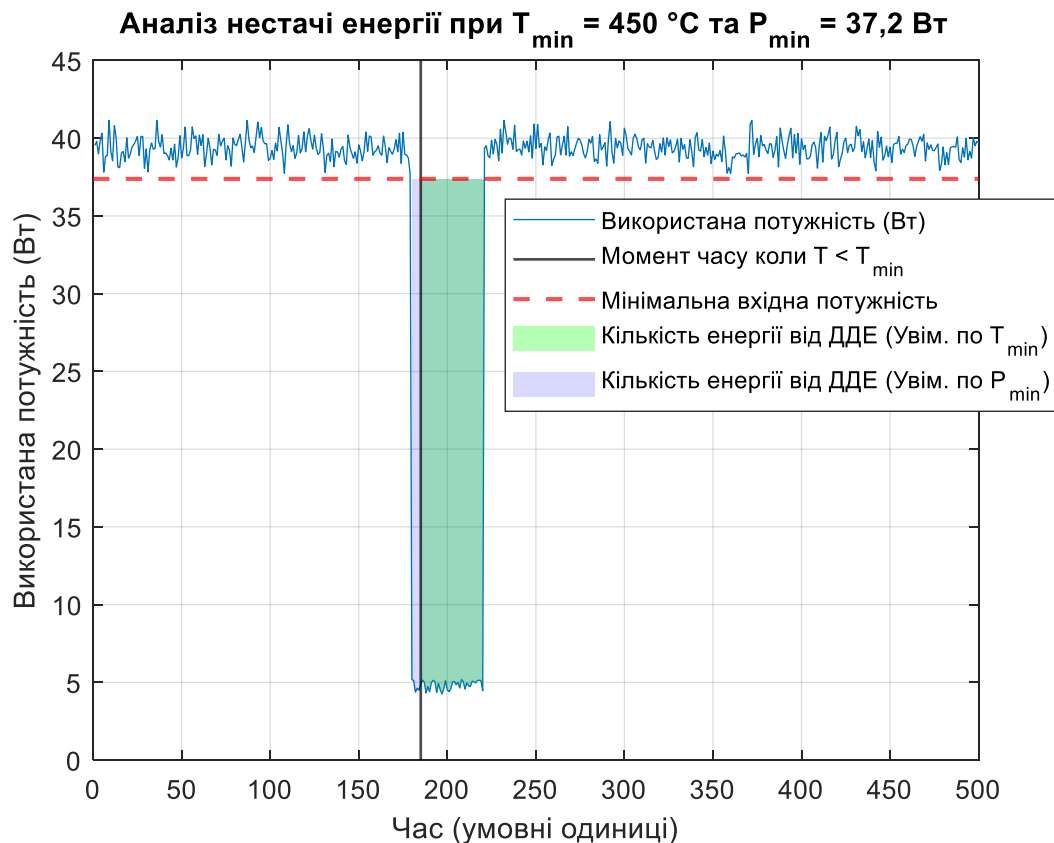


Рисунок 3.4 – Аналіз необхідної додаткової енергії при увімкненні додаткового джерела енергії при досягненні T_{min} та P_{min}

Зафарбована область під кривою використаної потужності, обмежена значенням P_{min} , відображає необхідну кількість енергії для обох умов. Ця

потреба у енергіях виникає через недостатню потужність, спричинену зниженням надходження сонячної радіації. Для обчислення площі цієї області було використано метод числового інтегрування, що дозволило оцінити загальну кількість енергії, необхідної для компенсації зниження надходження енергії та забезпечення стабільної роботи системи.

Після розрахунку необхідних площ було визначено, що кількість енергії, необхідної для компенсації просадки, становить:

- 1155 Дж – у випадку вмикання ДДЕ при досягненні критичної температури T_{min} ;
- 1318 Дж – у випадку вмикання ДДЕ при зниженні надходження потужності нижче P_{min} .

Із врахуванням ККД електронагрівача ($\eta = 0,9$ в.о.), витрата енергії від додаткового джерела енергії становитиме:

- 1283 Дж – у випадку вмикання ДДЕ при досягненні критичної температури T_{min} ;
- 1464 Дж – у випадку вмикання ДДЕ при зниженні надходження потужності нижче P_{min} .

Різниця між цими значеннями становить 181 Дж (12%). Це пов'язано з тим, що вмикання ДДЕ при зниженні потужності відбувається на 5 секунд раніше, ніж у випадку з критичною температурою. Однак варто зазначити, що генерація електроенергії вища та ризик зупинки двигуна Стірлінга значно нижчий у випадку вмикання ДДЕ при досягненні P_{min} , оскільки температура на приймачі двигуна залишається вищою, що забезпечує стабільнішу роботу системи.

Максимальна необхідна потужність ДДЕ (P_{AES}) буде дорівнювати різниці між мінімально необхідною потужністю для роботи двигуна Стірлінга ($P_{min} = 37.2$ Вт) та мінімальним значенням використаної потужності ($\min[P_{used}] =$

4.3Вт – на 197 с) із врахуванням ККД електронагрівача ($\eta = 0,9$ в.о.). Тоді, необхідна потужність ДДЕ буде дорівнювати:

$$P_{AES} = \frac{P_{min} - \min[P_{used}]}{\eta} = \frac{37.2 - 4.3}{0.9} = 36.6 \text{ Вт} \quad (3.15)$$

Залежність зміни температури на приймачі двигуна Стірлінга для трьох сценаріїв: без використання ДДЕ, з вмиканням ДДЕ при досягненні T_{min} та з вмиканням ДДЕ при досягненні P_{min} , наведено на рис. 3.5.

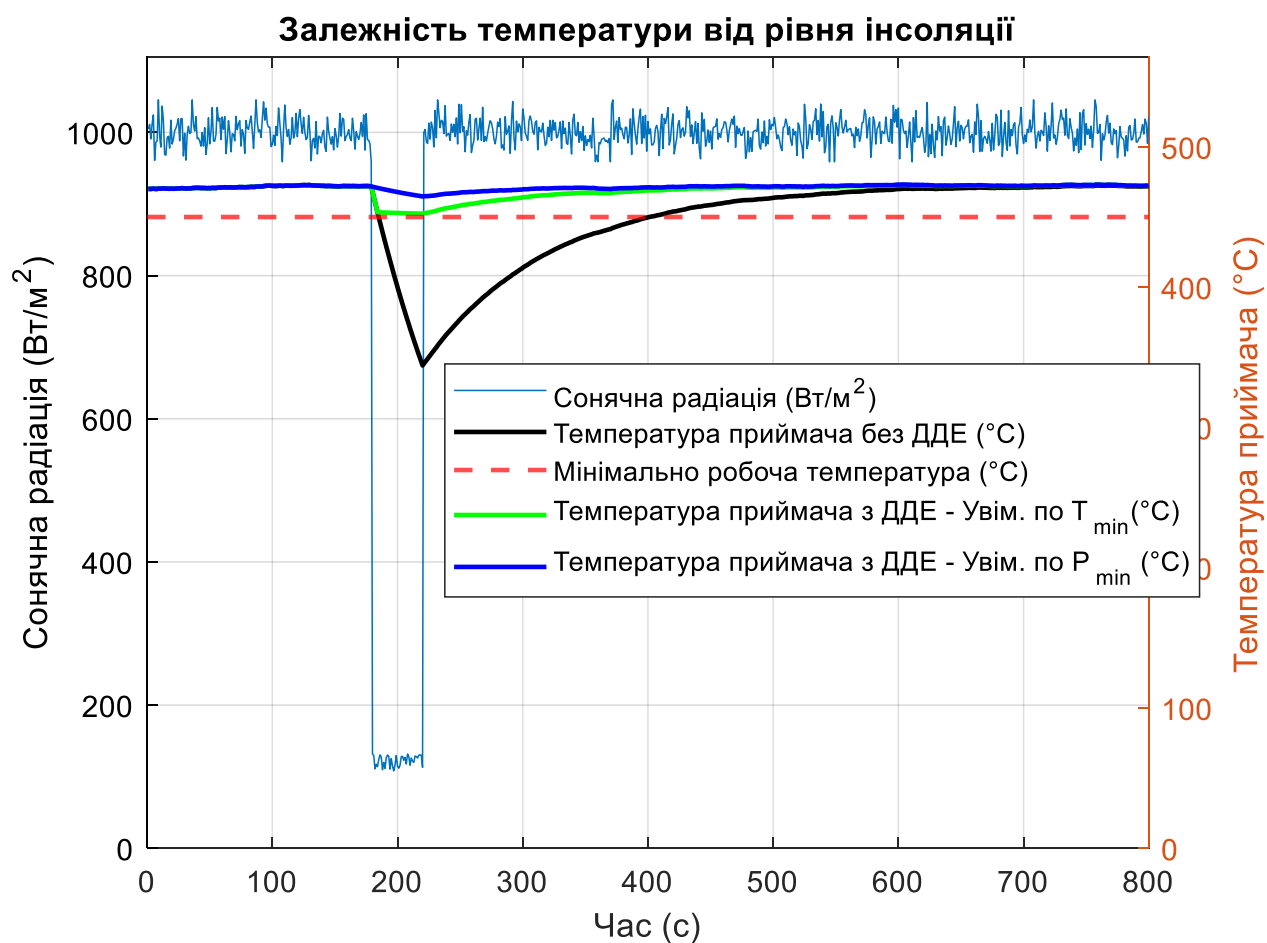


Рисунок 3.5 – Залежність температури приймача двигуна Стірлінга від рівня сонячної радіації для трьох сценаріїв: без використання додаткового джерела енергії (ДДЕ), з увімкненням ДДЕ при досягненні T_{min} та з увімкненням ДДЕ при досягненні P_{min}

3.4 Визначення доцільності використання електричного нагрівача як додаткового джерела теплоти

Оскільки, для даного прикладу зниження рівня надходження сонячної радіації, максимальний час затримки надходження додаткової кількості енергії 5 с, тому використання електричного нагрівача як джерела додаткової енергії є раціональним рішенням. Це обумовлено його здатністю забезпечувати швидку передачу теплоти до гарячої частини двигуна Стірлінга, що дозволяє підтримувати стабільну роботу системи навіть за умов нестабільного сонячного випромінювання.

Для оцінки доцільності використання електричного нагрівача необхідно порівняти генерацію електроенергії двигуном, приєднаним до валу двигуна Стірлінга, у двох режимах: з додатковим джерелом енергії (із увімкненням за рівнем інсоляції) та без нього. Вироблену електроенергію генератором можна визначити за допомогою наступної формули:

$$Q_{output} = \eta \cdot Q_{used} = \eta \cdot h \cdot A \cdot (T(t) - T_{ambient}), \quad (3.16)$$

де η – коефіцієнт корисної дії всієї системи (для прикладу розрахунку візьмемо 0.1 в.о.); Q_{used} – кількість теплоти передана робочому тілу (Дж); Q_{output} – кількість виробленої електроенергії (Дж). Побудуємо графік залежності $Q_{output}(t)$ для двох режимів, враховуючи зупинку двигуна при досягненні критичної температури.

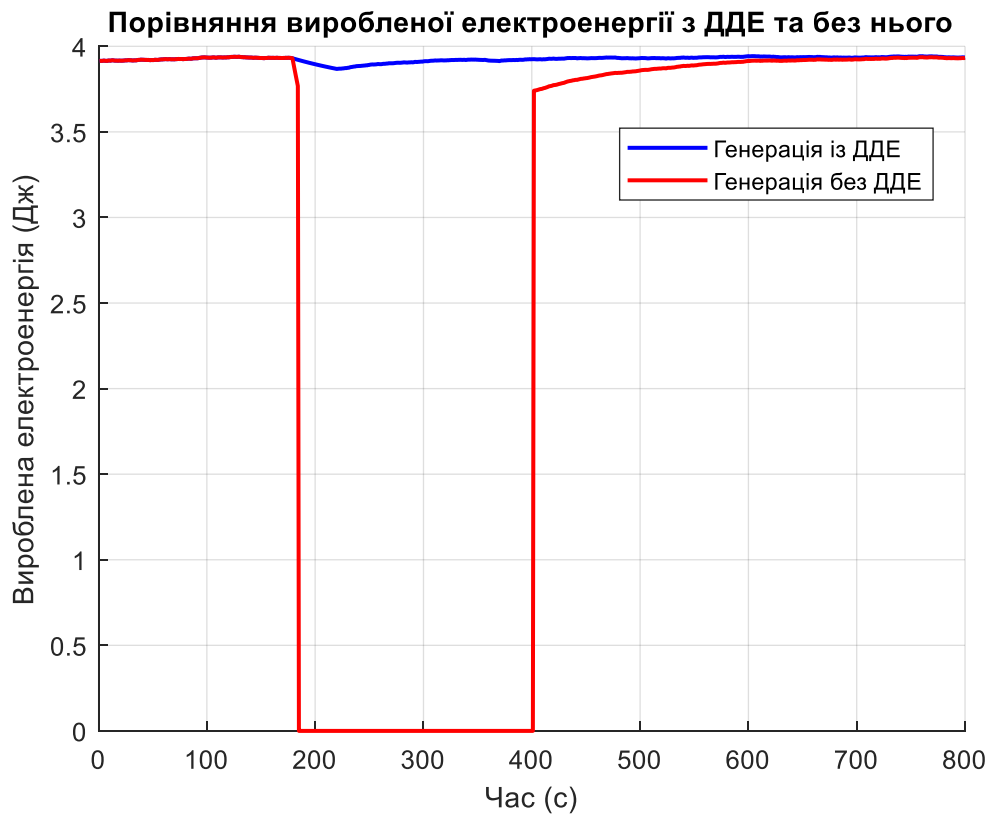


Рисунок 3.6 – Залежність виробленої електроенергії протягом часу для двох сценаріїв: без використання додаткового джерела енергії (ДДЕ) та із ДДЕ з увімкненням при досягненні P_{min}

Отже, знайшовши площі під графіками, представленими на рис. 3.6, було визначено загальну кількість енергії, виробленої електричним генератором, який підключений до валу двигуна Стірлінга. Результати розрахунків для двох досліджуваних режимів роботи системи показали наступне:

- 2269 Дж – без використання ДДЕ;
- 3136 Дж – із використанням ДДЕ.

Різниця між цими значеннями становить 867 Дж (38%) на користь режиму з використанням джерела додаткової енергії. Однак для об'єктивного порівняння необхідно врахувати енергію, витрачену на роботу ДДЕ. Після віднімання цієї енергії чиста вироблена енергія для режиму з ДДЕ становитиме:

$$Q_{pure} = Q_{output} - Q_{AES} = 3136 - 1464 = 1672 \text{ Дж} \quad (3.17)$$

Отже, для розглянутого прикладу зниження сонячної радіації та ККД системи 10%, різниця у виробленій енергії між двома досліджуваними режимами становить 597 Дж на користь режиму без використання джерела додаткової енергії. Для візуалізації цієї залежності на рис. 3.7 представлено графік зміни різниці корисної енергії між цими режимами залежно від ККД системи.

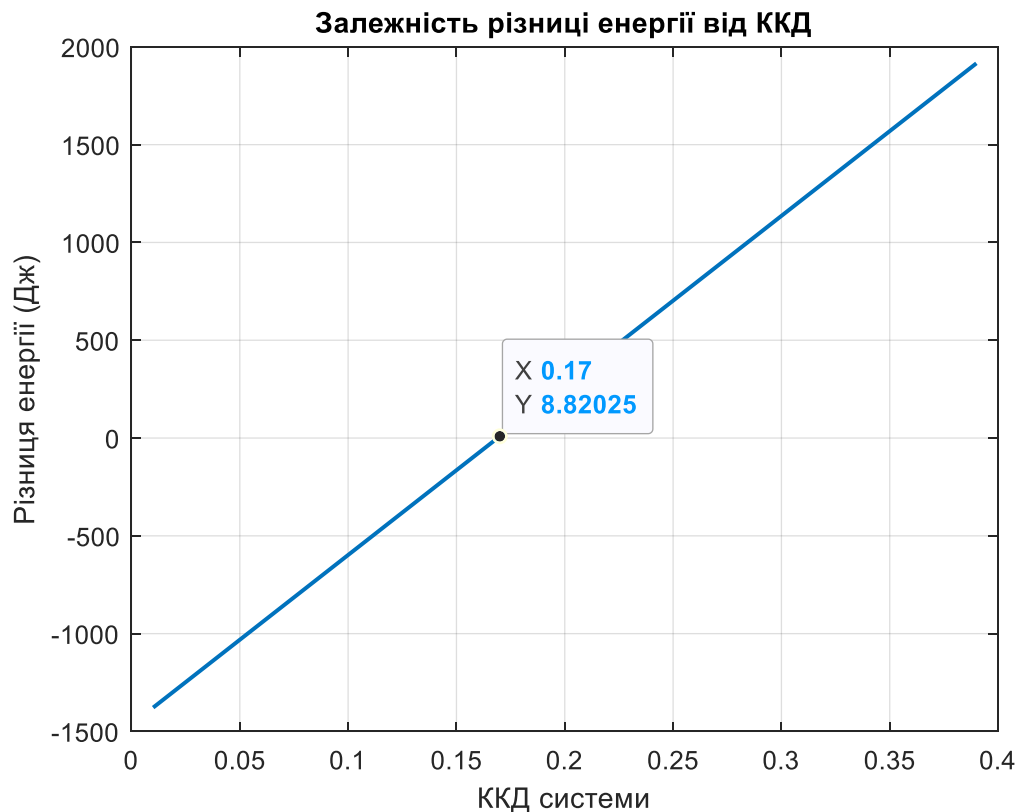


Рисунок 3.7 – Залежність різниці виробленої енергії (із врахуванням витрати додаткової енергії на підігрів) між режимом без додаткового джерела енергії (ДДЕ) та з ДДЕ від ККД системи (на позначеній точці: X – ККД (в.о.), Y – різниця виробленої енергії (Дж))

Тоді, з рис. 3.7 видно, що залежність різниці корисної енергії між розглянутими режимами має лінійний характер. Використання електронагрівача як додаткового джерела енергії стає доцільним при ККД системи понад 17%. Однак, якщо зупинка двигуна Стірлінга є неприпустимою, застосування ДДЕ є необхідною умовою для стабільної роботи системи, навіть за умови негативного енергетичного балансу при низьких значеннях ККД.

Оскільки зміна інсоляції має випадковий характер, доцільно дослідити поведінку системи для різних сценаріїв надходження сонячної радіації. Для цього розглянемо різні рівні її зниження за однаковий часовий інтервал (40 секунд). На рис. 3.8 наведена залежність різниці корисної енергії між двома режимами роботи від ККД системи для різних рівнів зниження інсоляції.

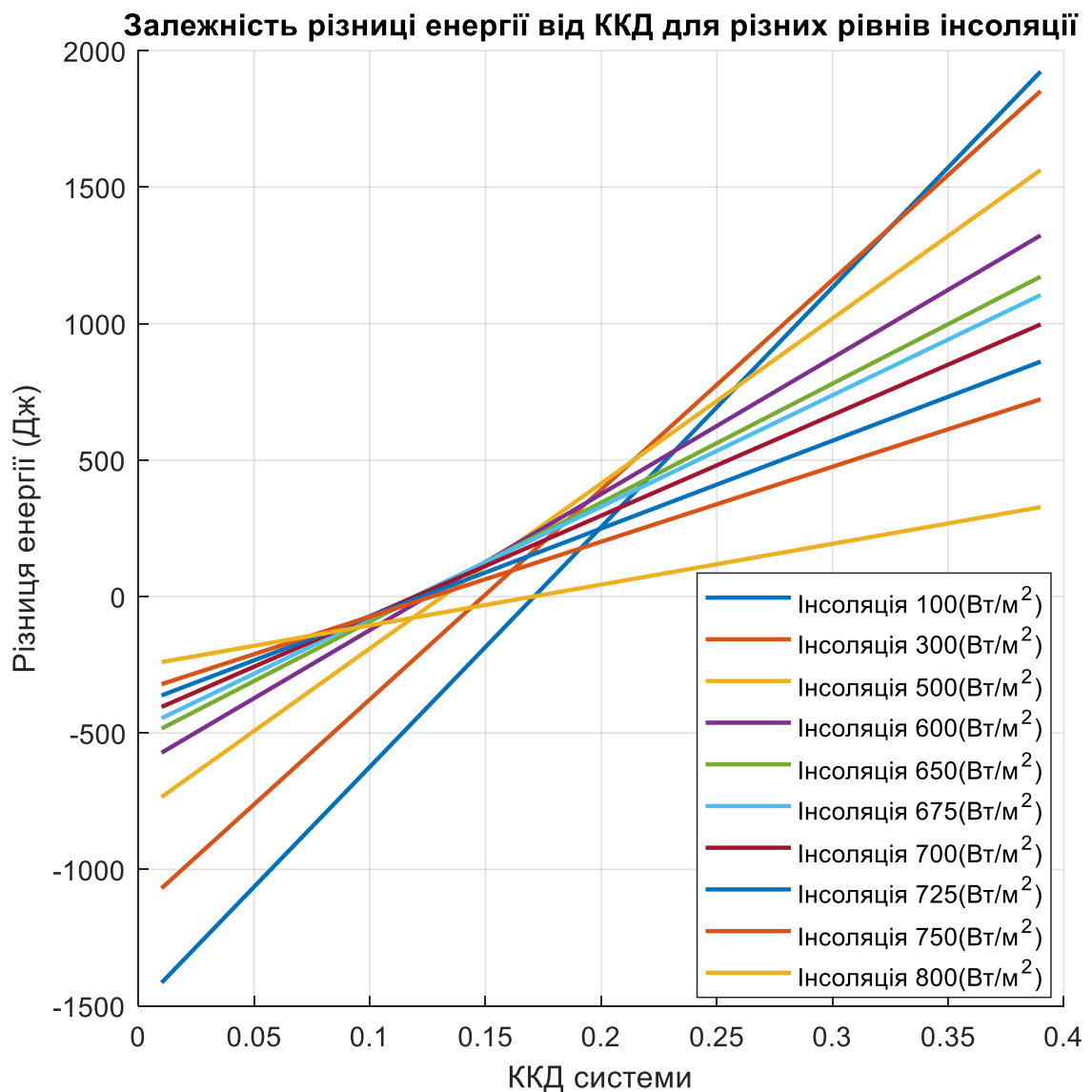


Рисунок 3.8 – Залежність різниці виробленої енергії (із врахуванням витрати додаткової енергії на підігрів) між режимом без додаткового джерела енергії (ДДЕ) та з ДДЕ від ККД системи для різних рівнів інсоляції

З рис. 3.8 можна зробити висновок, що зі збільшенням рівня інсоляції різниця у корисній енергії між двома досліджуваними режимами зменшується

для всіх значень ККД системи. Це пояснюється скороченням часу зупинки двигуна Стірлінга та, відповідно, зменшенням тривалості використання додаткового джерела теплоти. Крім того, для різних рівнів зниження сонячної радіації необхідний пороговий рівень ККД системи, за якого використання ДДЕ стає доцільним, буде відрізнятися. Відповідна залежність наведена на рис. 3.9.

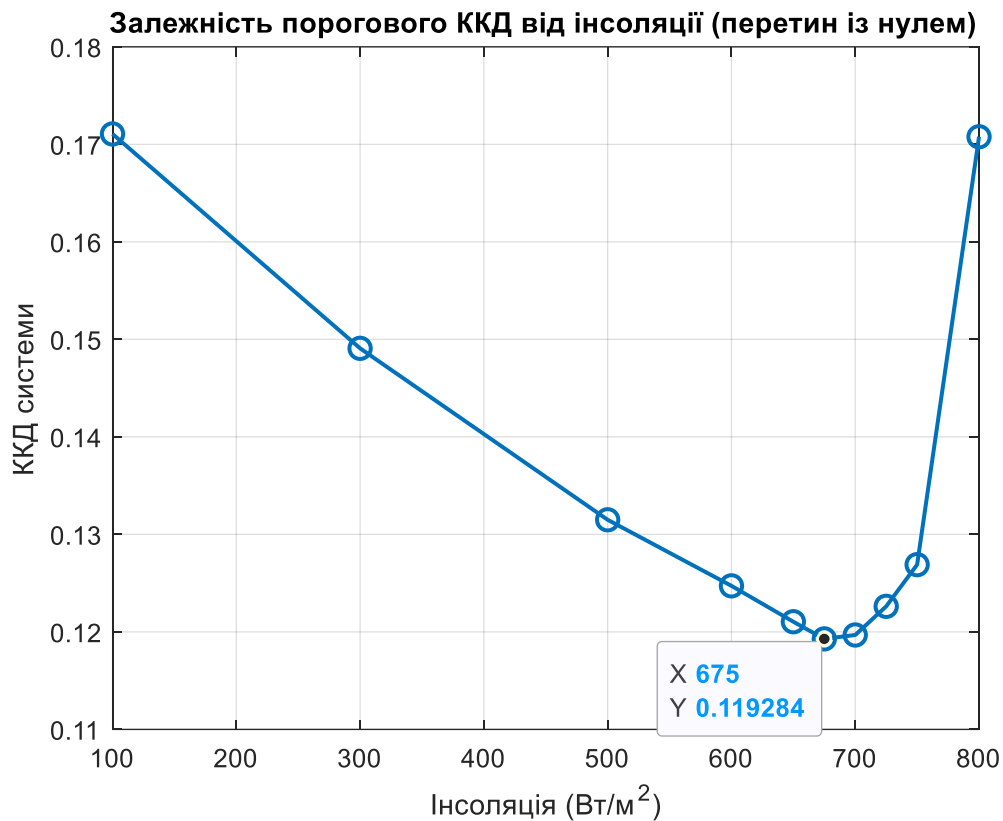


Рисунок 3.9 – Залежність порогового значення ККД системи для доцільності використання додаткового джерела енергії від інсоляції (на позначеній точці: X – інсоляція (Вт/м²), Y – ККД(в.о.))

Із залежності, зображеної на рис. 3.9, можна зробити висновок, що необхідний ККД системи для доцільності використання додаткового джерела теплоти, найменший при рівні інсоляції 675 Вт/м² і становить 11,9%. Це пояснюється тим, що при такому рівні інсоляції Сонце здатне значною мірою покрити потребу в енергії, а незначна частина необхідної енергії від ДДЕ допоможе використати цю енергію. Для рівнів 100 та 800 Вт/м² цей показник є максимальним – 17,1%. Це пов'язано з тим, що при низьких рівнях інсоляції

частка необхідної енергії від ДДЕ зростає для підтримання системи в робочому стані, а при високих рівнях ефективність системи повинна бути високою, щоб доцільно використовувати ДДЕ, оскільки зниження температури на гарячій частині двигуна Стірлінга призводить тільки до короткочасної зупинки двигуна, тому необхідність у ДДЕ для цього рівня інсоляції падає.

Для більш детального аналізу доцільності використання додаткового джерела енергії, розглянемо вплив тривалості зниження інсоляції на різницю корисної енергії між двома режимами та порогові значення ККД для різних часових інтервалів.

На рис. 3.10 наведена залежність різниці корисної енергії між режимами роботи з використанням ДДЕ та без нього від ККД системи для різних рівнів інсоляції (час зниження інсоляції: 20 та 60 секунд). Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки. При збільшенні тривалості зниження інсоляції вплив додаткового джерела енергії на роботу системи стає більш значним. Це проявляється у зростанні різниці між виробленою енергією з використанням ДДЕ та без нього, особливо при високих значеннях ККД системи. Однак, при низьких значеннях ККД, використання ДДЕ може призводити до зниження загального виробітку енергії більш ніж на 2000 Дж. Таким чином, при збільшенні тривалості зниження інсоляції необхідно враховувати ККД системи, оскільки введення ДДЕ може не лише не покращити, а й знизити загальну ефективність генерації енергії.

На рис. 3.11 наведена залежність порогового значення ККД системи, що визначає доцільність використання ДДЕ, від рівня зниження інсоляції для часових проміжків 20, 40 та 60 секунд. З аналізу графіка видно, що зі збільшенням тривалості періоду зниження інсоляції мінімальне значення ККД, за якого використання ДДЕ стає виправданим, зменшується.

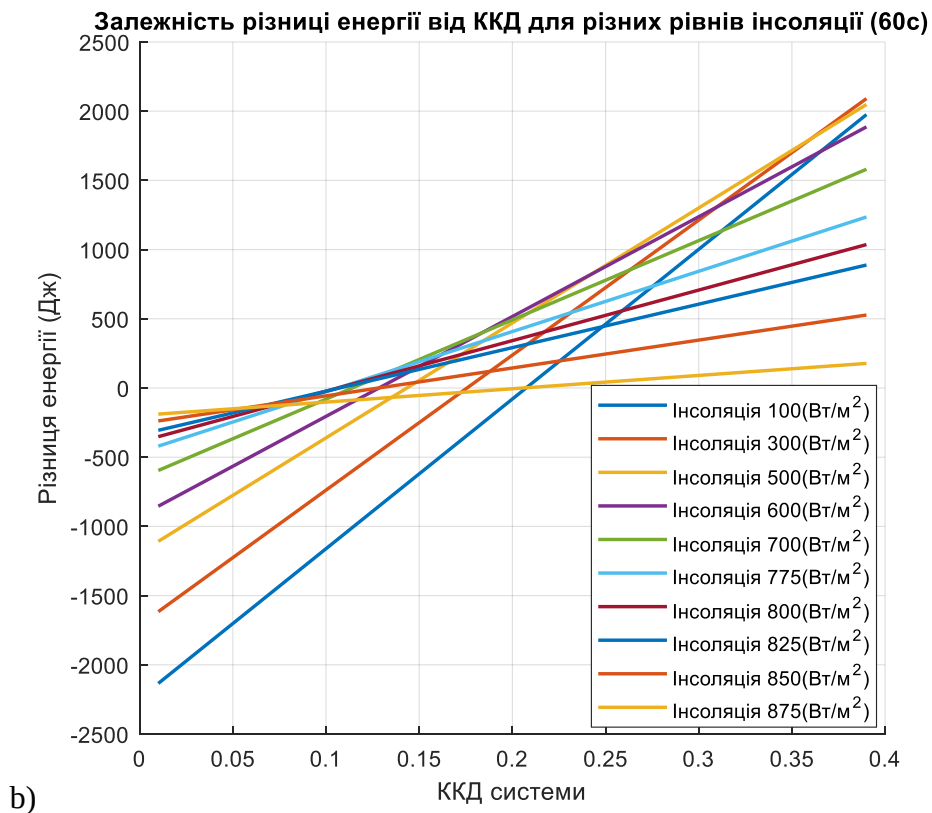
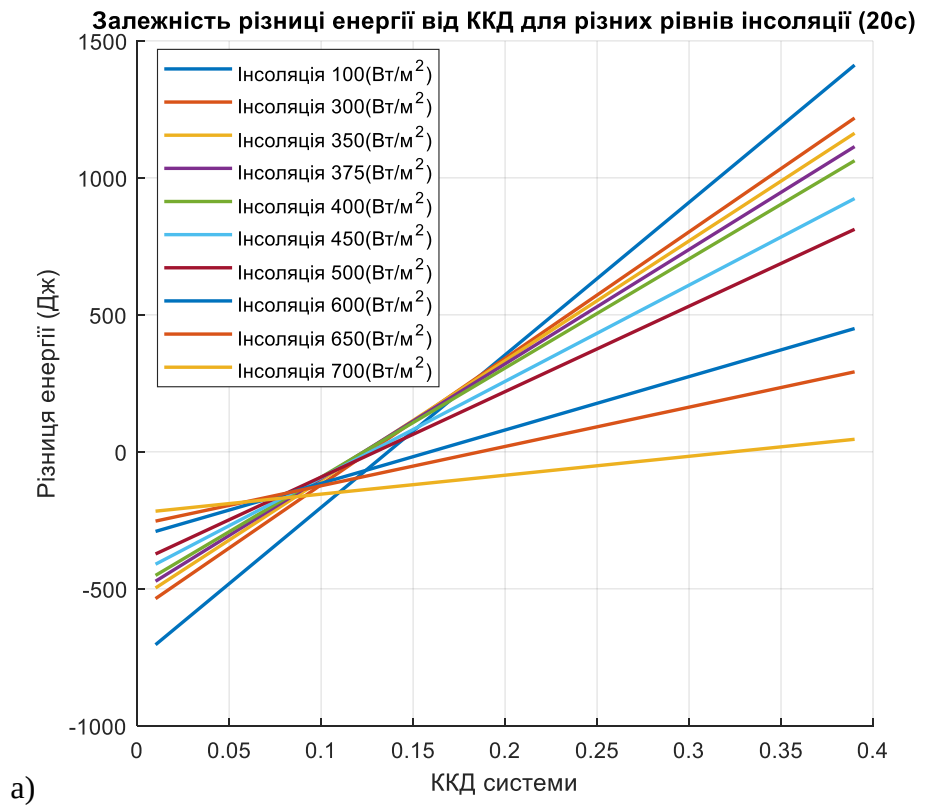


Рисунок 3.10 – Залежність різниці виробленої енергії (із врахуванням витрати додаткової енергії на підігрів) між режимом без додаткового джерела енергії (ДДЕ) та з ДДЕ від ККД системи для різних рівнів інсоляції: (а) зниження інсоляції протягом 20 с, (б) зниження інсоляції протягом 60 с

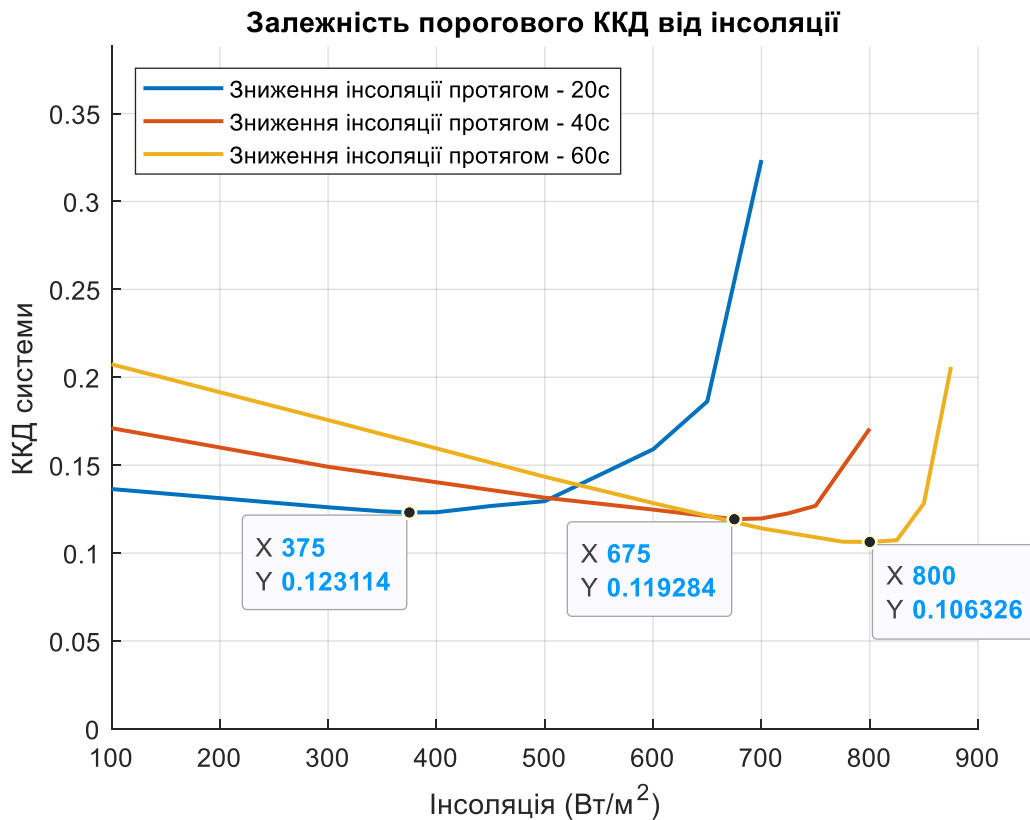


Рисунок 3.11 – Залежність порогового ККД системи для доцільності використання додаткового джерела енергії від інсоляції (на позначених точках:

X – інсоляція (Вт/м²), Y – ККД(в.о.))

Таким чином, для часових проміжків 20, 40 та 60 секунд відповідні мінімальні значення ККД системи становлять 12,3%, 11,9% та 10,6%. Водночас рівень інсоляції, при якому система досягає цього мінімального ККД, зростає і дорівнює 375 Вт/м², 675 Вт/м² та 800 Вт/м² відповідно. Крім того, для низьких значень інсоляції (100–500 Вт/м²) простежується тенденція: зі збільшенням тривалості зниження інсоляції необхідний ККД системи зростає. Це закономірно, оскільки частка енергії, що компенсується за рахунок ДДЕ, збільшується. Отже, результати аналізу підтверджують, що доцільні умови використання ДДЕ залежать не лише від рівня інсоляції, а й від тривалості її зниження.

Висновки до розділу 3

1. Визначено необхідну кількість енергії та час для початку роботи двигуна Стірлінга. Так для розглянутого прикладу двигуна Стірлінга з мінімальною робочою температурою 450°C необхідна енергія для запуску становить 12,3 кДж. Ця енергія отримується шляхом концентрації сонячного випромінювання за допомогою лінзи Френеля площею $0,0025\text{ м}^2$ протягом 314 с, за умови середньої інсоляції 1000 Вт/м^2 .

2. Встановлено, що мінімальна робоча температура на приймачі двигуна є ключовим параметром для вибору радіуса лінзи, оскільки саме температура визначає мінімальну кількість енергії, необхідну для роботи двигуна. Навіть при високому рівню інсоляції (більше 1000 Вт/м^2), якщо розмір лінзи обмежений через певні причини, необхідно використовувати додаткові відбивачі сонячного випромінювання. Це дозволяє компенсувати недостатній розмір лінзи та забезпечити отримання необхідної кількості енергії.

3. Розглянуто два варіанти увімкнення ДДЕ: при досягненні критичної температури T_{min} та при зниженні потужності нижче P_{min} . Визначено, що для компенсації необхідної енергії потрібно 1155 Дж у першому випадку та 1318 Дж у другому, а з урахуванням ККД електронагрівача – відповідно 1283 Дж і 1464 Дж. Різниця між цими значеннями становить 181 Дж (12%). Це пов'язано з тим, що вмикання ДДЕ при зниженні потужності відбувається на 5 с раніше, ніж у випадку з критичною температурою. Увімкнення ДДЕ при досягненні T_{min} є економічнішим варіантом, проте ризик зупинки системи в цьому випадку залишається високим. Якщо зупинка двигуна є неприпустимою, рекомендується використовувати варіант із увімкненням ДДЕ при досягненні P_{min} , оскільки він забезпечує вищу температуру на приймачі двигуна, стабілізує роботу системи та підвищує ефективність генерації енергії.

4. Визначено, що основним параметром для оцінки доцільності використання додаткового джерела енергії (наприклад, електронагрівача) при різних рівнях та тривалості зниження інсоляції є ККД системи. Саме ККД

визначає різницю між кількістю виробленої енергії у двох варіантах: без використання ДДЕ та з його використанням. Якщо ККД системи є низьким, навіть застосування ДДЕ може призводити до зменшення чистої виробленої енергії порівняно з варіантом без ДДЕ.

5. Встановлено, що для кожного часового проміжку, протягом якого спостерігається зниження надходження інсоляції, існує певний рівень інсоляції, при якому ККД системи, необхідний для доцільного використання ДДЕ, буде мінімальним. Іншими словами, саме при цьому рівні інсоляції використання ДДЕ дозволяє згенерувати найбільше енергії. Тому, знаючи ККД системи, рівень зниження інсоляції та очікувану тривалість цього зниження, можна ефективно застосовувати ДДЕ для досягнення максимального загального виробітку електроенергії.

РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДВИГУНА СТРІЛІНГА

4.1 Аналіз математичних моделей двигуна Стірлінга

Математичні моделі двигунів Стірлінга класифікуються від нульового до четвертого порядку аналізу. А саме: емпіричні кореляції (нульовий порядок), наближений (перший порядок), відокремлений (другий порядок), пов'язаний аналіз (третій порядок) та багатовимірний аналіз (четвертий порядок) [48].

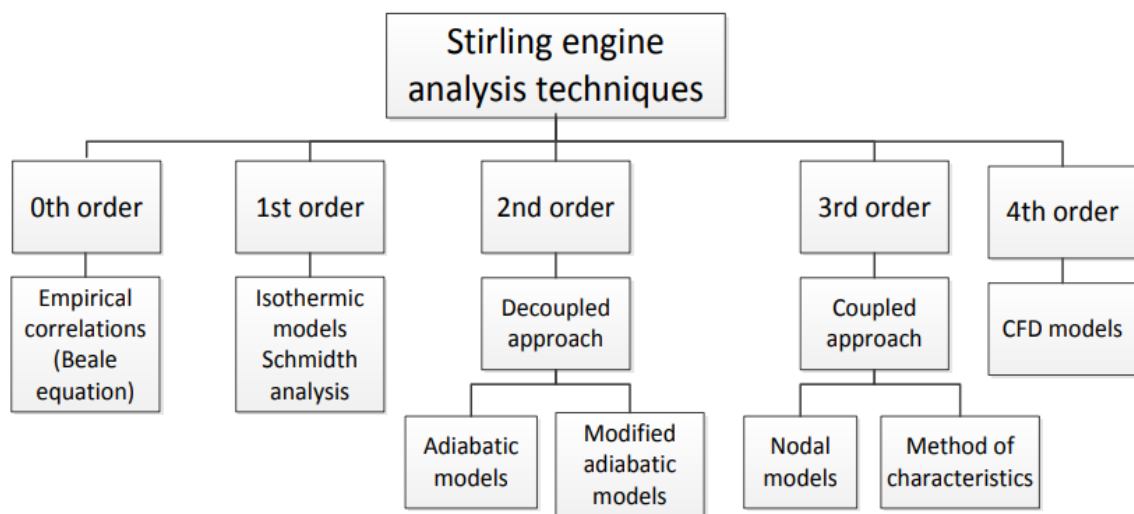


Рисунок 4.1 – Методи аналізу двигуна Стірлінга [48]

4.1.1 Метод нульового порядку

Метод нульового порядку – це найпростіший спосіб аналізу, де вихідна потужність та ефективність машини пов'язані з температурою нагрівача і охолоджувача, а також з об'ємом і швидкістю двигуна. У 1969 році було встановлено, що для декількох двигунів Стірлінга вихідна потужність може бути розрахована і апроксимована за допомогою наступного виразу [49]:

$$P = B_n \cdot p_m \cdot f \cdot V_0, \quad (4.1)$$

де P – вихідна потужність двигуна (Вт), p_m – середній тиск робочого тіла (Па), f – частота обертання двигуна (Гц), V_0 – робочий об'єм силового поршня (м^3), а B_n – число Біла, яке можна визначити з графіка, наведеного на рис. 4.2.

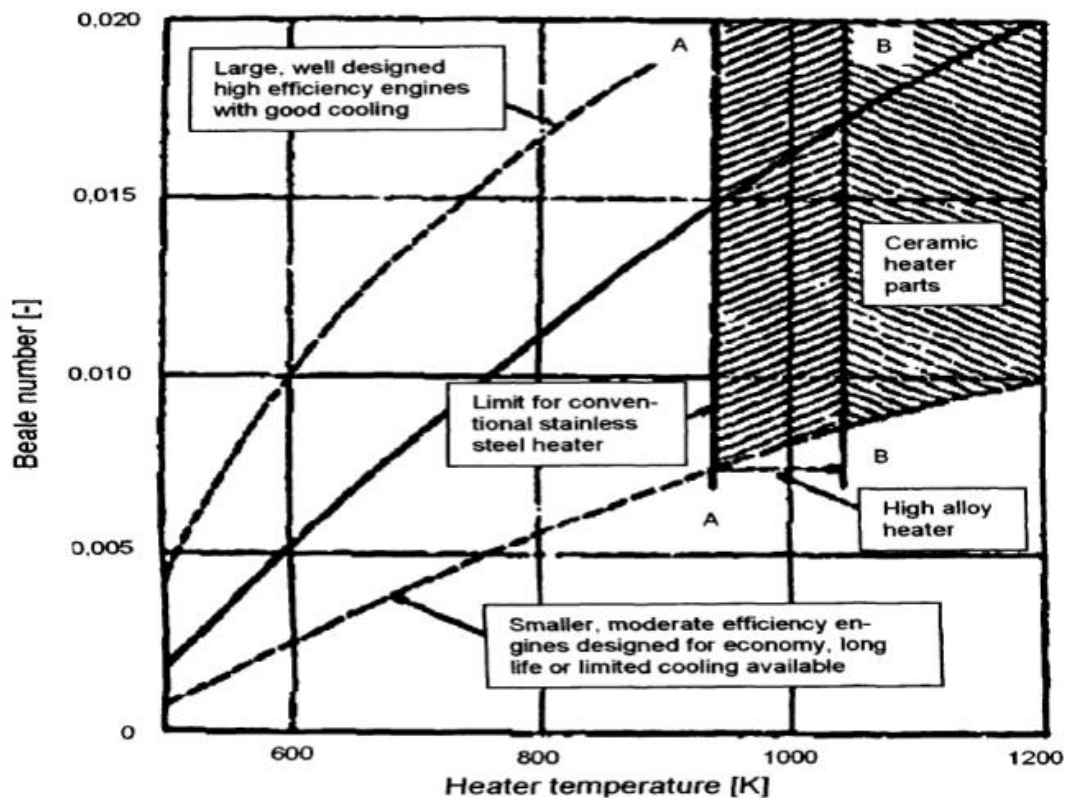


Рисунок 4.2 – Залежність числа Біла від температури нагрівача [49]

4.1.2 Метод першого порядку

Метод першого порядку базується на теорії ізотермічного розширення та ізотермічного стиснення ідеального газу. Метод називається аналізом Шмідта, оскільки вперше він був опублікований професором Густавом Шмідтом у 1871 році. Після деяких спрощень аналіз Шмідта можна використовувати для розрахунку розподілу тиску, вихідної потужності, роботи і теплового потоку протягом циклу роботи двигуна Стірлінга. Точність моделі вища, але ізотермічні припущення залишаються ідеальними [50].

Для аналізу Шмідта, робляться наступні припущення[51]:

1. Робоче тіло поводить як ідеальний газ, $PV = mRT$.
2. Рух поршнів є синусоїдальним, тобто об'єм змінюється синусоїдально.
3. Витоку немає, маса газу всередині двигуна постійна.

4. Ідеальний регенератор, тобто все поглинуте тепло віддається робочій рідині.
5. Робочі простори, простір стиснення і розширення є ізотермічними.
6. Двигун працює з постійною частотою обертання.
7. Температура стінки циліндра та поршня залишається незмінною.

Точність даного методу вища, але ізотермічні припущення залишаються ідеальними.

4.1.3 Метод другого порядку

Метод другого порядку (відокремлений підхід) розглядає двигун Стірлінга, як адіабатичну модель, що є більш наближеним до дійсності. Спочатку проводиться спрощений аналіз циклу для оцінки виконаної роботи та отриманої енергії, після чого незалежно від цього аналізу оцінюються втрати, які віднімають від отриманих значень попереднього аналізу. А сама модель розділена на 5 секцій: простір розширення, простір стиснення, нагрівач, охолоджувач і регенератор. Цей підхід забезпечує достатню точність та просте розв'язання, і тому став найпопулярнішим для швидкого проєктування та оптимізаційних досліджень двигуна [52].

Для адіабатичної моделі, робляться наступні припущення [53]:

1. Робоче тіло поводить як ідеальний газ.
2. Витік газу відсутній.
3. Немає перепадів тиску, тобто тиск у робочих просторах є рівномірним.
4. Робочі простори адіабатичні.
5. Температура охолоджувача та нагрівача постійна.
6. Температура робочої рідини регенератора є лінійною.

4.1.4 Метод третього порядку

Метод третього порядку (вузловий аналіз) – це метод, в якому двигун розбивається на велику кількість вузлів та для кожного вузла окремо

розв'язуються диференційні рівняння гідрогазодинаміки (баланс імпульсу, маси, енергії). Розрахунок втрат енергії не розглядаються окремо, як у попередньому методі, а включається у початкові рівняння. Вузловий аналіз має вищу точність та є набагато складніший, ніж модель другого порядку, через чисельні розрахунки. Переважно модель третього порядку використовується для оптимізації конструктивних параметрів [51].

4.1.5 Метод четвертого порядку

Метод четвертого порядку (багатовимірний аналіз) є найсучаснішим та використовує комп'ютерне моделювання двигуна Стірлінга, як гідрогазодинамічної системи (CFD – computer fluid dynamic). Метод надає детальну інформацію про структуру потоку, розподіл температури та тиску всередині двигуна. А також може створювати графічну симуляцію двигуна Стірлінга в реальному часі, що може допомогти в оптимізації конструкції двигуна, шляхом розуміння впливу геометричних або робочих параметрів на нього. Основним обмеженням даної моделі є необхідність у детальному проектуванні і, як наслідок, у об'ємних обчисленнях [54].

4.2 Метод другого порядку в моделюванні двигуна Стірлінга: адіабатичний підхід та його термодинамічні особливості

Підчас вибору методу дослідження двигуна Стірлінга, насамперед потрібно розуміти чи є необхідність у термодинамічних характеристиках, оскільки метод нульового порядку розглядає двигун у вигляді «чорного ящика», формуючи емпіричне співвідношення між вихідними та вхідними параметрами. Отже, враховуючи те, що в методі першого порядку, термодинамічні припущення залишаються ідеальними, оптимальним методом є аналіз другого порядку, оскільки є компромісним рішенням між точністю вихідних параметрів та складністю розрахунків.

На рис. 4.3 зображено блочну модель двигуна Стірлінга другого порядку, в основі якої знаходиться ідеальний адіабатичний процес, який з'єднаний з блоками внутрішнього теплообміну, які враховують відповідні співвідношення для оцінки тепловіддачі та перепаду тиску всередині двигуна. Це дозволяє оцінити температуру робочої рідини всередині теплообмінників. Блоки зовнішнього теплообміну, відповідають за розрахунки теплопередачі від джерела і приймача тепла до зовнішніх стінок нагрівача і охолоджувача відповідно. Сюди входять енергетичні баланси і оцінки температури на зовнішніх стінках теплообмінників нагрівача і охолоджувача. Останній блок оцінює втрати енергії, які включають теплові та механічні втрати, розраховані за допомогою відокремленого підходу.

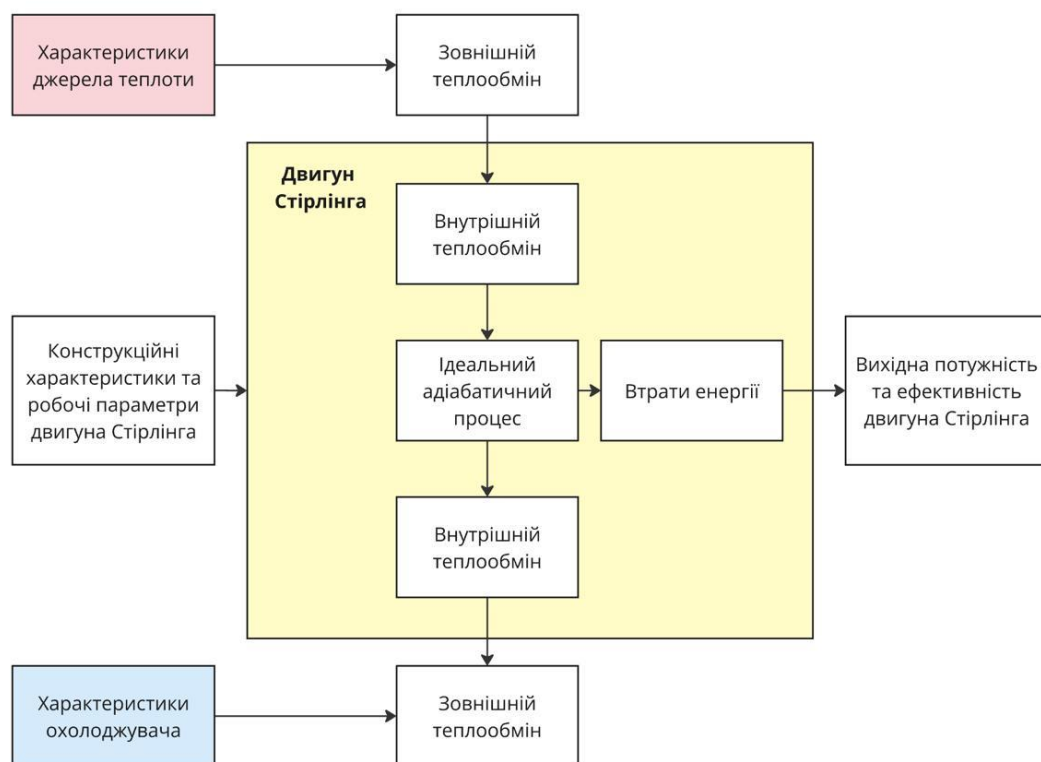


Рисунок 4.3 – Блочна модель двигуна Стірлінга другого порядку

Як було згадано вище, в моделі другого порядку, двигун розділяють на п'ять секцій (об'ємів), а саме:

- Простір стиснення (с - Compression volume);

- Простір охолоджувача (k - Cooler volume);
- Простір регенератора (r - Regenerator volume);
- Простір нагрівача (h - Heater volume);
- Простір розширення (e - Expansion volume).

Робоче тіло (газ) в просторі охолоджувача і нагрівача підтримується в ізотермічному стані при температурах T_k і T_h відповідно. Регенератор, який функціонує як теплова губка, і газ у секції регенератора мають ідентичний лінійний розподіл температури, причому газ, що протікає через межу розділу регенератор/охолоджувач, знаходиться при температурі охолоджувача T_k , а межа розділу регенератор/нагрівач – при температурі нагрівача T_h . Вважається, що робочі простори знаходяться в ідеальному адіабатичному стані, а отже, температури T_c і T_e будуть змінюватися протягом циклу. Розташування секцій та їх температурний розподіл показані на рис. 4.4 та рис. 4.5 відповідно.

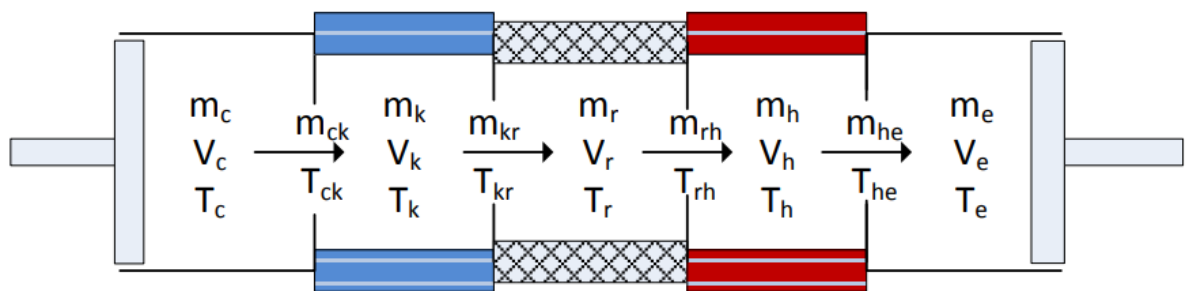


Рисунок 4.4 – Схематичне зображення робочих просторів двигуна Стірлінга для адіабатичної моделі[55]

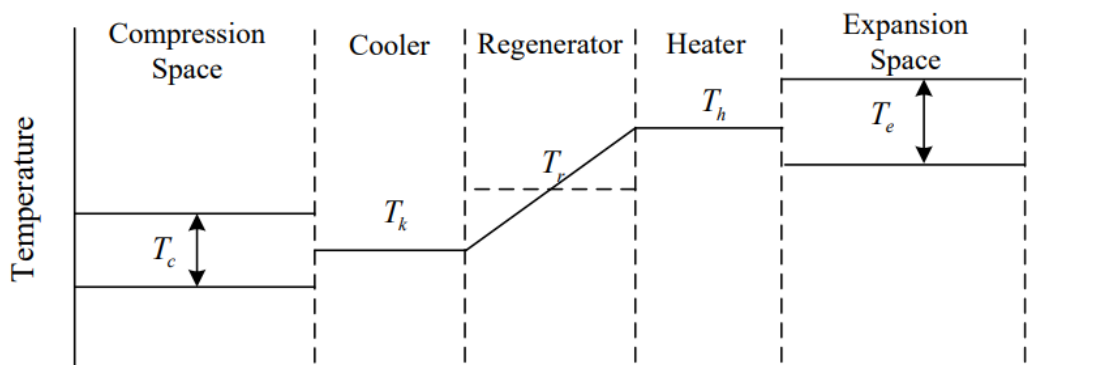


Рисунок 4.5 – Розподіл температури в ідеальній адіабатичній моделі[8]

Для термодинамічного аналізу, кожну секцію розглядають як узагальнений робочий простір, як показано на рис. 4.6. Де m , p , T , V – маса, тиск, температура і об'єм робочого тіла відповідно. Q – це поглинута кількість теплоти, а W – робота, виконана коміркою.

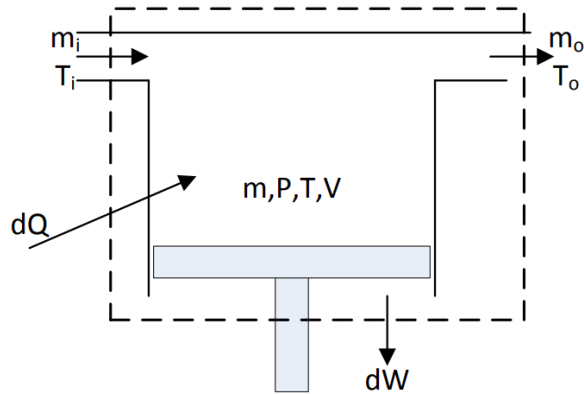


Рисунок 4.6 – Узагальнений робочий простір[48]

4.3 Моделювання в Simulink роботи двигуна Стірлінга в умовах нестабільного сонячного нагріву з використанням додаткового джерела теплоти

Розробка імітаційної моделі двигуна Стірлінга з генератором постійного струму в умовах нестабільного сонячного нагріву із застосуванням додаткового джерела теплоти (електронагрівача) має на меті створення інструменту для дослідження вихідних параметрів згенерованої електричної енергії та оцінки ефективності технічних рішень, спрямованих на стабілізацію роботи двигуна Стірлінга за змінних умов нагріву.

Окремим завданням моделі є визначення залежностей між вихідними параметрами електричного генератора при зниженні рівня сонячної інсоляції протягом різних проміжків часу – як у випадку роботи без додаткового джерела теплоти, так і з його використанням.

4.3.1 Структура та принцип роботи імітаційної моделі двигуна Стірлінга в середовищі Simulink

Для аналізу робочих процесів і оцінювання ефективності роботи двигуна Стірлінга була розроблена імітаційна модель у середовищі Simulink, що реалізує підхід до фізичного моделювання на основі енергетичних взаємозв'язків між компонентами. Побудова моделі здійснена за основі демонстраційного прикладу Gamma Stirling Engine, представленим у офіційній документації MATLAB/Simscapе [56]. Структура моделі відтворює основні фізичні процеси, що відбуваються у реальному двигуні, зокрема теплообмін між нагрівальною та охолоджувальною зонами, переміщення робочого газу через регенератор, зміну об'єму в робочих камерах та перетворення теплової енергії у механічну роботу.

Модель має модульну побудову і складається з низки взаємопов'язаних підсистем, що відповідають окремим фізичним процесам. Такий підхід забезпечує можливість ізольованого аналізу окремих підпроцесів і спрощує подальше масштабування чи модифікацію моделі. Кожна підсистема створена за допомогою стандартних компонентів бібліотек Simscapе Foundation, Simscapе Fluids, Simscapе Electrical та інші, що гарантує коректне відтворення термодинамічних, теплових, електричних і механічних взаємодій.

На верхньому рівні схеми (рис. 4.7) розташовано основні структурні блоки: Torque Impulse, Slider-Crank, Flywheel and DC Machine, Power Piston, Passage Pipe, Ambient, Displacer Piston, Regenerator та Heat Source, а також два допоміжні конфігураційні елементи: Solver Configuration і Gas Properties, що задають параметри чисельного розв'язування та властивості робочого газу. Усі підсистеми з'єднані між собою тепловими, механічними та газодинамічними портами, що забезпечує коректний енергетичний баланс системи.

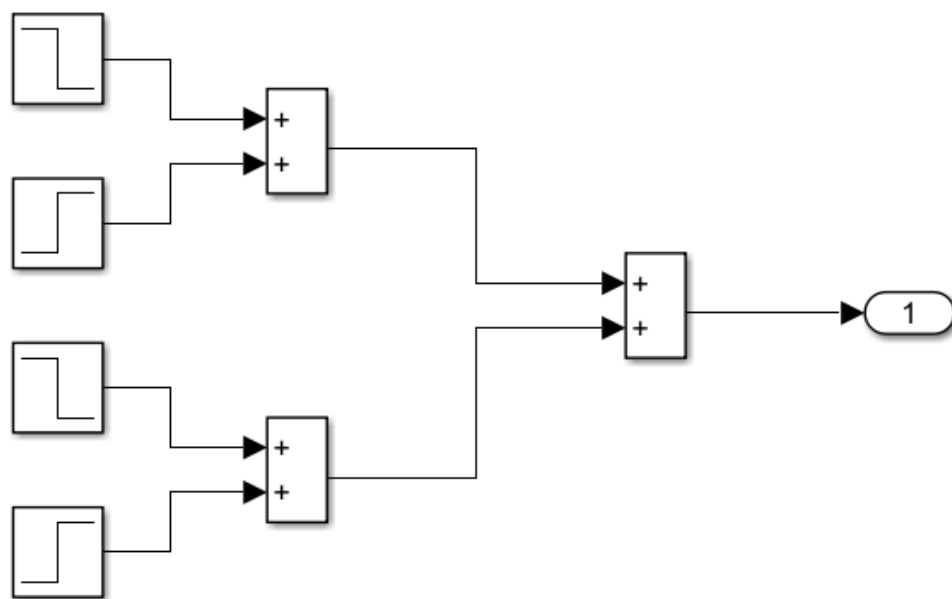


Рисунок 4.8 – Блок початкового імпульсу моменту (Torque Impulse)

Механічна та електрична частина моделі реалізована блоком Slider-Crank, Flywheel and DC Machine (рис. 4.9).

Підсистема Slider-Crank моделює кривошипно-шатунний механізм, який перетворює поступальний рух поршнів на обертальний рух вала. У моделі враховано довжину шатунів, радіус кривошипів та фазовий зсув у 90° між рухом робочого поршня і поршня витіснювача, що забезпечує циклічне проходження фаз нагріву, розширення, охолодження та стискання.

Блок Flywheel and DC Machine відтворює роботу маховика з приєднаною електричною машиною постійного струму. Маховик акумулює кінетичну енергію, згладжує коливання крутного моменту і стабілізує швидкість обертання системи. Модель DC-машини дозволяє дослідити перетворення механічної енергії в електричну, що є характерним для генераторних режимів роботи двигуна Стірлінга.

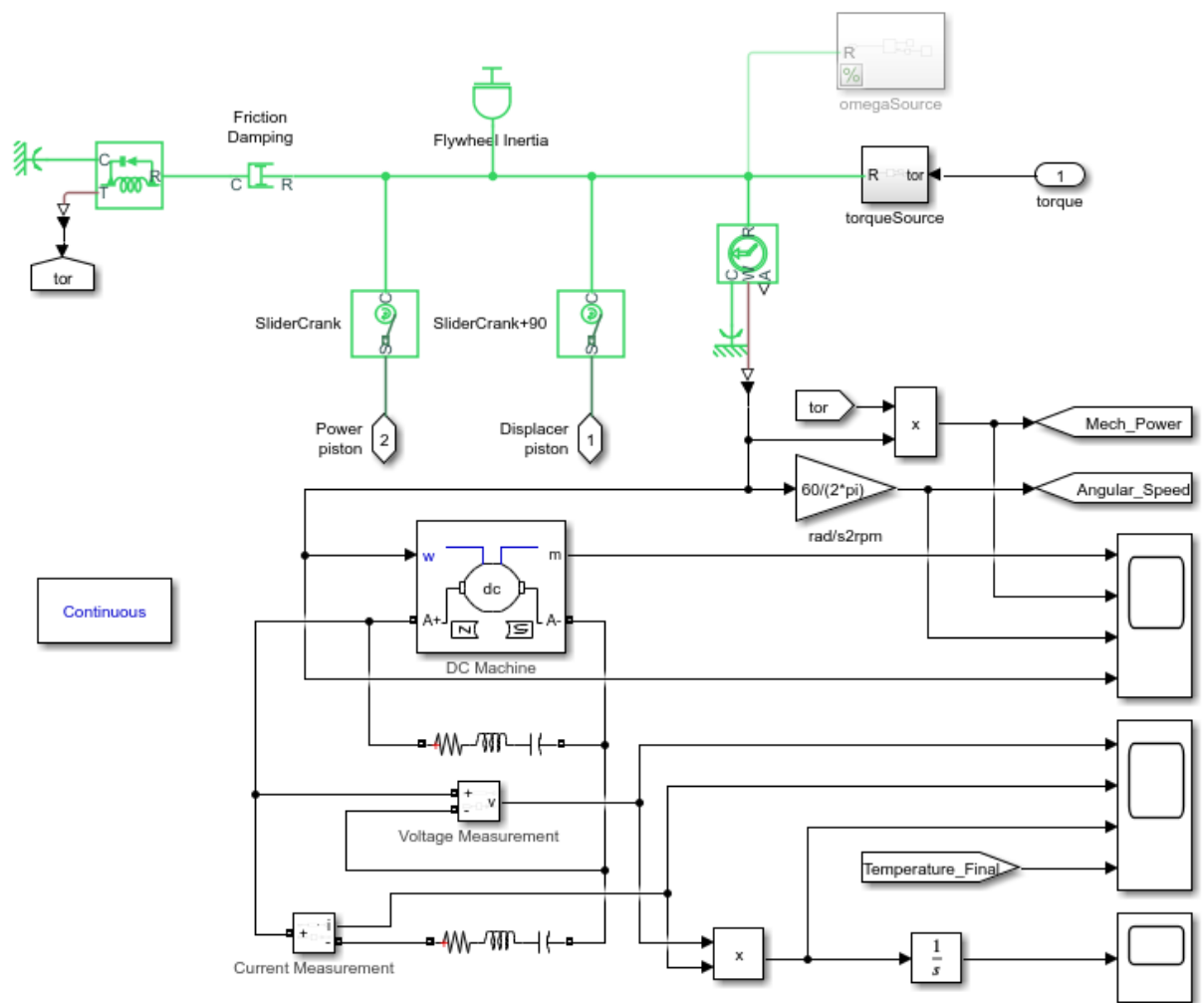


Рисунок 4.9 – Модель кривошипно-шатунного механізму (Slider-Crank), маховика (Flywheel) та генератора постійного струму (DC Machine)

Газодинамічна частина моделі подана блоками Power Piston (робочий поршень), Displacer Piston (поршень-витіснювач), Passage Pipe (з'єднувальний канал) та Regenerator (регенератор).

Блок Power Piston (рис. 4.10) описує роботу основного поршня, який безпосередньо перетворює зміну тиску газу в механічну роботу. Його положення визначає об'єм робочого циліндра і, відповідно, зміну тиску в ньому.



Рисунок 4.11 – Модель поршня-витіснювача (Displacer Piston)

94

впливає на фазові зсуви тиску і втрати енергії, що є суттєвими для точного відтворення динаміки процесів.

У блоці Regenerator (рис. 4.12) реалізовано модель теплообмінника-регенератора, який акумулює частину теплоти при проходженні гарячого газу і віддає її при зворотному русі. Наявність регенератора значно підвищує ефективність циклу Стірлінга та зменшує втрати теплоти між фазами.

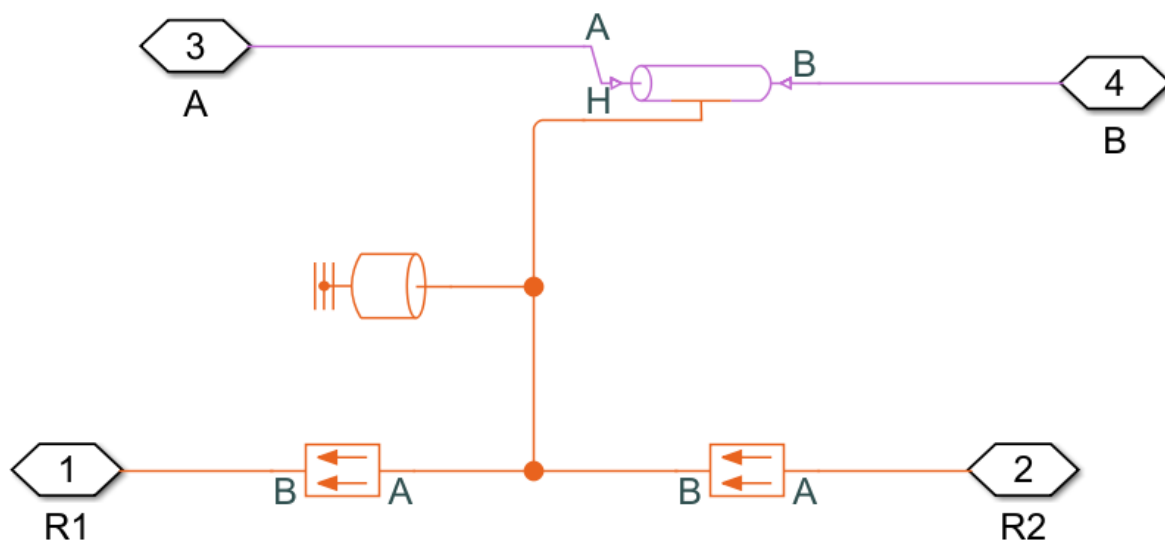


Рисунок 4.12 – Модель регенератора (Regenerator)

Теплова частина моделі включає блоки Heat Source (рис. 4.13) та Ambient (рис. 4.14). Блок Heat Source задає температуру гарячої зони двигуна, моделюючи подачу теплоти від зовнішнього джерела – наприклад, сонячного концентратора чи електронагрівача. Через цей блок відбувається підведення енергії до робочого газу, що забезпечує фазу розширення. Натомість блок Ambient моделює охолоджувальне середовище холодної камери, підтримуючи постійну температуру тепловідведення. Завдяки цьому створюється необхідний тепловий перепад, який визначає термодинамічну ефективність двигуна.

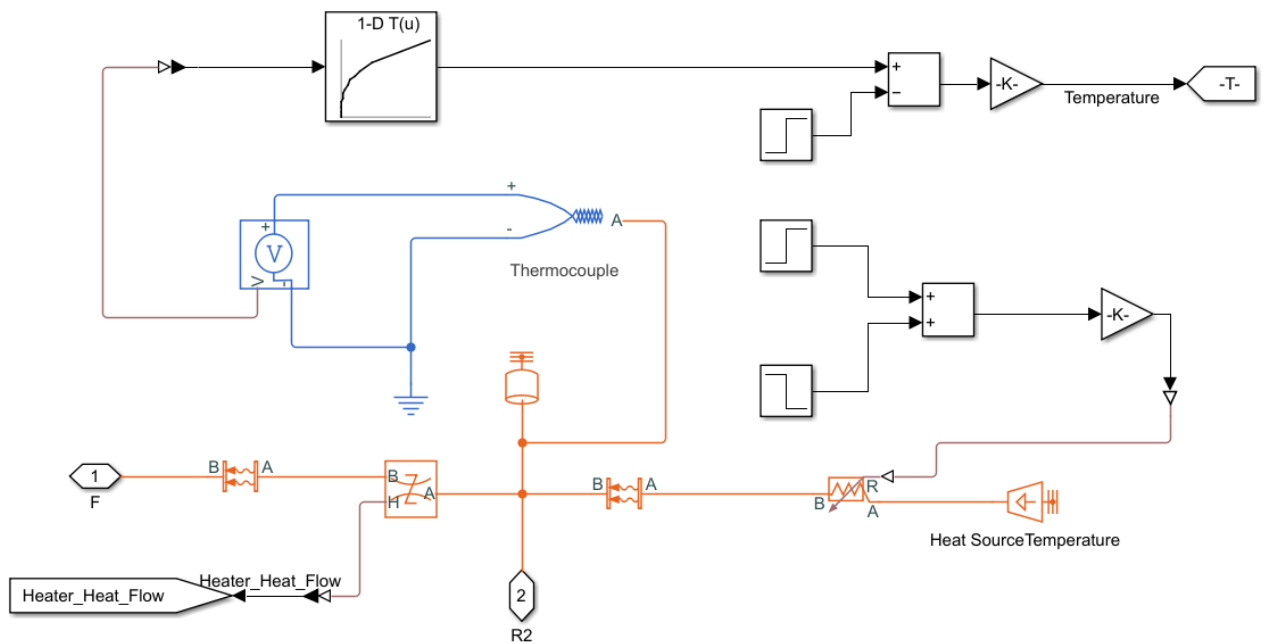


Рисунок 4.13 – Модель джерела теплоти (Heat Source)

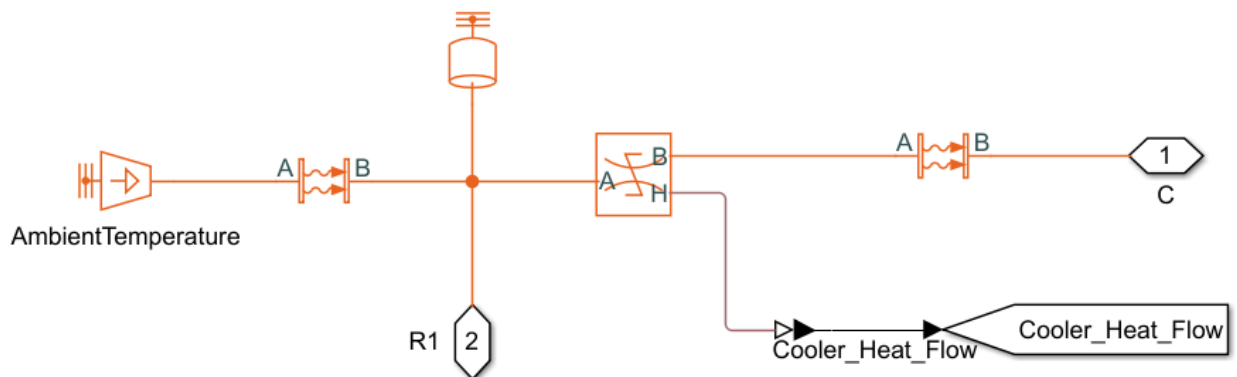


Рисунок 4.14 – Модель охолоджувального середовища (Ambient)

Допоміжні конфігураційні елементи Solver Configuration та Gas Properties виконують налаштувальні функції. Перший визначає чисельний метод інтеграції, крок дискретизації та критерії стабільності, що є важливими для адекватного відтворення нелінійних процесів. Другий описує властивості робочого газу, яким у моделі є повітря, прийняте як ідеальний газ. Тут задаються параметри, такі як молекулярна маса, газова стала, теплоємність і коефіцієнт теплопровідності, необхідні для розрахунку термодинамічних процесів.

Параметризація моделі двигуна Стірлінга здійснюється через скрипт GammaStirlingEngineParams.m (див. Додаток Б), який формує структури для основних підсистем – геометричної, теплової, газодинамічної та механічної частин. У ньому задаються розміри поршнів і каналів, характеристики маховика, температури джерел теплоти й охолодження, часовий проміжок зміни температурних параметрів джерела теплоти, а також властивості регенератора та робочого газу. Така централізована система керування параметрами забезпечує узгодженість між підсхемами, спрощує зміну умов моделювання й дозволяє проводити параметричні дослідження впливу окремих характеристик на роботу двигуна Стірлінга.

У результаті побудови такої структури забезпечується повне відтворення робочого циклу двигуна Стірлінга – від початкового пуску до стабільного режиму обертання вала. Модель дає змогу аналізувати динаміку зміни тиску, температури, об'єму, швидкості обертання та вихідних електричних параметрів генератора постійного струму приєднаного до валу двигуна Стірлінга.

4.3.2 Результати моделювання впливу зміни температури джерела теплоти на вихідні параметри двигуна Стірлінга

Для дослідження динамічних характеристик запропонованої моделі двигуна Стірлінга в умовах, близьких до реальної експлуатації від сонячного концентратора, було проведено серію імітаційних експериментів. Ключовим фактором, що досліджувався, була зміна температури джерела теплоти, яка імітувала реальні умови роботи сонячної енергетичної установки, зокрема вплив хмарності, що призводить до різкого падіння прямої інсоляції. Метою моделювання була комплексна оцінка впливу цього фактора на вихідні електричні параметри генератора постійного струму, приєднаного до валу двигуна, та вироблену енергію, а також перевірка ефективності використання ДДЕ у вигляді електронагрівача (30 Вт) для стабілізації роботи.

Усі моделювання проводилися для системи з номінальною напругою на генераторі 5 В та навантаженням 1 кОм. В якості робочого тіла

використовувалось повітря. Основними вихідними параметрами, що реєструвались, були: напруга (В), струм (А), електрична потужність (Вт) на навантаженні, температура гарячої зони ($^{\circ}\text{C}$), а також інтегрована за часом кількість виробленої електричної енергії (Дж).

Сценарії моделювання охоплювали наступні ключові ситуації:

1. **Запуск двигуна:** Моделювався процес початкового прогрівання системи з подальшим запуском і виходом на режим, що дозволило оцінити динаміку пускових процесів.

2. **Робота при змінній інсоляції без ДДЕ та з ДДЕ:** Досліджувалась поведінка системи при різкому зниженні сонячної інсоляції (імітація хмарності) протягом 20, 40 та 60 секунд. Для кожного часового інтервалу аналізувались два випадки:

- Робота без додаткового джерела енергії, що призводило до зупинки двигуна та його автоматичного повторного запуску за допомогою імпульсного блоку при відновленні температури джерела до 400°C .
- Робота з увімкненим ДДЕ в момент падіння інсоляції, що дозволяло компенсувати втрату теплоти та підтримувати робочий цикл.

На рис. 4.15 та 4.16 (де останній деталізує момент запуску) наведені часові залежності вихідних параметрів генератора постійного струму та температури теплообмінника двигуна Стірлінга на початковому етапі моделювання. Аналіз графіків виявляє характерний перехідний процес: температура гарячої частини двигуна зростає, досягаючи 400°C на 90-й секунді. Стабілізація температури (критерій – зміна менше ніж на $0,1^{\circ}\text{C}$ за 1 с) відбувається на 215-й секунді, тоді як максимальна стабільна температура 418°C досягається на 250-й секунді. Імпульсний момент, що ініціює обертання, подається на 300-й секунді, що призводить до різкого зростання вихідних електричних параметрів генератора та незначного зниження температури теплообмінника. Це зниження обумовлене перерозподілом теплової енергії внаслідок інтенсифікації робочого процесу. У

момент запуску зростає швидкість теплопередачі від гарячого теплообмінника до робочого тіла, яке починає активно здійснювати термодинамічні цикли. Це призводить до незначне зменшення температури теплообмінника через підвищене відведення теплоти до робочого газу.

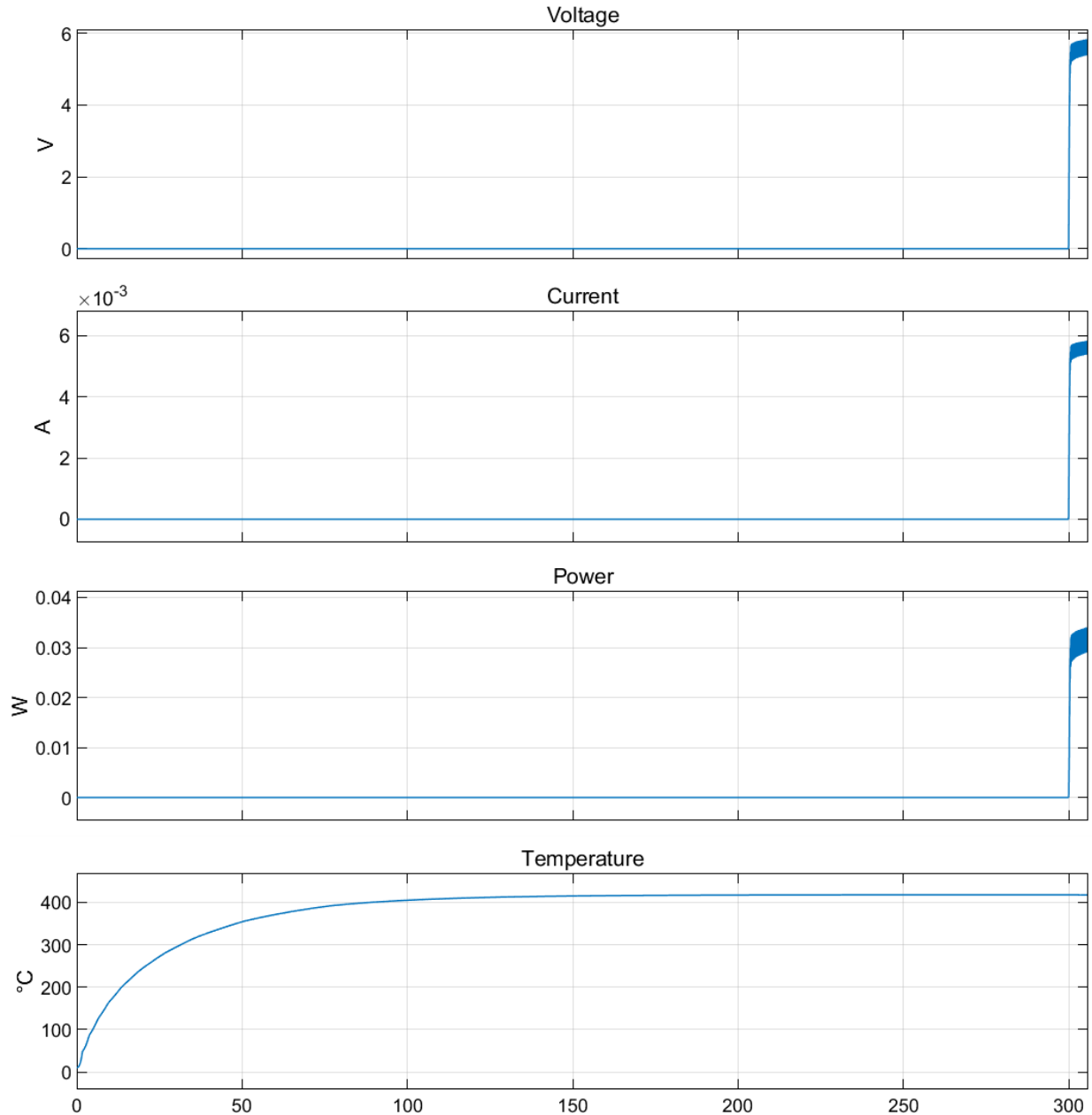


Рисунок 4.15 – Часові залежності напруги, струму, потужності електрогенератора та температури котла двигуна Стірлінга під час початкового етапу моделювання (розгін системи та моменту запуску)

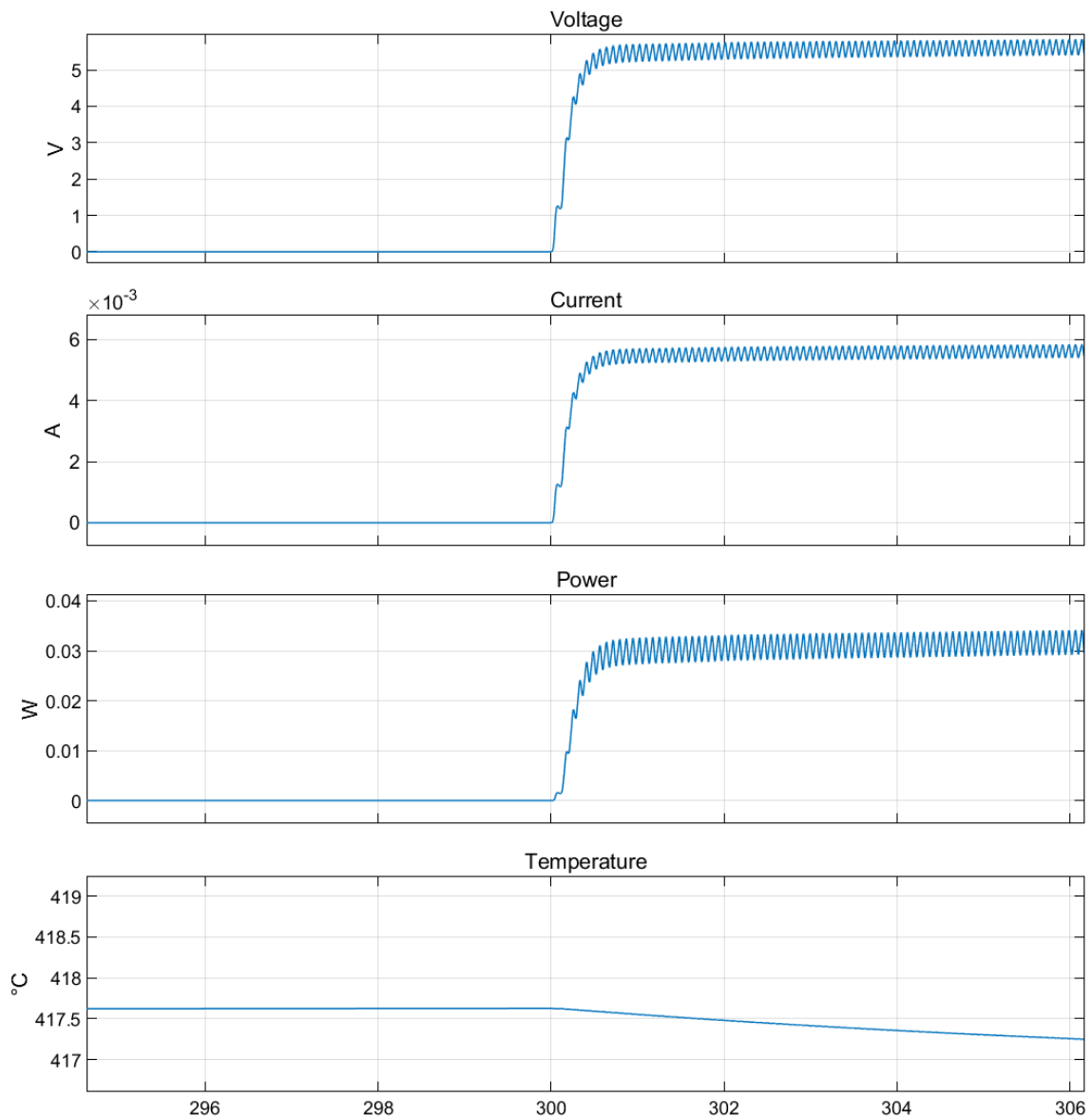


Рисунок 4.16 – Часові залежності напруги, струму, потужності електрогенератора та температури котла двигуна Стірлінга під час початкового етапу моделювання (моменту запуску)

Аналіз рис. 4.16 свідчить про те, що перехідний процес та стабілізація електричних параметрів генератора характеризуються тривалістю менше 0,5 с. У стаціонарному режимі спостерігаються такі значення: напруга 5,5 В ($\pm 0,2$ В), струм 5,5 мА ($\pm 0,2$ мА) та потужність 30 мВт ($\pm 2,2$ мВт). Дані щодо виробленої енергії, представлені на рис. 4.17, після моменту запуску мають характер лінійної залежності, що є свідченням успішного запуску системи та переходу до її штатного функціонування.

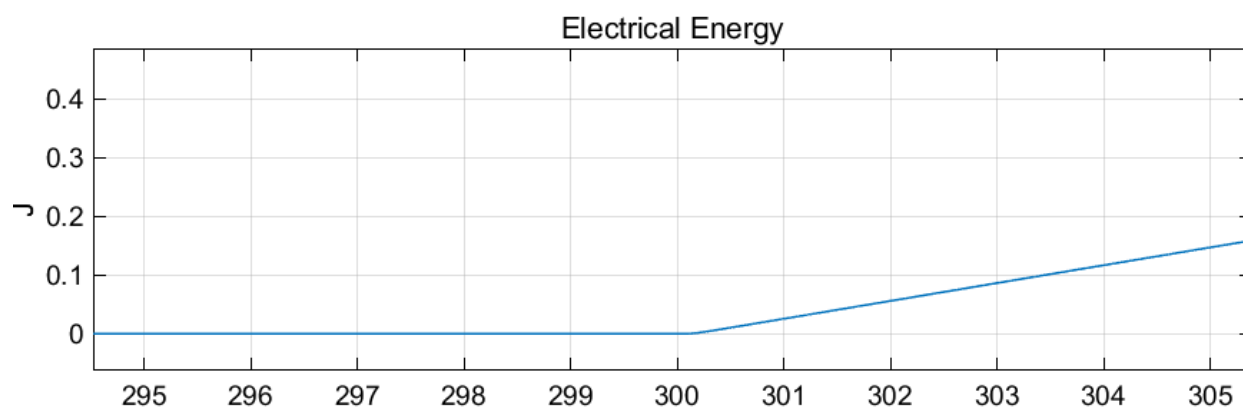


Рисунок 4.17 – Залежність виробленої енергії від часу у момент запуску двигуна Стірлінга

Наступним етапом дослідження став аналіз динаміки системи у відповідь на критичне зовнішнє збурення – раптове зниження теплового потоку, що моделювало вплив щільної хмарності. Для цього було досліджено перехідні процеси, що виникають при короткочасному (20 с) падінні температури джерела теплоти. Основним об'єктом аналізу в даному випадку виступила швидкість зниження вихідних електричних параметрів та здатність системи до відновлення робочого режиму після відновлення підведення теплоти.

Експериментальний сценарій передбачав наступну послідовність дій: після виходу системи на стаціонарний режим роботи (після 300-ї секунди), на 305-й секунді імітувалося різке зниження інсоляції, що призводило до падіння температури гарячої зони двигуна. Тривалість цієї події становила 20 секунд, після чого температурні умови повністю відновлювалися. Моделювання проводилося для двох конфігурацій: базової (без використання ДДЕ) та зі застосуванням додаткового джерела енергії, яке вмикалося одночасно з початком "затемнення".

На рис. 4.18 та 4.19 наведено результати моделювання 20-секундного переривання інсоляції, які ілюструють динаміку вихідних електричних параметрів і температури теплообмінника для системи без ДДЕ та з компенсацією теплових втрат за рахунок ДДЕ відповідно.

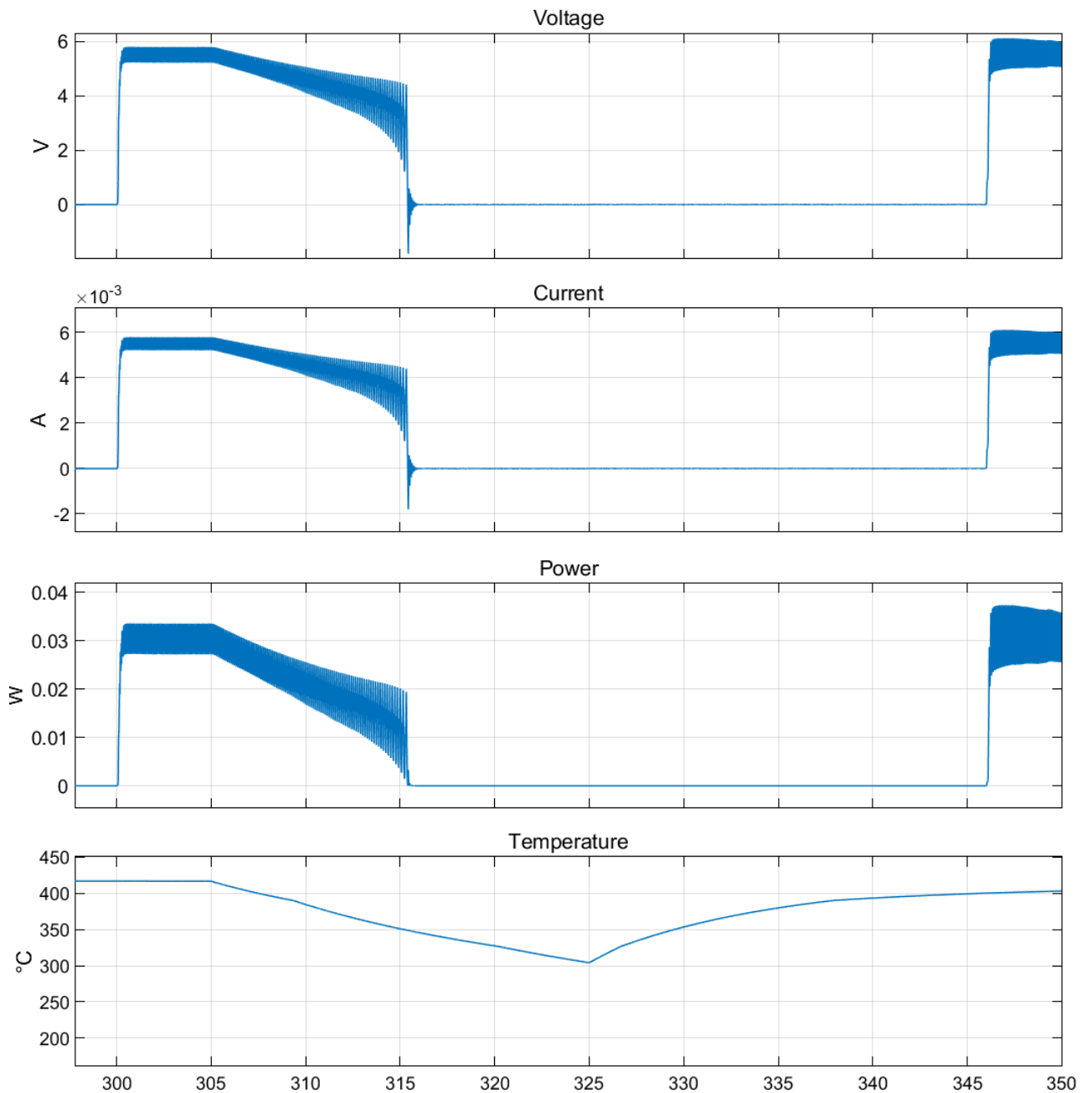


Рисунок 4.18 – Часові залежності напруги, струму, потужності електрогенератора та температури котла двигуна Стірлінга під час відсутності надходження інсоляції протягом 20 с без ДДЕ

Аналіз рис. 4.18 свідчить про те, що зупинка двигуна Стірлінга відбулася на 316-й секунді при температурі гарячої зони 349°C , тоді як мінімальна температура становила 304°C на 325-й секунді. Під час поступового зниження температури системи, що передувало її зупинці, спостерігається пропорційне зменшення електричних параметрів генератора – напруги, струму та потужності

– внаслідок зниження кутової швидкості обертання валу двигуна. Водночас амплітуда коливань електричних сигналів збільшується через нестабільність теплового режиму та порушення фазової синхронізації між переміщенням поршня і процесами теплопередачі. Це явище зумовлене нерівномірністю розподілу температури в робочих камерах, що призводить до коливань тиску робочого тіла та короточасних змін навантаження на валу генератора. У міру подальшого охолодження система втрачає здатність підтримувати замкнутий термодинамічний цикл, унаслідок чого кінетична енергія поршня швидко зменшується, а робочий процес припиняється.

Повторний запуск відбувався на 346-й секундi, коли температура гарячої частини двигуна досягла 400°C , тобто простій двигуна був протягом 30 с. На початковій стадії цього процесу спостерігається зростання амплітуди коливань вихідних електричних параметрів, що пов'язано з різким відновленням теплового потоку та інтенсифікацією циклів розширення й стискання робочого тіла. Ці коливання мають перехідний характер і свідчать про відновлення термодинамічної рівноваги в системі, коли поршень поступово виходить на стабільний режим руху, а генератор – на номінальні робочі параметри. Після завершення цього процесу встановлюється усталений режим роботи, у якому температура гарячої частини підтримується на рівні, достатньому для забезпечення сталого циклу теплопередачі, а електричні параметри генератора стабілізуються, демонструючи незначні коливання, характерні для рівноважного стану системи.

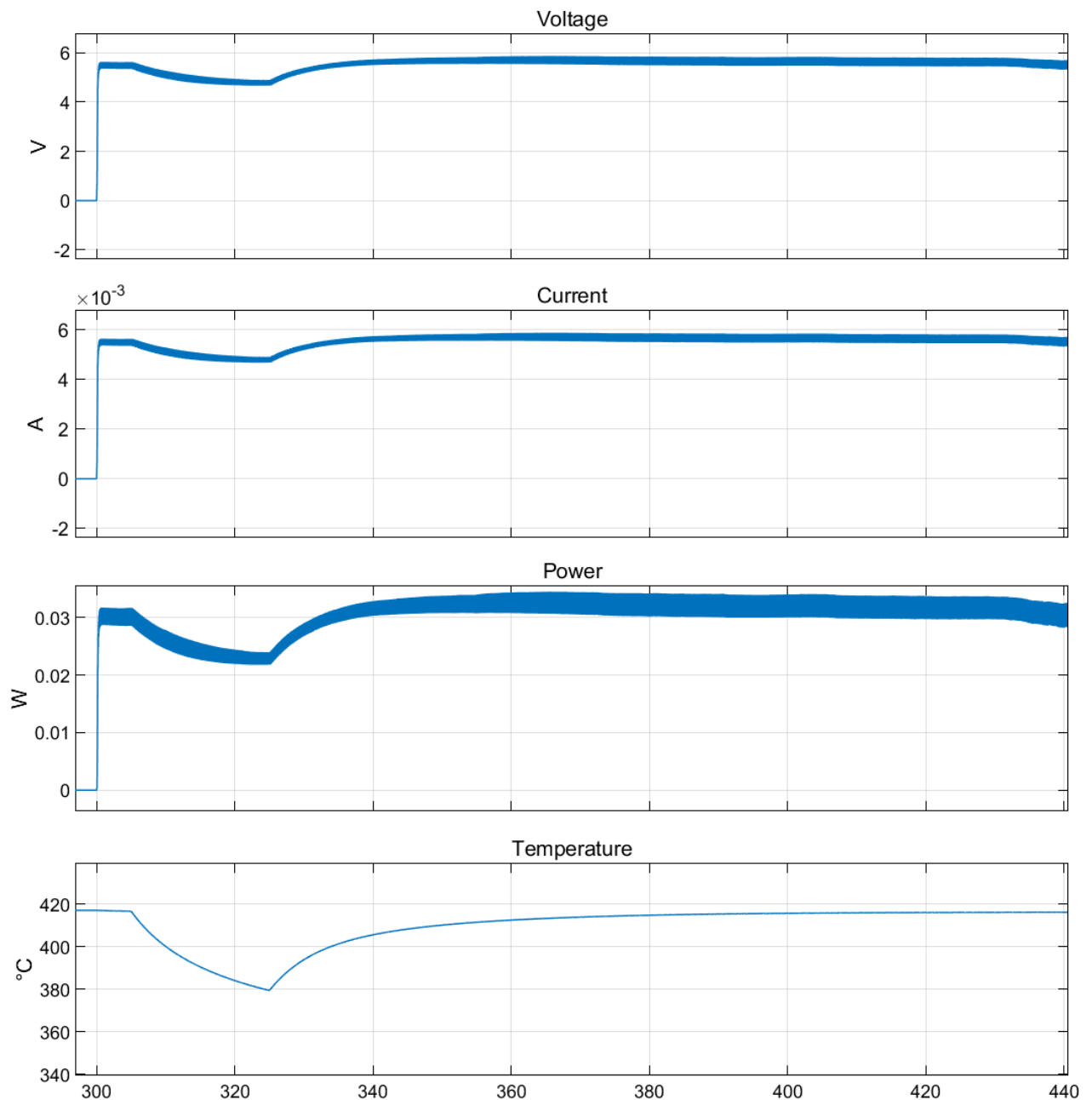


Рисунок 4.19 – Часові залежності напруги, струму, потужності електрогенератора та температури котла двигуна Стірлінга під час відсутності надходження інсоляції протягом 20 с з ДДЕ

Аналіз залежностей, наведених на рис. 4.19, свідчить, що застосування додаткового джерела енергії забезпечує підвищену термостійкість та безперервність функціонування двигуна Стірлінга під час 20-секундного переривання інсоляції. Температура гарячої частини знизилася до 379°C на 325-й секунді, при цьому потужність генератора впала до 0.023 Вт, що свідчить про

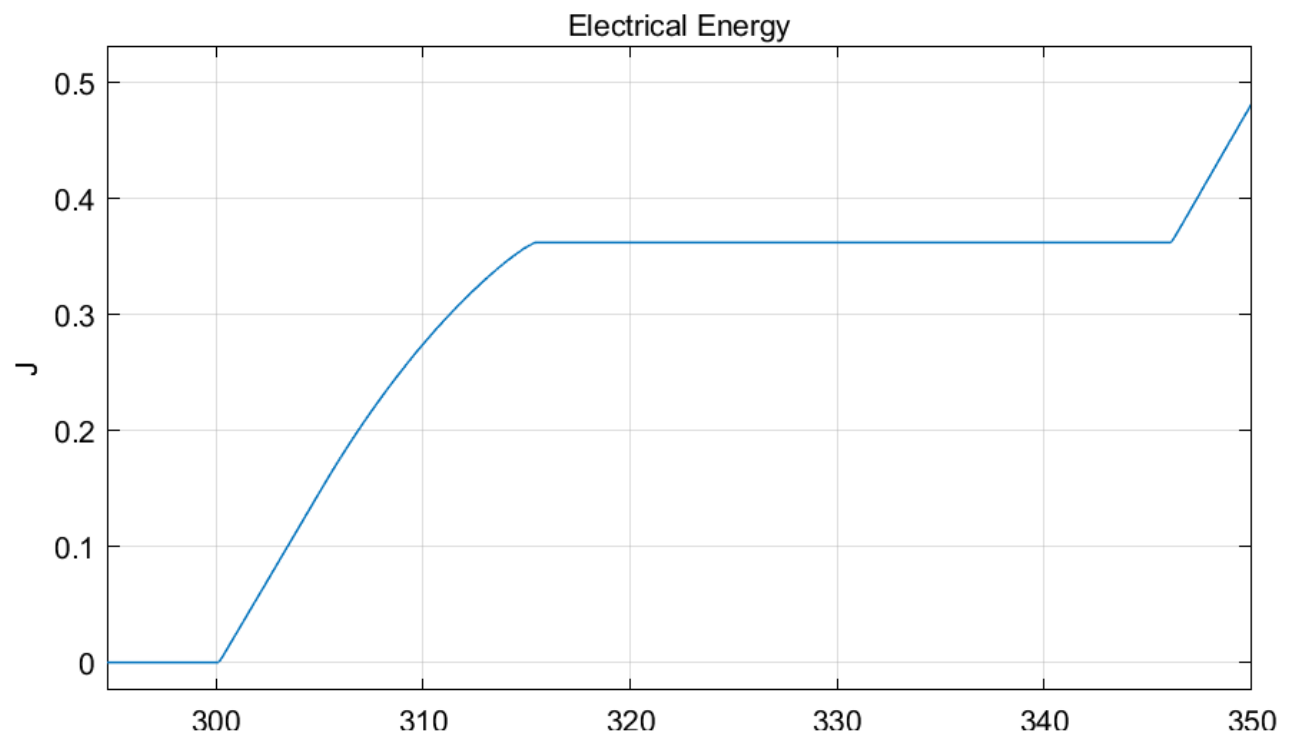
зменшення середньої температури робочого тіла та зниження тиску в циклі. Однак завдяки підведенню енергії від ДДЕ зберігалася позитивна різниця температур між гарячою та холодною зонами, достатня для підтримання робочого стану та перетворення енергії.

Після відновлення теплового потоку на 325-й секунді спостерігається відновлення вихідних параметрів. Вже на 334-й секунді потужність досягає рівня усталеного режиму (0.03 Вт) при температурі 396°C. Подальше зростання потужності до 0.032 Вт на 350-й секунді при температурі 410°C пояснюється тепловою інерцією матеріалів теплообмінника та короткочасним перевищенням теплового потоку над рівнем, необхідним для стабільної роботи. До 440-ї секунди система повністю стабілізується, виходячи на колишні стаціонарні параметри (потужність 0.03 Вт при температурі 416°C), що підтверджує ефективність використання додаткового нагрівача для підтримки безперервності робочого циклу.

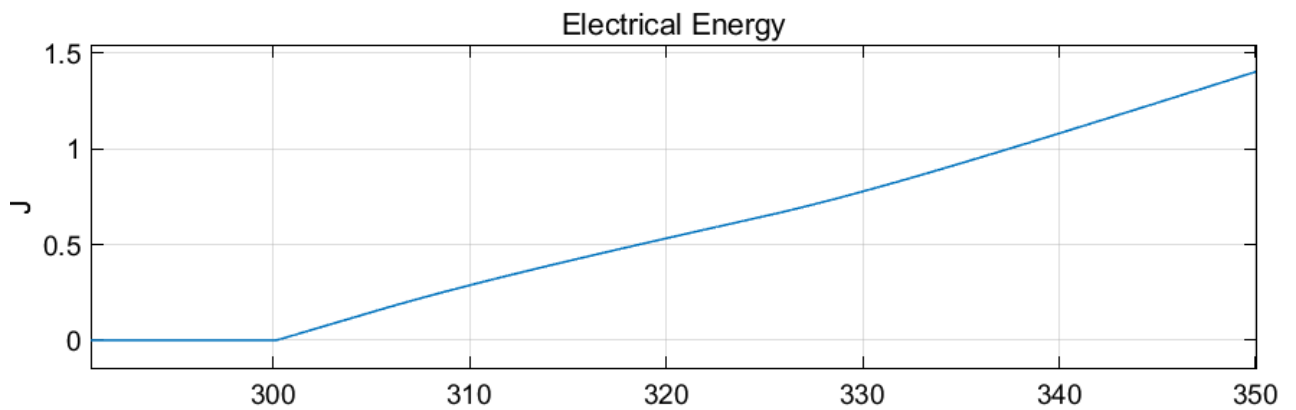
Для комплексної оцінки впливу додаткового джерела енергії на загальну енергоефективність системи було проаналізовано кількість виробленої генератором електричної енергії за період моделювання тривалістю 350 с. На рис. 4.20 наведено графічне порівняння енергії, виробленої системою без використання ДДЕ (рис. 4.20, а) та з його застосуванням (рис. 4.20, б). У першому випадку сумарна кількість отриманої енергії становить 0.481 Дж, причому характер кривої має S-подібний вигляд із горизонтальною ділянкою у проміжку між 316-ю та 346-ю секундами, що відповідає періоду повної зупинки двигуна Стірлінга. Відсутність зростання енергії в цей інтервал часу підтверджує припинення генерації електроенергії через втрату робочого циклу.

Натомість у системі з ДДЕ (рис. 4.20, б) крива зростання енергії має практично лінійний характер протягом усього часу моделювання, що свідчить про безперервну роботу двигуна навіть під час короткочасного падіння інсоляції. Сумарна кількість виробленої енергії в цьому випадку становить 1.404 Дж, тобто у 2.9 рази перевищує показник базової конфігурації. Незначне сповільнення наростання енергії в період дії збурення практично не впливає на загальний

вигляд кривої, що підтверджує стабільність енергетичного балансу системи при використанні ДДЕ.



а)



б)

Рисунок 4.20 – Часові залежності виробленої електричної енергії системами з ДДЕ (а) та без ДДЕ (б) за умов 20-секундного переривання інсоляції

Наступним етапом дослідження стало моделювання поведінки системи в умовах більш тривалого зниження інсоляції: 40-секундного та 60-секундного періоду. На рис. 4.21 та 4.22 представлено часові залежності основних

параметрів системи під час 40-секундного переривання інсоляції для випадків без ДДЕ та з ДДЕ відповідно.

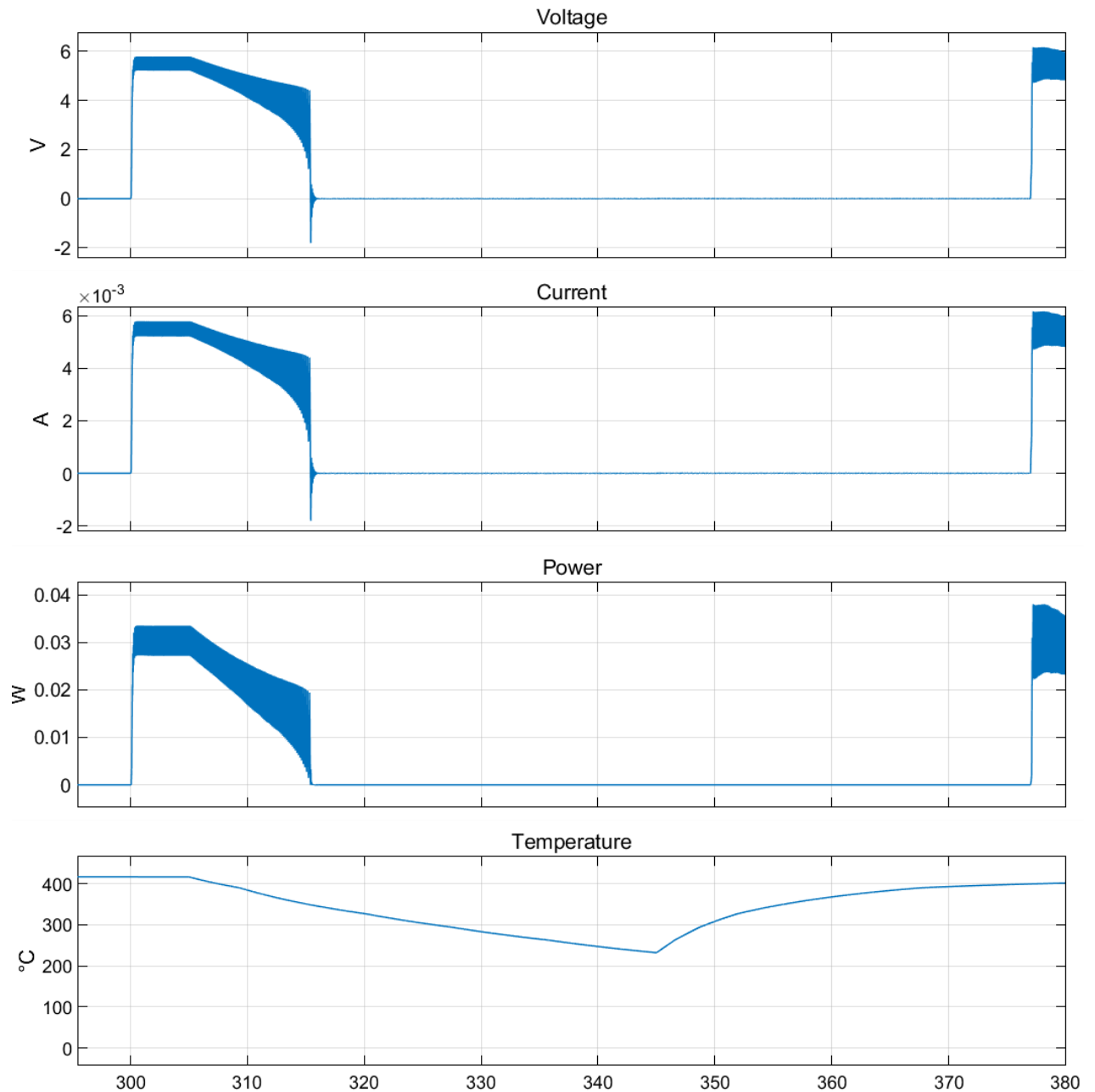


Рисунок 4.21 – Часові залежності напруги, струму, потужності електрогенератора та температури котла двигуна Стірлінга під час відсутності надходження інсоляції протягом 40 с без ДДЕ

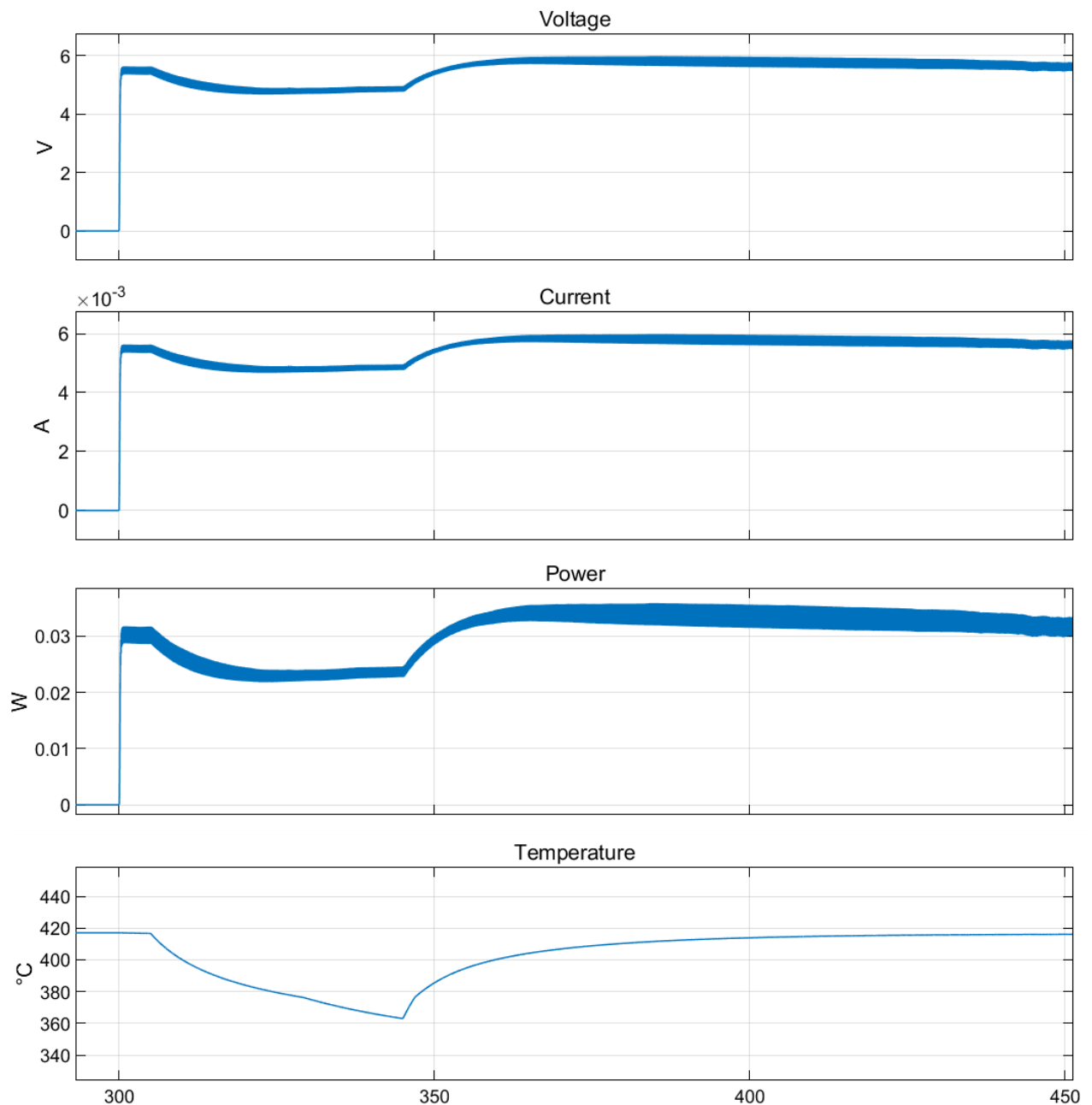


Рисунок 4.22 – Часові залежності напруги, струму, потужності електрогенератора та температури котла двигуна Стірлінга під час відсутності надходження інсоляції протягом 40 с з ДДЕ

Аналіз рис. 4.21 підтверджує, що 40-секундне падіння температури джерела призводить до глибшого охолодження системи порівняно з 20-секундним сценарієм. Мінімальна температура, досягнута на 345-й секунді, становила 232°C. Більш тривалий період охолодження призвів до повнішої втрати теплової енергії системою, що, у свою чергу, значно подовжило процес

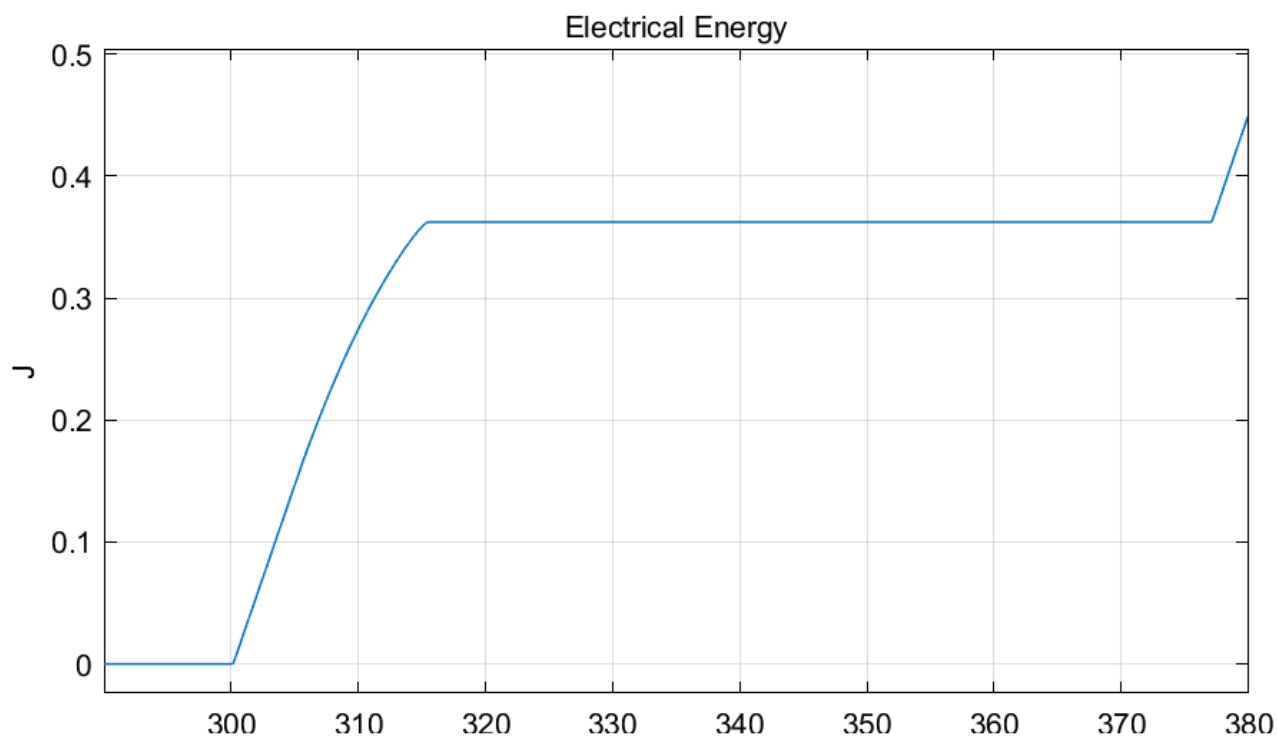
відновлення. Повторний запуск двигуна за допомогою імпульсного блоку відбувся лише на 377-й секунді, коли температура гарячої частини знову досягла порогового значення 400°C . Таким чином, загальний час простою системи склав 61 секунду (з 316-ї по 377-у секунду), що істотно вплинуло на сумарну вироблену енергію.

На противагу цьому, система з увімкненим ДДЕ (рис. 4.22) продемонструвала здатність підтримувати робочий цикл протягом усього 40-секундного періоду зниження інсоляції. У цей проміжок часу теплота надходить виключно від електронагрівача, що дозволяє компенсувати втрату енергії від сонячного концентратора. Температура гарячої зони при цьому поступово знижується до мінімального значення 363°C на 345-й секунді, що на 131°C вище, ніж у випадку без ДДЕ. Попри зменшення температури, робочий цикл двигуна не переривається: електрична потужність генератора досягає мінімуму 0,023 Вт на 325-й секунді, після чого відновлюється до 0,024 Вт на 345-й секунді. Це короткочасне зниження потужності пояснюється інерційністю системи, яка визначає час, необхідний для переходу до нового стаціонарного режиму з нижчою, але стабільною температурою та потужністю, забезпеченими електронагрівачем.

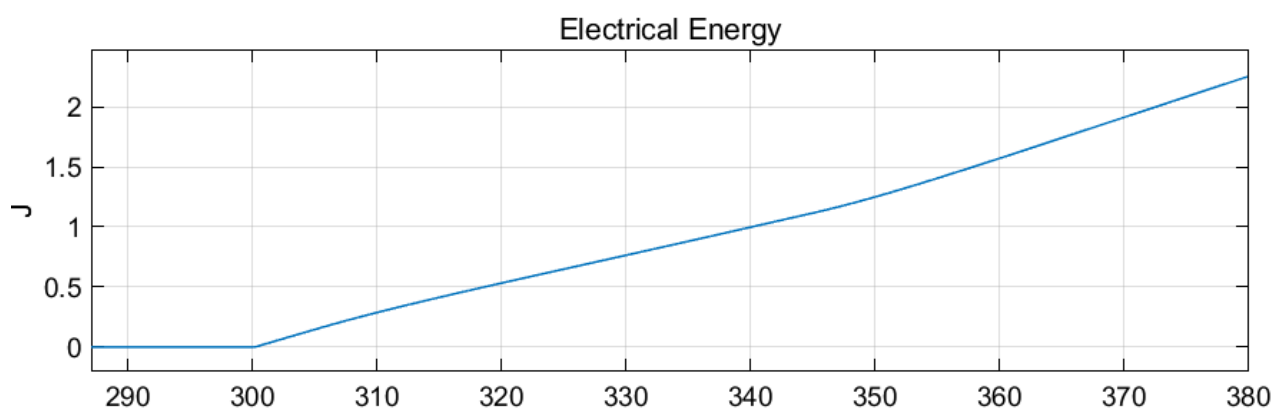
Після відновлення інсоляції на 345-й секунді спостерігається зростання температури. До 353-ї секунди потужність досягає значення, характерного для стаціонарного режиму (0,03 Вт), при температурі 365°C . Максимального значення потужність сягає на 365-й секунді, складаючи 0,034 Вт при температурі 404°C . Стабілізація системи відбувається на 450-й секунді із встановленням потужності на рівні 0,03 Вт та температури 416°C .

На рис. 4.23 наведено порівняльну графічну характеристику енергії, що виробляється системою без використання ДДЕ (рис. 4.23, а) та з його застосуванням (рис. 4.23, б), для 40-секундного інтервалу відсутності інсоляції в межах загального періоду моделювання тривалістю 380 с. Характер кривих демонструє схожість з динамікою, зафіксованою для 20-секундного інтервалу. Кількісний аналіз показує, що вироблена енергія для системи без ДДЕ становить

0,451 Дж, тоді як для системи з ДДЕ цей показник досягає 2,225 Дж. Таким чином, застосування ДДЕ забезпечує збільшення виходу енергії в 4,9 раза.



а)



б)

Рисунок 4.23 – Часові залежності виробленої електричної енергії системами з ДДЕ (а) та без ДДЕ (б) за умов 40-секундного переривання інсоляції

На рис. 4.24 та 4.25 представлено часові залежності основних параметрів системи під час 60-секундного переривання інсоляції для випадків без ДДЕ та з ДДЕ відповідно.

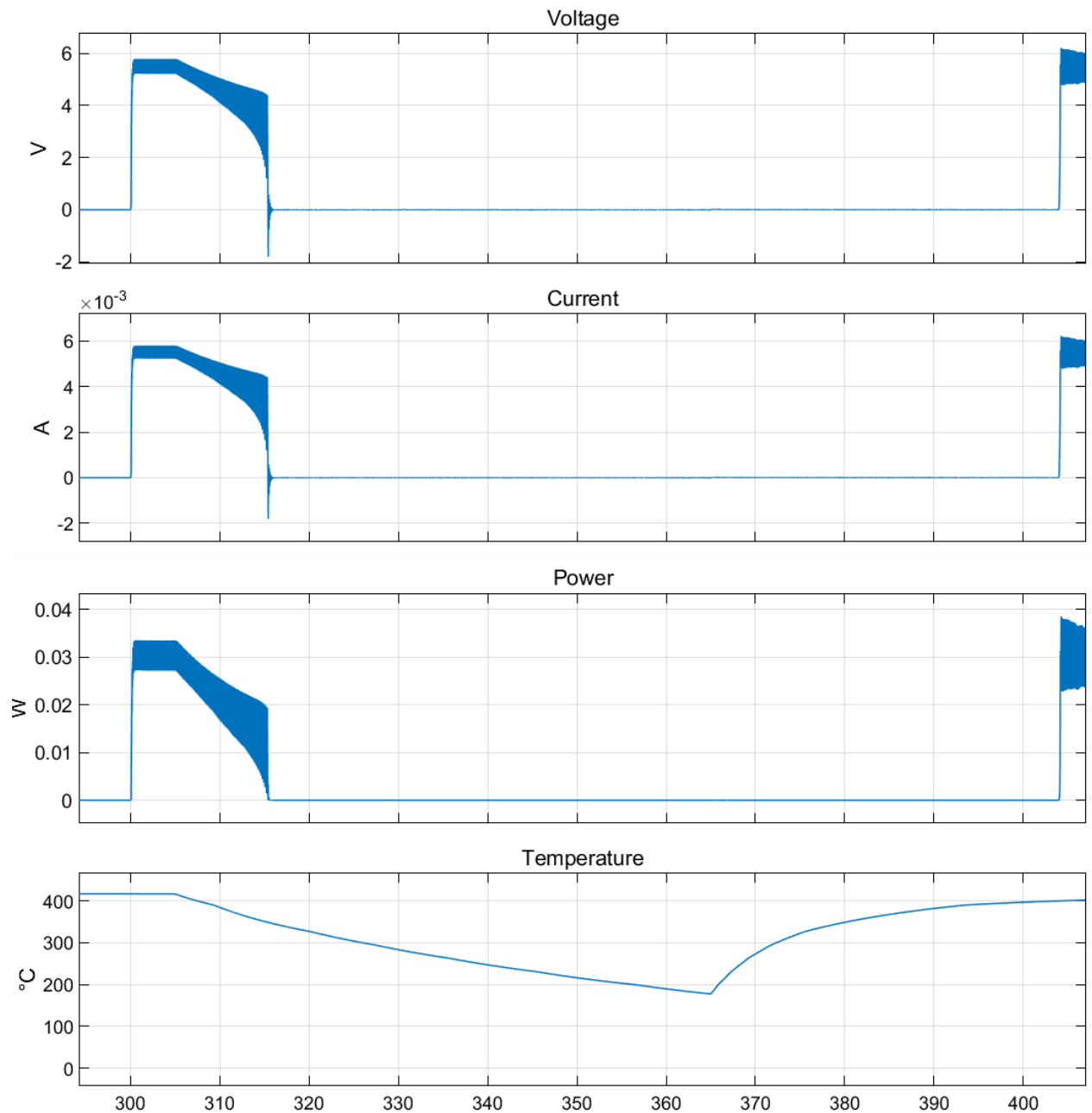


Рисунок 4.24 – Часові залежності напруги, струму, потужності електрогенератора та температури котла двигуна Стірлінга під час відсутності надходження інсоляції протягом 60 с без ДДЕ

Аналіз рис. 4.24 демонструє, що мінімальна температура, зафіксована на 365-й секунді, становила 178°C. Більш тривалий період охолодження спричинив інтенсифікацію тепловтрат системою, що, у свою чергу, істотно подовжило фазу теплового відновлення. Реініціалізація роботи двигуна за допомогою імпульсного модуля керування відбулася на 404-й секунді, коли температура

гарячої частини знову досягла порогового значення 400 °С. Отже, сумарна тривалість простою системи склала 88 секунд (в інтервалі між 316-ю та 404-ю секундами). Цей показник на 58 с перевищує тривалість простою для 20-секундного періоду відсутності інсоляції та на 27 с – для аналогічного 40-секундного періоду.

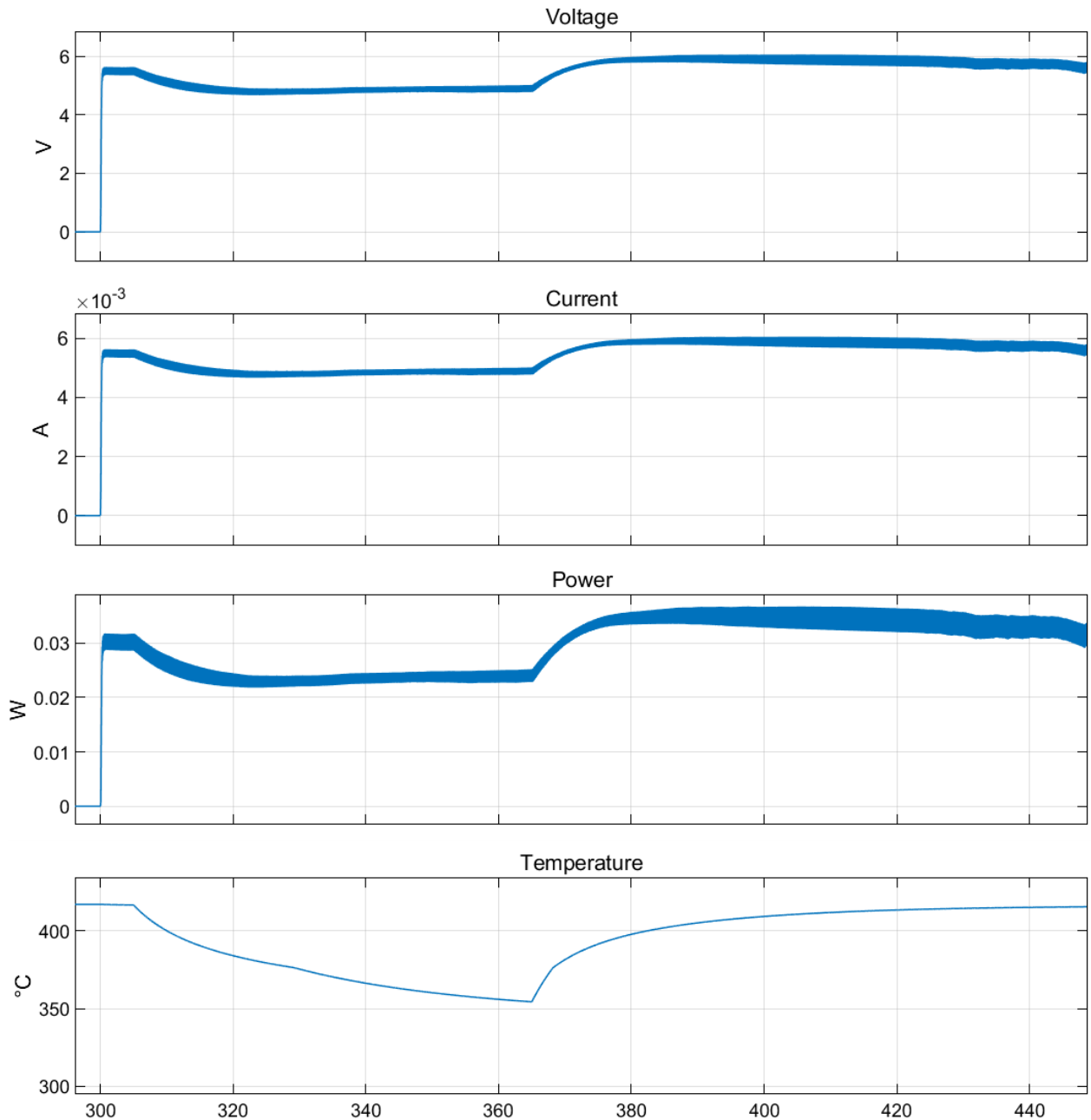
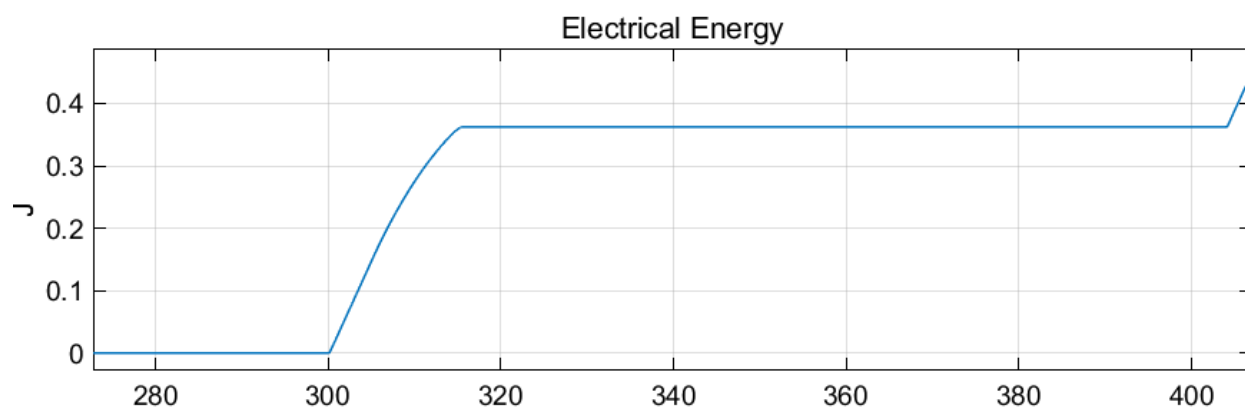


Рисунок 4.25 – Часові залежності напруги, струму, потужності електрогенератора та температури котла двигуна Стірлінга під час відсутності надходження інсоляції протягом 60 с з ДДЕ

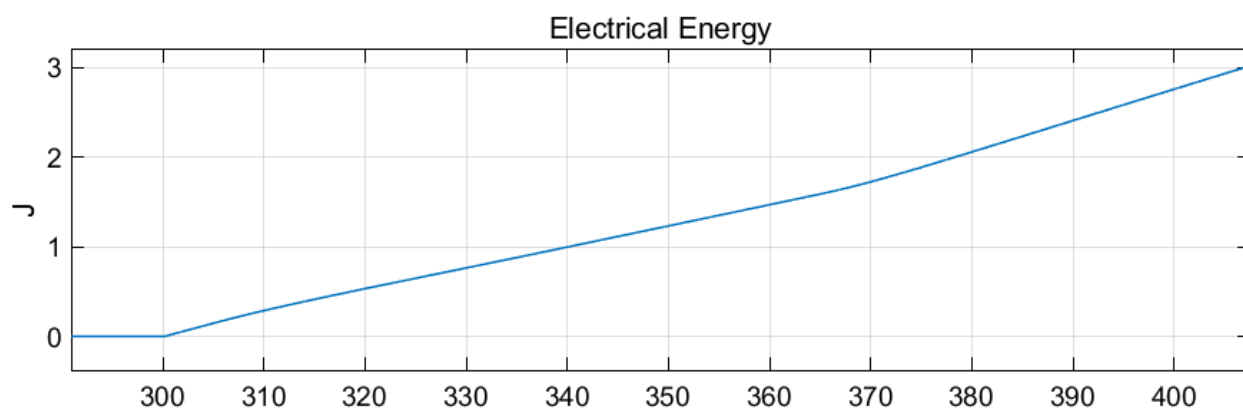
Система з увімкненим ДДЕ (рис. 4.25) продемонструвала здатність підтримувати робочий цикл протягом усього 60-секундного періоду зниження інсоляції. Температура гарячої зони при цьому поступово знижується до мінімального значення 354°C на 365-й секунді, що на 176°C вище, ніж у випадку без ДДЕ. Попри зменшення температури, робочий цикл двигуна не переривається: електрична потужність генератора досягає мінімуму 0,023 Вт на 325-й секунді, після чого відновлюється до 0,024 Вт на 345-й секунді і залишається стаціонарним до 365-й секунди, де температура змінюється менше ніж на 0.5°C протягом секунди.

Після відновлення інсоляції на 365-й секунді спостерігається зростання температури. До 383-ї секунди потужність досягає значення, характерного для стаціонарного режиму (0,03 Вт), при температурі 365°C . Максимального значення потужність сягає на 395-й секунді, складаючи 0,035 Вт при температурі 409°C . Стабілізація системи відбувається на 450-й секунді із встановленням потужності на рівні 0,03 Вт та температури 416°C .

На рис. 4.26 наведено порівняльні графіки енергії, виробленої системою без використання ДДЕ (рис. 4.26, а) та з його застосуванням (рис. 4.26, б) під час 60-секундного інтервалу відсутності інсоляції в межах загального періоду моделювання тривалістю 410 секунд. Динаміка кривих підтверджує закономірність, виявлену у попередніх експериментах: без додаткового джерела енергії двигун швидко втрачає тепловий потенціал, що призводить до зменшення електричної потужності та скорочення виробітку. Натомість у випадку з активним ДДЕ система продовжує стабільно функціонувати протягом усього періоду зниження інсоляції. Кількісний аналіз показує, що загальна кількість виробленої енергії без ДДЕ становить 0,46 Дж, тоді як із застосуванням ДДЕ – 3,01 Дж. Це свідчить про збільшення енерговіддачі у 6,5 разів, що підтверджує підтримання робочого циклу двигуна за рахунок додаткового електричного нагріву.



а)



б)

Рисунок 4.26 – Часові залежності виробленої електричної енергії системами з ДДЕ (а) та без ДДЕ (б) за умов 60-секундного переривання інсоляції

Проте варто зазначити, що для будь-якого варіанту розрахунок вихідної енергії з урахуванням витрат електронагрівача буде від'ємним, оскільки потужність останнього становить 30 Вт. Для даної 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 до розділу 4

1. Компроміс між точністю та складністю є вирішальним при виборі моделі. Для дослідження динамічних процесів у двигуні Стірлінга, особливо в нестационарних умовах, адіабатична модель другого порядку є найбільш ефективним інструментом, оскільки забезпечує достатньо високу точність без надмірних обчислювальних витрат, властивих моделям третього та четвертого порядків.

2. Функціонування двигуна Стірлінга суттєво залежить від стабільності теплового потоку. Результати моделювання показали, що навіть короткочасне (20 с) зниження температури джерела теплоти спричиняє порушення робочого циклу, зупинку двигуна та втрату виробленої енергії впродовж періоду відновлення. Це свідчить про високу чутливість системи, що працює на перетвореній сонячній енергії, до коливань надходження інсоляції.

3. Додаткове джерело енергії є ефективним інструментом для стабілізації, але не обов'язково для підвищення енергоефективності системи. Використання ДДЕ дозволяє повністю усунути прості системи, збільшуючи сумарний вихід енергії у 2.9–6.5 разів залежно від тривалості переривання інсоляції. Однак для систем з низьким загальним ККД (як у розглянутому випадку) енергія, спожита ДДЕ, може перевищувати корисну вироблену енергію, роблячи систему енергетично збитковою в абсолютних показниках.

4. Критичним параметром для доцільності застосування ДДЕ є ККД всієї системи. Рішення про впровадження додаткового підігрівання має ґрунтуватися не на факті збільшення виробітку порівняно з режимом із простоями, а передусім на аналізі балансу між витраченою та отриманою енергією в системі з ДДЕ. Таким чином, ДДЕ енергетично виправдано лише в системах з високим ККД або коли пріоритетом виступає забезпечення неперервності роботи, а не мінімізація енерговитрат.

5. Система характеризується значною тепловою інерційністю. Процеси запуску, зупинки та відновлення робочого режиму займають десятки секунд, що підкреслює важливу роль теплоємності конструктивних елементів двигуна. Ця інерційність може бути як недоліком (через уповільнену реакцію на зміну зовнішніх умов), так і перевагою (оскільки вона забезпечує певне згладжування короткочасних змін інсоляції).

РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА З ВИКОРИСТАННЯМ ЛІНЗИ ФРЕНЕЛЯ ЯК КОНЦЕНТРАТОРА СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

5.1 Визначення параметрів та розробка стенду для експериментальних досліджень двигуна Стірлінга

Метою експериментального дослідження є перевірка достовірності результатів, отриманих під час моделювання роботи енергетичної системи на основі двигуна Стірлінга, що використовує сонячне випромінювання як основне джерело теплоти та електронагрівач як ДДЕ для стабілізації робочого процесу. Дослідження спрямоване на валідацію динамічної поведінки системи в умовах зміни надходження теплоти, зокрема реакції двигуна на коливання рівня інсоляції та оцінку доцільності застосування ДДЕ 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.

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, 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. 5.1). 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 таким чином. 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.

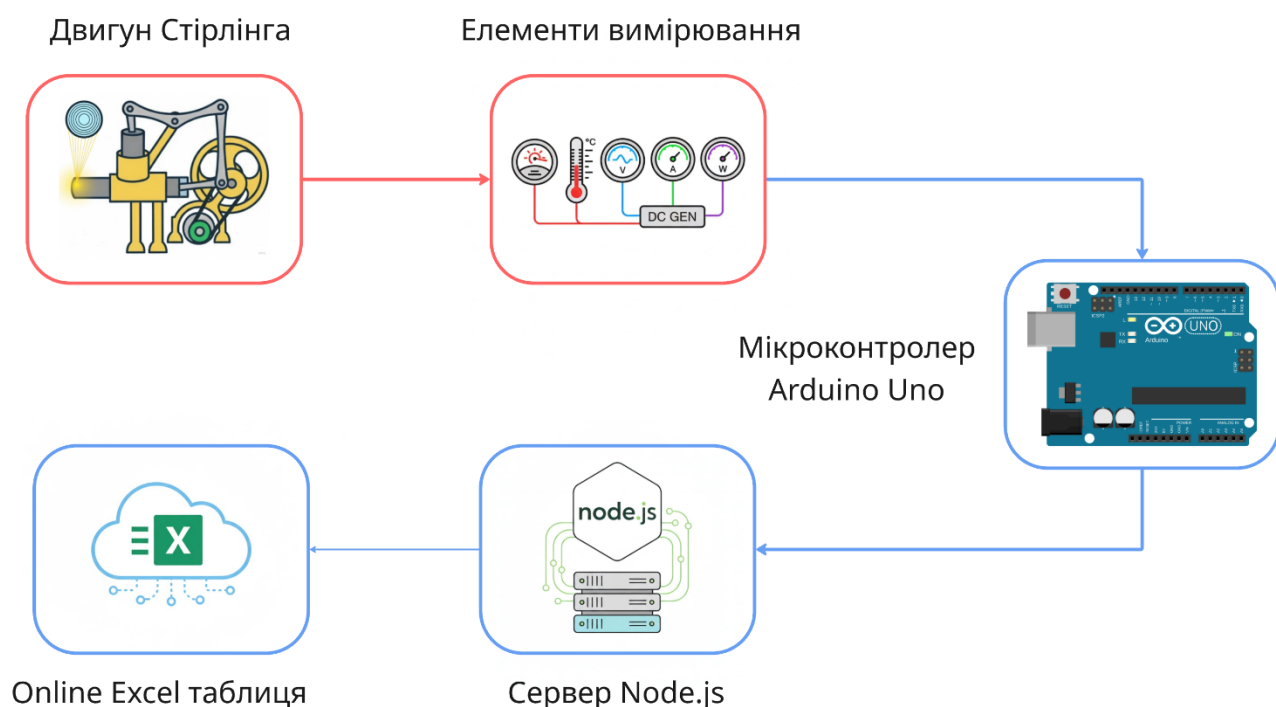


Рисунок 5.1 – Блок-схема загальної архітектури експерименту: потоки енергії (червоні) та потоки даних (сині)

Подальша деталізація архітектури системи представлена на електричній схемі експериментальної установки (рис. 5.2), 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 К** 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 (див. Додаток В).

- Node.js сервер, який приймає дані з Arduino, структурує їх та пересилає до таблиці Google Sheets (див. Додаток Г).

- Google Apps Script, реалізований у середовищі Google Sheets, що виконує обробку отриманих даних і запис їх у таблицю для подальшої аналітики (див. Додаток Г).

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

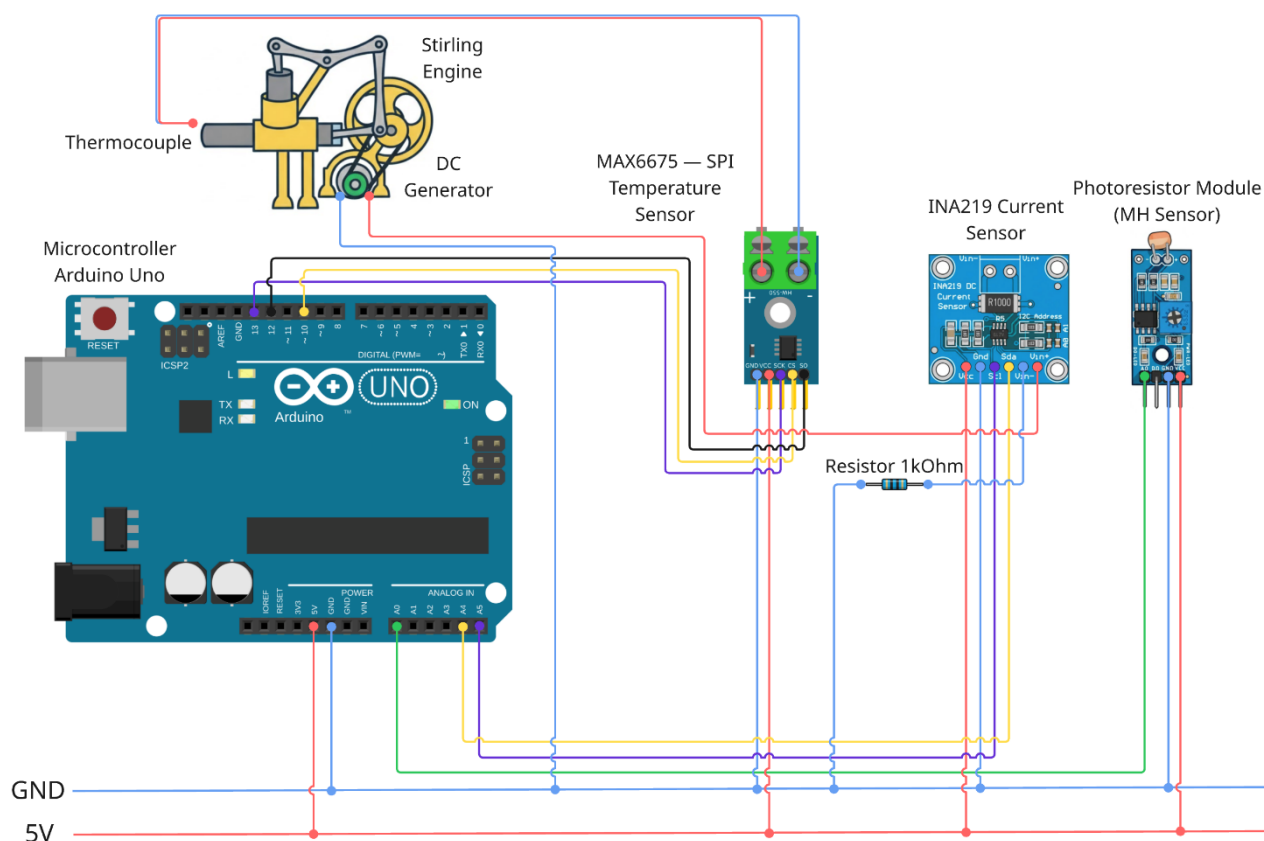


Рисунок 5.2 – Електрична схема вимірювальної підсистеми на основі мікроконтролера Arduino Uno

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 К, 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 MAX6675, 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. 5.3.

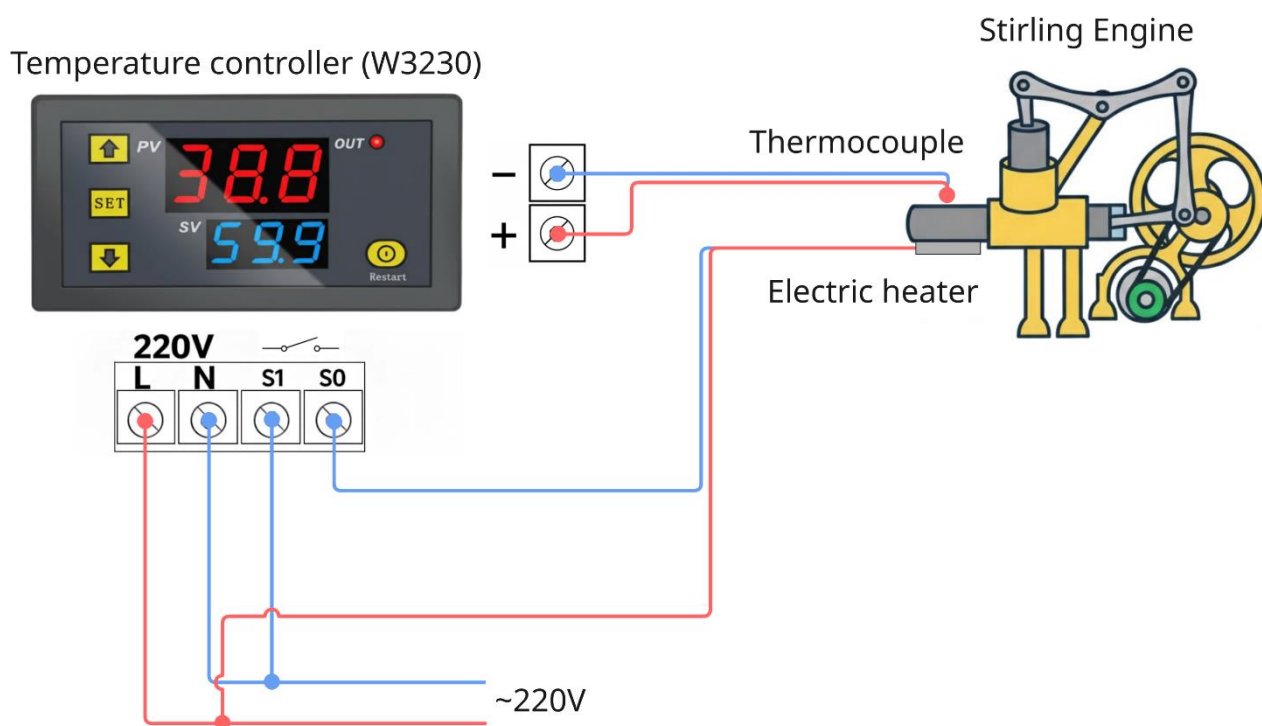


Рисунок 5.3 – Схема підключення терморегулятора W3230 з електронагрівачем та термопарою

На рис. 5.4 наведено загальний вигляд експериментального стенду з позначенням основних компонентів системи, що включає мікроконтролер, датчики вимірювання параметрів, елементи живлення та засоби відображення даних.

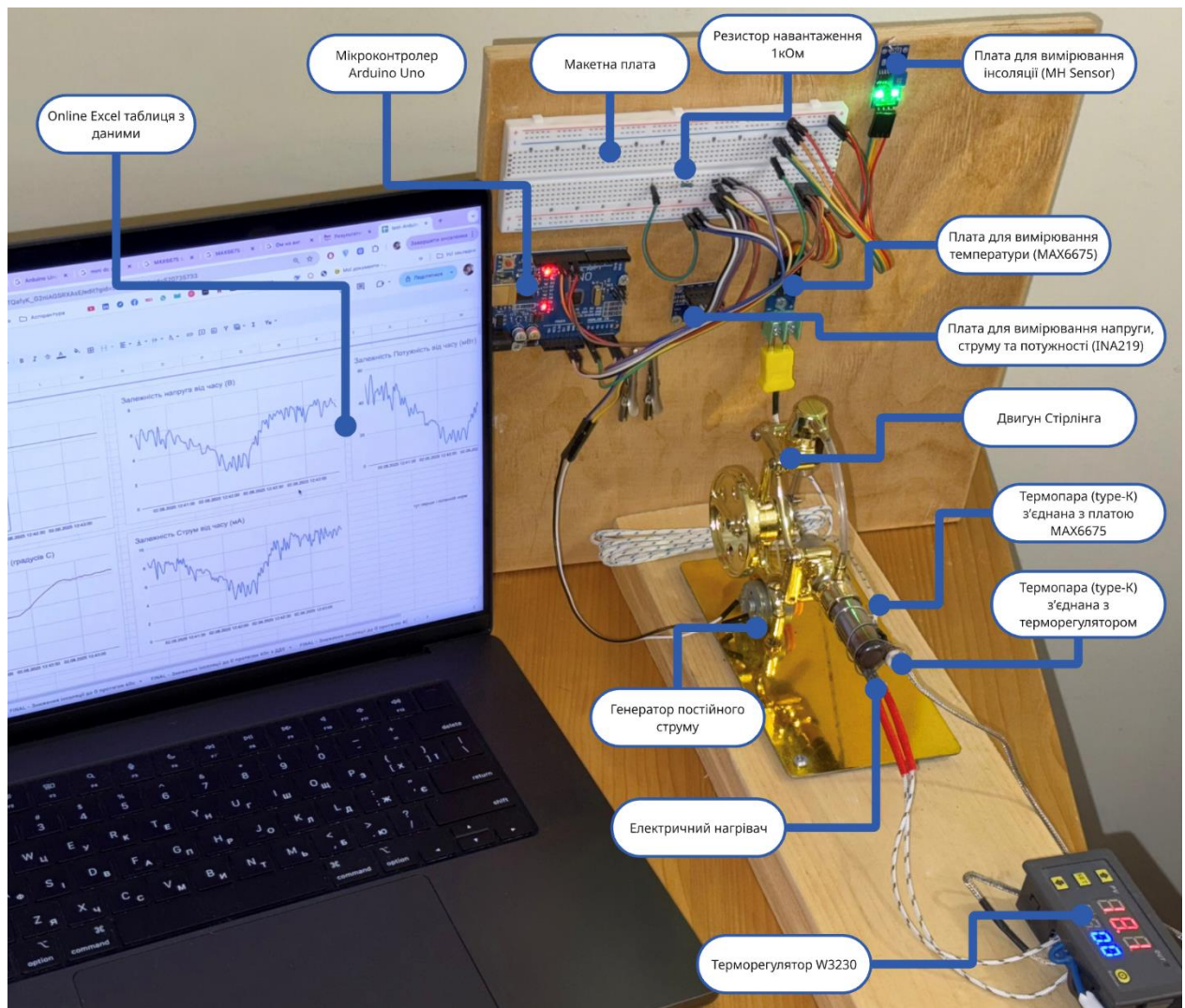


Рисунок 5.4 – Загальний вигляд експериментального стенду з позначенням основних елементів системи

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 й універсальною платформою для подальших досліджень енергетичних систем на основі двигуна Стірлінга.

5.2 Проведення експериментальних досліджень та аналіз отриманих результатів

Після завершення етапу розроблення та налагодження експериментальної установки було проведено серію вимірювань, спрямованих на перевірку

достовірності результатів моделювання, наведених у параграфі 4.3.2. Основна увага приділялась порівнянню експериментально отриманих характеристик роботи двигуна Стірлінга з даними математичного моделювання в програмі Simulink, а також визначенню доцільності застосування ДДЕ для забезпечення стабільної роботи системи при змінних надходженнях інсоляції.

Під час досліджень відтворювались ті самі робочі сценарії, що й у процесі чисельного моделювання в середовищі Simulink, 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 секунд. 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.

На рис. 5.5 наведені часові залежності основних параметрів системи на етапі початкового нагрівання та запуску двигуна Стірлінга в ході експерименту. Аналіз графіків підтверджує наявність перехідного процесу, аналогічного отриманому під час моделювання, однак з істотним запізненням. Температура гарячої частини двигуна досягає значення 400°C лише на 124-й секунді, що на 34 секунд пізніше порівняно з результатами моделювання (в моделі не враховані втрати в повному об'ємі). Стабілізація температури (критерій – зміна менш ніж на 1°C за 5 с) відбувається на 132-й секунді; на цьому ж етапі фіксується максимальна стабільна температура 405°C .

На відміну від моделювання, експериментальні дані демонструють значні коливання як максимальної температури, так і моменту стабілізації. Це явище обумовлено впливом низки зовнішніх факторів, серед яких: пориви вітру, що

інтенсифікують тепловіддачу в навколишнє середовище, та зміщення фокусної плями сонячного випромінювання, сформованої лінзою Френеля.

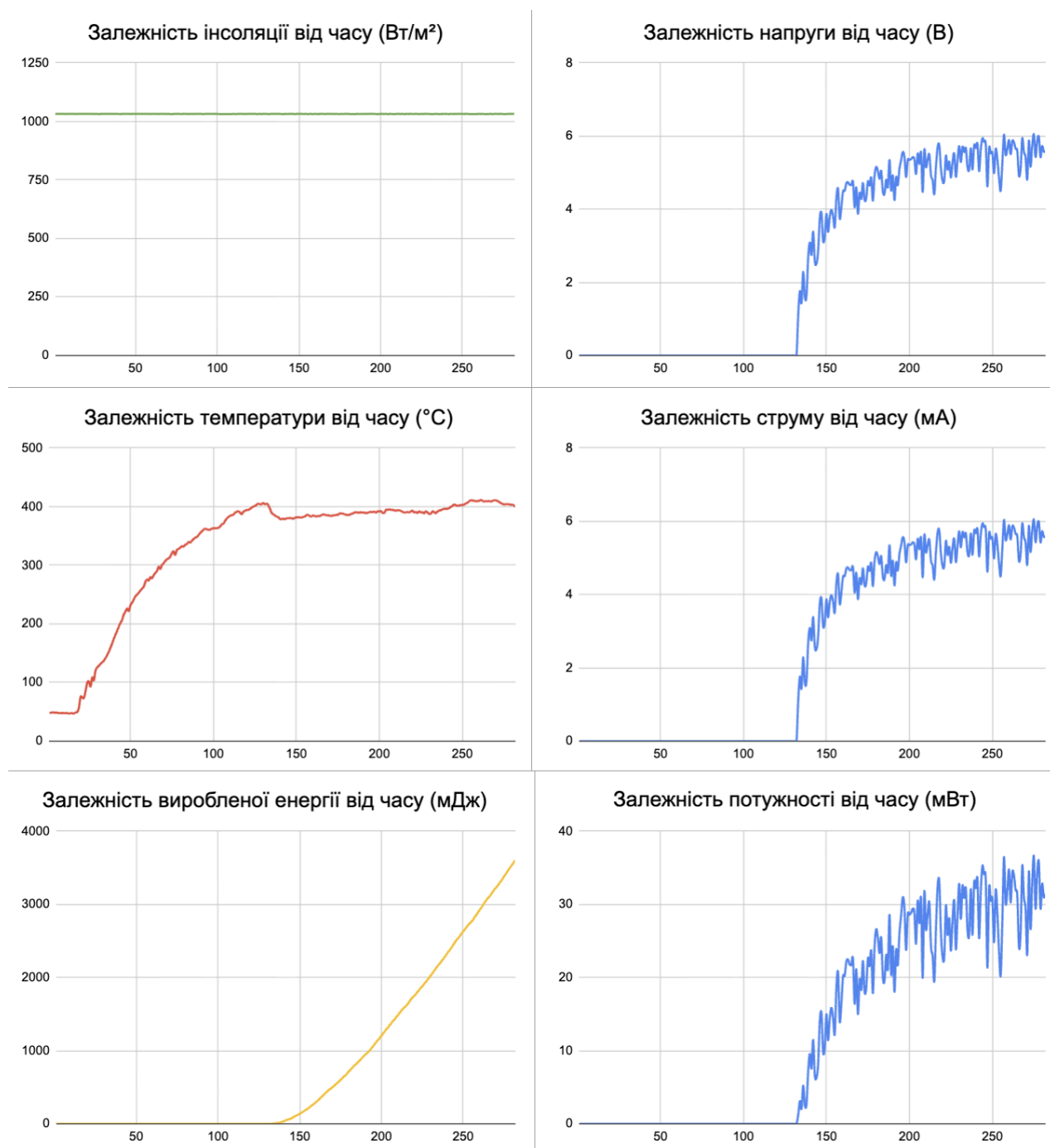


Рисунок 5.5 – Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час початкового етапу експерименту (нагрівання системи та момент запуску)

Імпульсний момент обертання було подано на 133-й секунді, що спричинило зростання вихідних енергетичних параметрів генератора. Однак

енергетичні параметри в експериментальних умовах збільшуються значно повільніше (близько 120 секунд), ніж у моделюванні, та стабілізуються лише після 250 секунд експерименту. Ця розбіжність обумовлена впливом реальних факторів, таких як електромагнітне навантаження, механічний опір та інерційні характеристики системи, які уповільнюють вихід на сталий режим роботи. У моделі зазначені фактори були частково ідеалізовані, що пояснює відмінності у динаміці між експериментальними та змодельованими даними.

Крім того, під час експерименту спостерігається більш виражене зниження температури гарячої частини двигуна в момент запуску порівняно з результатами моделювання. Це свідчить про інтенсивніший теплообмін між гарячою та холодною зонами системи. 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.

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). Отже, середні величини отриманих значень узгоджуються з результатами моделювання, однак амплітуда коливань під час експерименту приблизно утричі більша. Це зумовлено сукупною дією кількох 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 секунд) 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 5.6 та 5.7 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. 5.6, виявив розбіжності між моделлю та реальною системою щодо їх реакції на зниження інсоляції. Зупинка двигуна Стірлінга в експерименті зафіксована на 67-й секунді, що на 5 секунд пізніше передбаченого моделлю часу. Температурні параметри також відрізнялися: температура гарячої зони в момент зупинки становила 301°C (на 48°C нижча за модельну), а мінімальне її значення 276°C (на 28°C нижче) було досягнуто на 73-й секунді. Повторний запуск відбувався на 103-й секунді, коли температура гарячої частини двигуна досягла 400°C, тобто простій двигуна був протягом 36 секунд (що на 6 секунд довше ніж під час моделювання).

Отримані результати свідчать про те, що реальна система характеризується більш вираженою тепловою та механічною інерційністю порівняно з моделлю, що забезпечує збереження її працездатності протягом довшого періоду після зниження інсоляції. Водночас форма та динаміка змін експериментальних кривих узгоджується з результатами моделювання, що підтверджує коректність розрахункової моделі та достовірність отриманих теоретичних результатів.

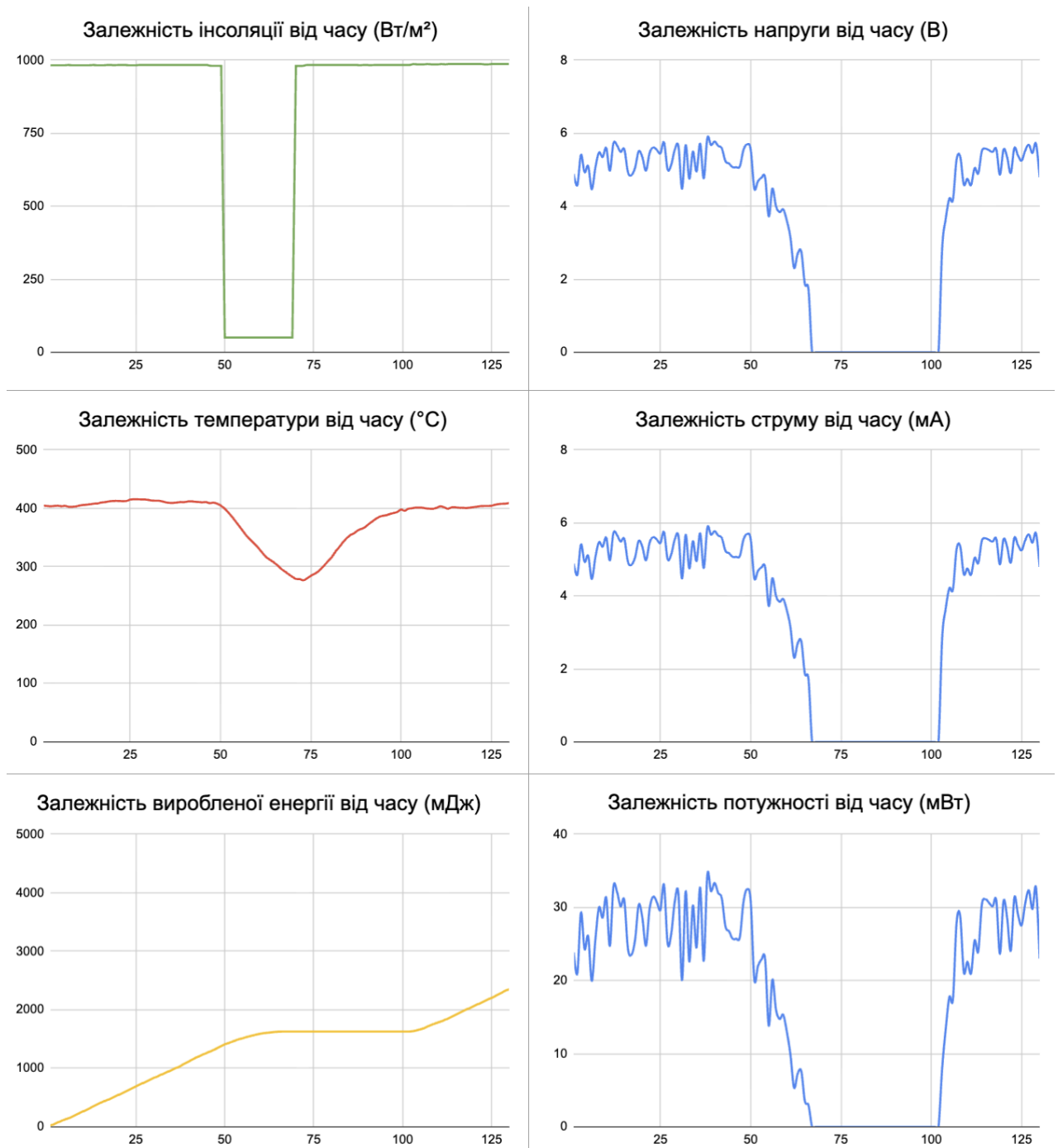


Рисунок 5.6 – Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 20 с без ДДЕ

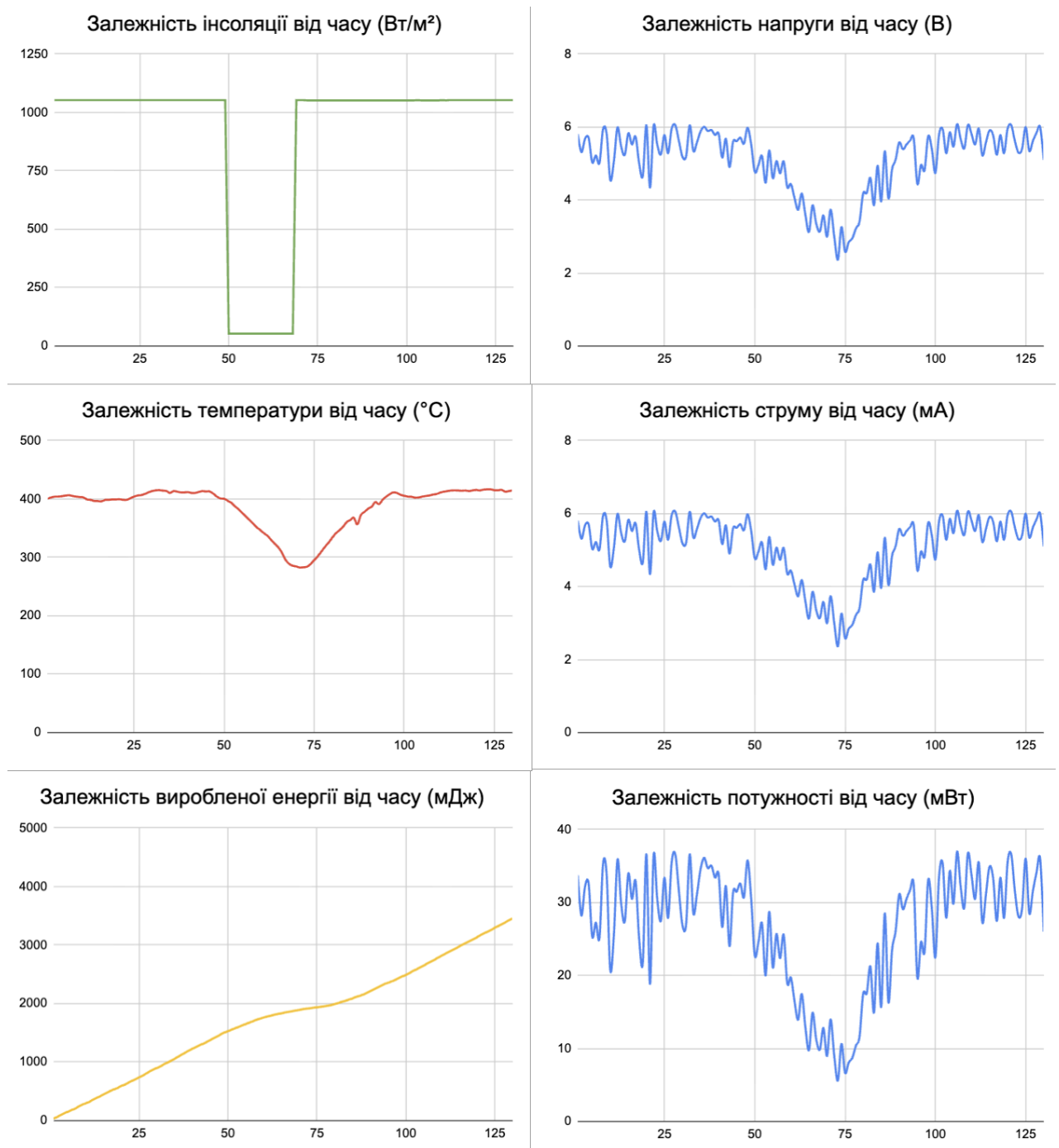


Рисунок 5.7 – Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 20 с з ДДЕ

Аналіз залежностей, наведених на рис. 5.7, 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°C, що на 96°C нижче порівняно з результатами моделювання, і

спостерігалася на 72-й секунді експерименту. При цьому потужність генератора зменшилася до 6 мВт, що на 17 мВт менше, ніж під час моделювання.

Порівняння з результатами експерименту без застосування ДДЕ свідчить, що двигун продовжував працювати навіть при температурі нижче 301°C, 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.

Відмінність між експериментальними та модельними результатами зумовлена тим, що математична модель передбачає ідеалізовані умови теплопередачі та миттєву реакцію системи на зміну теплових потоків, тоді як у реальній установці наявні інерційні ефекти, додаткові теплові втрати до навколишнього середовища через пориви вітру та нерівномірність розподілу теплоти в матеріалах.

Крім того, слід зазначити, що ефект незначного та короткочасного підвищення вихідної потужності після відновлення сонячної інсоляції, який був передбачений моделюванням для системи з ДДЕ, у експериментальних умовах не був ідентифікований. Цю розбіжність можна пояснити двома основними факторами: значною амплітудою власних коливань потужності, що спостерігалися під час експерименту, та інерційністю електронагрівача, який не встиг повністю розігрітися та передати достатню кількість теплоти до гарячої частини двигуна протягом 20 секундного інтервалу.

Порівняльний аналіз вихідної електричної енергії генератора протягом 130-секундного експерименту підтверджує загальну тенденцію, отриману в моделюванні. 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, характеру у порівнянні з моделлю. Ця відмінність пояснюється значно нижчою

(у 2.8 рази) вихідною потужністю генератора під час роботи від електронагрівача в експерименті ніж в моделюванні.

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 дослідження стало експериментальне підтвердження результатів моделювання системи в умовах більш тривалого зниження інсоляції – тривалістю 40 та 60 секунд. На рис. 5.8 та 5.9 наведені часові залежності основних параметрів системи під час 40-секундного переривання інсоляції для випадків без ДДЕ та із його використанням відповідно.

Аналіз рис. 5.8 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°C, що на 7°C нижче порівняно з результатами моделювання. Повторний запуск двигуна відбувся лише на 148-й секунді, коли температура гарячої частини знову досягла порогового значення 400°C. Таким чином, загальний час простою системи склав 77 с (з 71-ї по 148-у секунду), що на 16 с більше порівняно з моделюванням. Це свідчить про те, що реальна система виявила дещо меншу термічну інерційність, ніж передбачалося моделюванням. Причиною цього є більша втрата теплоти у конструкційних елементах двигуна, що прискорює процес охолодження.

Результати експерименту з увімкненим додатковим джерелом енергії (рис. 5.9) підтвердили 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°C на 91-й секунді, що на 100°C нижче порівняно з результатами моделювання, але на 38°C 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°C. Максимального значення потужність досягає на 139-й секунді, становлячи 42,6 мВт при температурі 421°C, після чого система стабілізується приблизно на 145-й секунді.

Таким чином, при 40-секундному інтервалі зниження інсоляції експериментальні результати підтверджують 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.

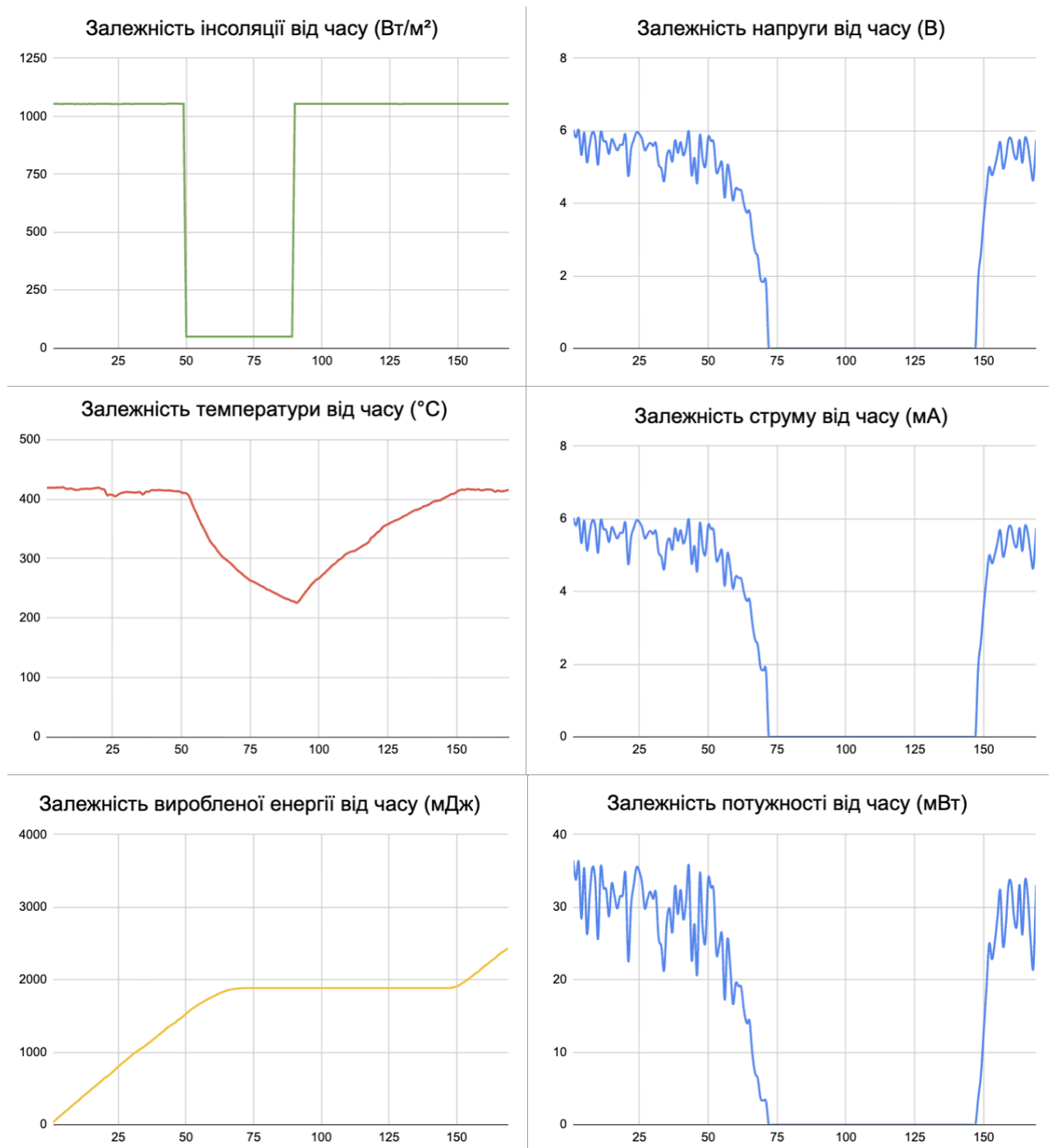


Рисунок 5.8 – Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 40 с без ДДЕ

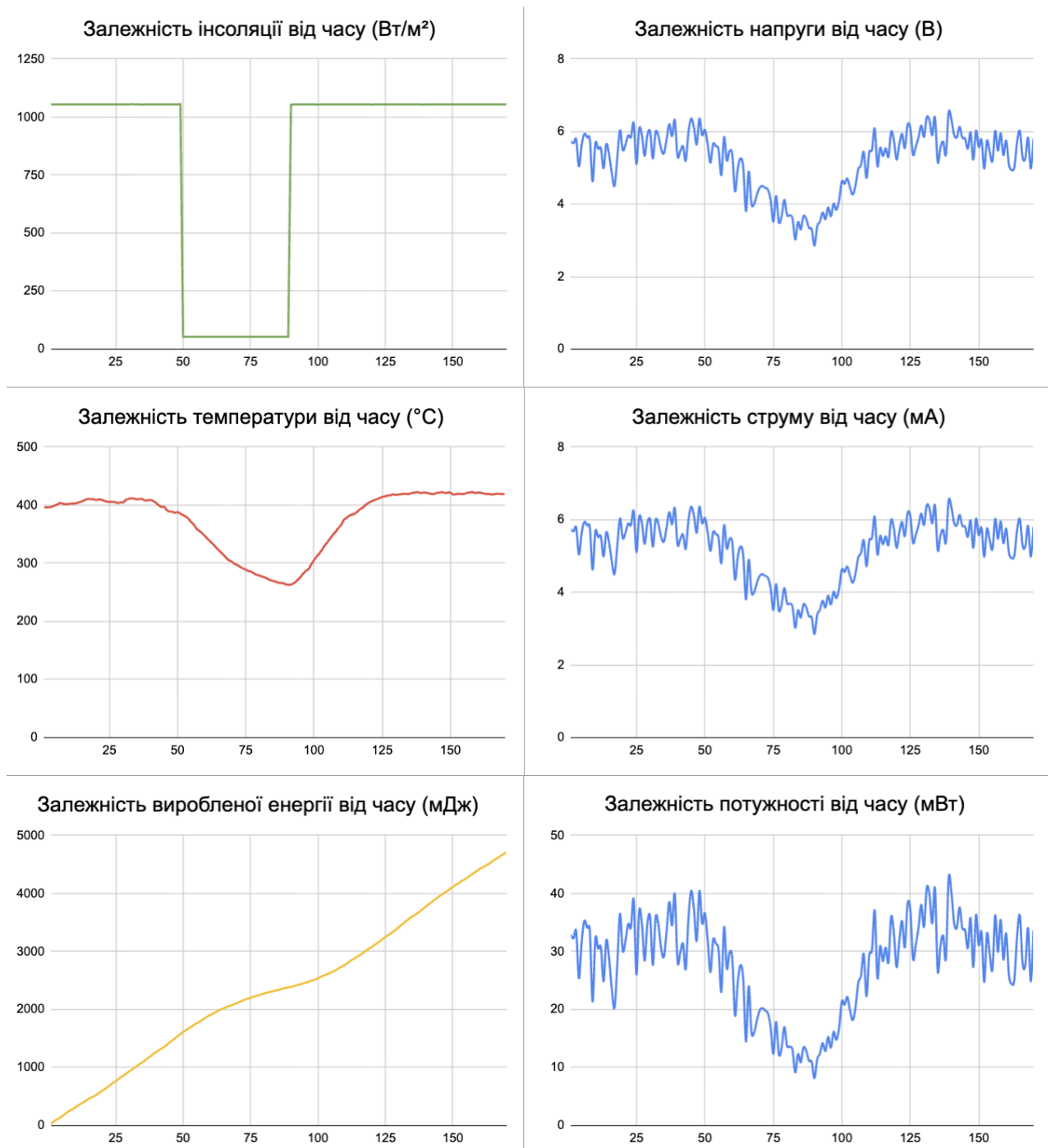


Рисунок 5.9 – Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 40 с з ДДЕ

На рис. 5.10 та 5.11 представлено часові залежності основних параметрів системи під час 60-секундного переривання інсоляції для випадків без додаткового джерела енергії (електронагрівача) та з ДДЕ відповідно.

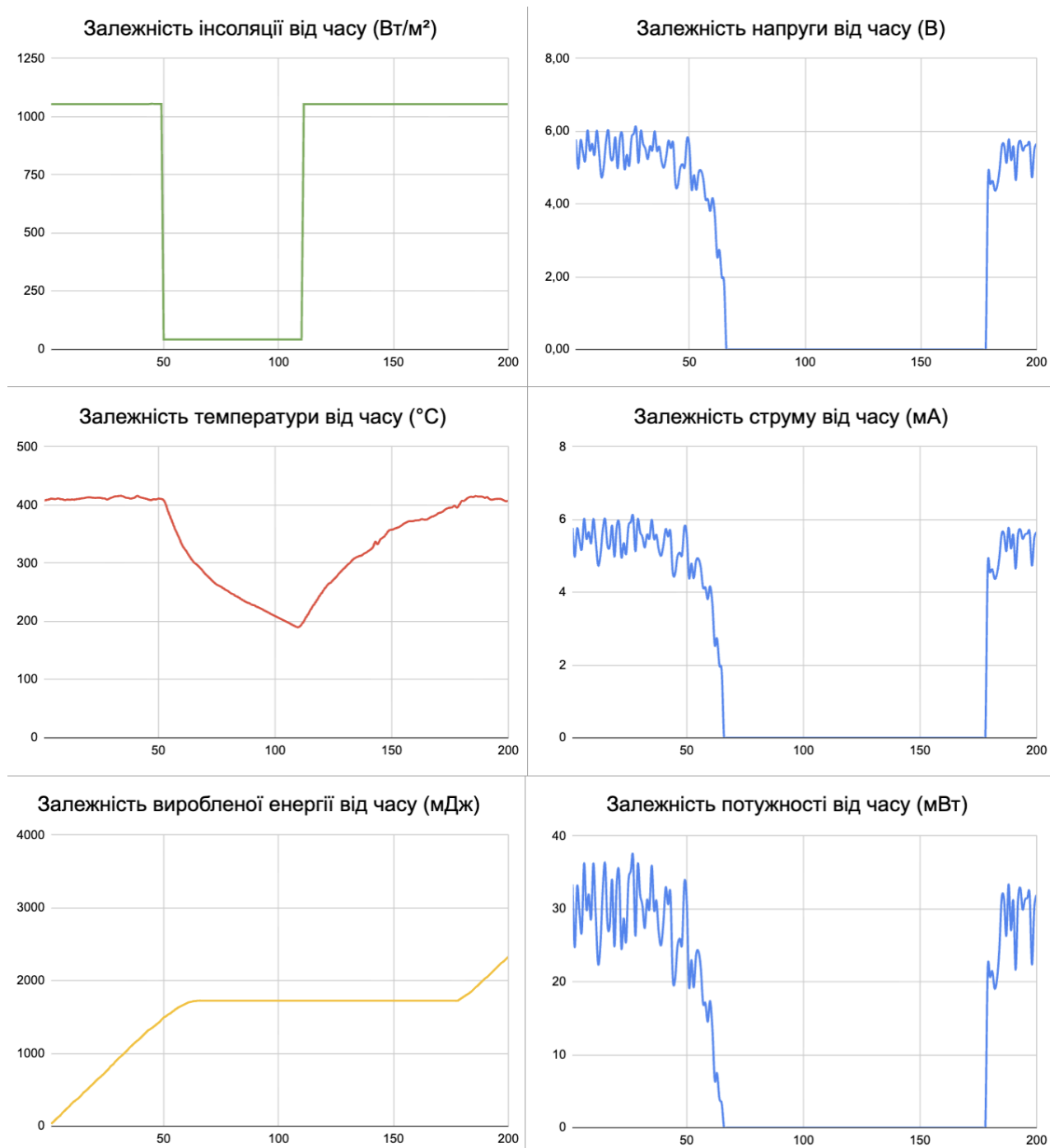


Рисунок 5.10 – Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 60 с без ДДЕ

Аналіз даних, наведених на рис. 5.10, показує, що мінімальна температура гарячої частини системи, зафіксована на 110-й секунді, становила 190°C, що на 12°C вище, ніж під час моделювання. Повторний запуск двигуна Стірлінга відбувся на 179-й секунді, коли температура гарячої зони знову досягла

порогового значення 400°C . Таким чином, загальна тривалість простою системи становила 113 с (у проміжку між 66-ю та 179-ю секундами), що на 25 секунд більше, ніж передбачалося моделюванням. Цей показник на 77 секунд перевищує тривалість простою для 20-секундного періоду відсутності інсоляції та на 36 секунд – для аналогічного 40-секундного періоду.

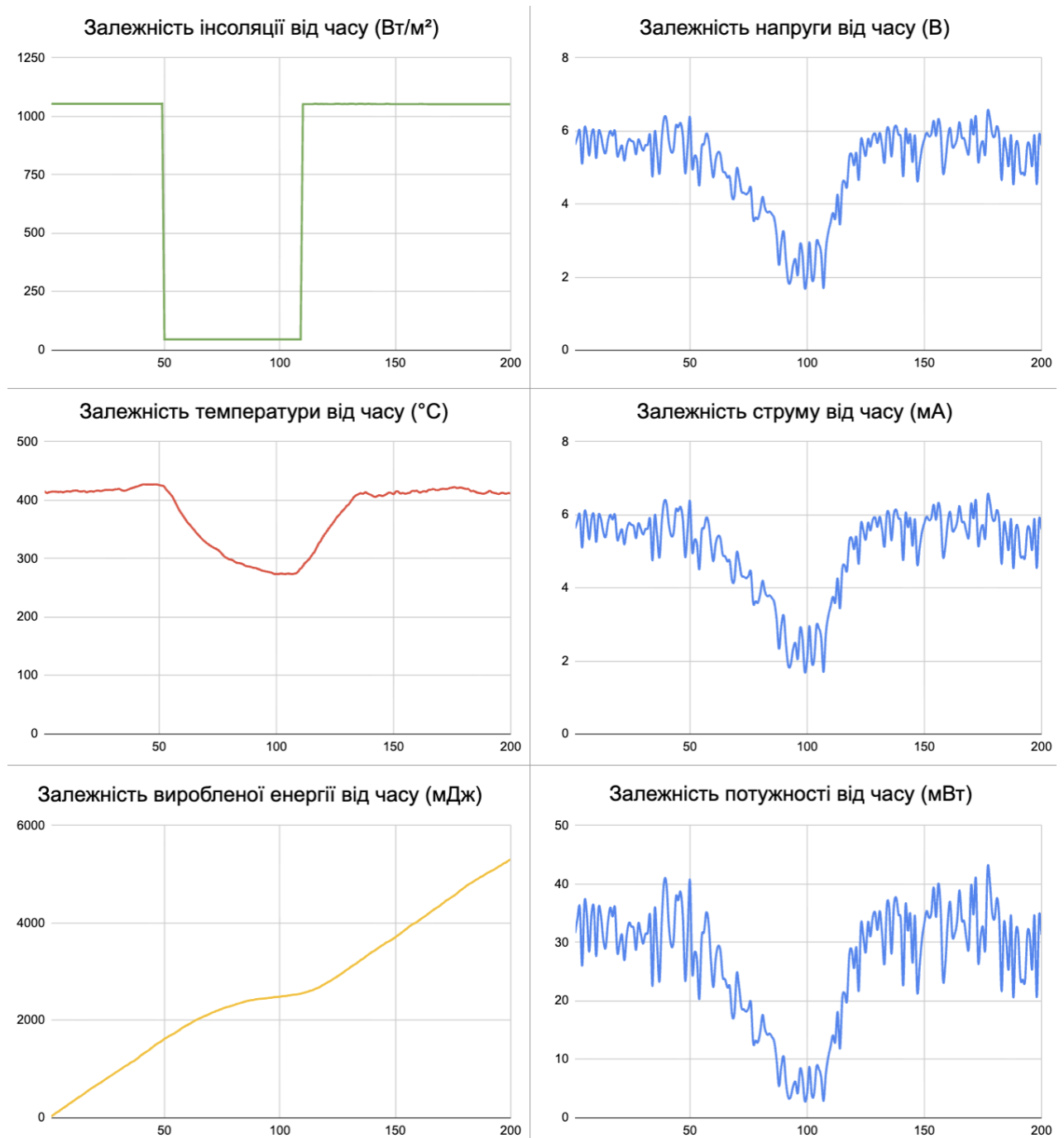


Рисунок 5.11 – Часові залежності напруги, струму, потужності, виробленої енергії, температури котла двигуна Стірлінга та рівня інсоляції під час відсутності надходження інсоляції протягом 60 с з ДДЕ

Експеримент з увімкненим ДДЕ (рис. 5.11) підтвердив здатність підтримувати робочий цикл протягом усього 60-секундного періоду зниження інсоляції. Температура гарячої зони при цьому поступово знижується до мінімального значення 274°C на 103-й секунді, що на 84°C 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°C. Максимального значення потужність сягає на 177-й секунді, складаючи 42,7 мВт при температурі 420°C, 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 і моделювання дозволяє зробити висновок, що експериментальні результати підтверджують виявлену тенденцію у моделюванні: 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 нагріву.

Висновки до розділу 5

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 загалом узгоджується з результатами моделювання. Водночас реальна система демонструє більшу теплову та механічну інерційність, що свідчить про необхідність урахування в математичній моделі додаткових факторів.

2. Аналіз часових залежностей основних параметрів у процесі нагрівання та запуску показав наявність суттєвого запізнення порівняно з результатами моделювання. Час виходу на стаціонарний режим у реальних умовах виявився більшим приблизно на 60–70 секунд, що пояснюється впливом теплових втрат, механічного тертя, інерційності системи та зовнішніх факторів (пориви вітру).

3. 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). Це підтверджує, що отримані експериментальні результати узгоджуються з даними моделювання, однак амплітуда коливань під час експерименту приблизно утричі більша.

4. Ефективність ДДЕ для підтримки безперервності 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.

5. 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 секунд відповідно.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання, що полягає у визначенні характеру впливу чинників надходження енергії сонячного випромінювання на показники стабілізації вихідних параметрів термоелектричної установки на базі двигуна Стірлінга шляхом математичного та фізичного моделювання. Отримані результати забезпечують поглиблене розуміння динаміки роботи системи за змінних умов інсоляції та формують підґрунтя для підвищення ефективності й надійності таких установок у реальних експлуатаційних режимах.

Відповідно до поставленої мети в роботі отримано наступні наукові та практичні результати:

1. За результатами аналізу літературних джерел показано, що концентратор із використанням лінз Френеля, порівняно з іншими установками, є більш доцільним рішенням для забезпечення електроенергією домогосподарств завдяки простоті конструкції, дешевизні встановлення та експлуатації, здатності до досягнення високих температур ($>1000^{\circ}\text{C}$), легкості масштабування та відносно високій ефективності, що становить понад 30% для виробництва електроенергії та понад 50% – для комбінованого виробництва електроенергії й теплоти.

2. Обґрунтовано, що глибина фокусу є основною характеристикою лінзи, що визначає вимоги точності розташування лінзи до нагрівача двигуна Стірлінга, на якому концентрується сонячне випромінювання, для забезпечення мінімальної концентраційної плями. Для наведеного прикладу (лінзи з $r = 150$ (мм) та $f = 200$ (мм)), має розташовуватися на відстані ± 1.2 мм від фокусної відстані лінзи. А інтенсивність сонячного випромінювання має більший вплив на величину температури концентраційної плями при меншій її площі. Різниця температури при величині сонячного випромінювання між 1000 Вт/м^2 та 400 Вт/м^2 для площі концентраційної плями $2,72 \text{ мм}^2$ становить 850°C , а при площі 400 мм^2 становить 240°C .

3. Встановлено, критерій енергетичної доцільності застосування додаткового джерела енергії, який ґрунтується на аналізі ККД системи залежно від рівня та тривалості зниження інсоляції. Доведено, що для кожного часового інтервалу спаду інсоляції існує такий рівень сонячної радіації, за якого використання резервного нагрівання є найбільш ефективним і забезпечує максимальний загальний виробіток електроенергії, що є теоретичною основою для створення алгоритмів інтелектуального керування такими термодинамічними системами.

4. Розроблено імітаційну модель у середовищі Simulink для дослідження вихідних параметрів згенерованої електричної енергії та оцінки ефективності технічних рішень, спрямованих на стабілізацію роботи двигуна Стірлінга за змінних умов нагрівання. Моделювання динаміки системи підтвердило, що застосування ДДЕ є вирішальним фактором для забезпечення неперервності роботи установки, усуваючи простой та збільшуючи сумарний виробіток енергії в 2.9–6.5 разів залежно від тривалості переривання інсоляції. Однак, його ефективність суттєво залежить від загального ККД системи: встановлено, що використання ДДЕ енергетично доцільне лише в системах з високим ККД, оскільки в іншому випадку витрачена енергія може перевищувати корисну генерацію. Таким чином, рішення про його впровадження має ґрунтуватися на аналізі енергетичного балансу, або на пріоритеті неперервності роботи над енергоефективністю.

5. Створено експериментальний стенд та програмне забезпечення для перевірки достовірності результатів, отриманих під час моделювання та дослідження реакції двигуна Стірлінга на коливання рівня сонячного випромінювання та оцінку доцільності застосування ДДЕ з погляду стабільності й енергоефективності. Експериментальний стенд підтвердив здатність системи генерувати електроенергію та показав, що застосування додаткового джерела енергії повністю усуває простой, збільшуючи сумарний виробіток у 1,5–2,3 рази залежно від тривалості переривання інсоляції. Отримані результати узгоджуються з моделюванням і підтверджують закономірність зростання

виграшу у виробленій енергії зі збільшенням часу відсутності сонячного потоку. Експеримент також виявив більш високу теплову інерційність реальної системи порівняно з моделлю, що вказує на необхідність її подальшого уточнення, але не заперечує загальну адекватність отриманих раніше теоретичних результатів.

Результати дисертаційного дослідження передано для використання у навчальному процесі кафедрі відновлюваних джерел енергії факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та кафедрі енергетики, факультету механіки, енергетики та інформаційних технологій «Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького».

.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

В дисертації були використані інструменти штучного інтелекту, які застосовувалися виключно з метою редагування та стилістичного вдосконалення тексту без впливу на наукові результати та висновки.

1. Kudrya, S., Lezhniuk, P., Rubanenko, O., Hunko, I., Dyachenko, O. (2024). Local Power Systems Based on Renewable Energy Sources. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control, vol 552. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_17.
2. KOZACHUK, O. and LEZHNIUK, P. 2024. FORMATION OF LOCAL ELECTRIC ENERGYSYSTEMS in the composition of THE UNIFIED ENERGY SUPPLY SYSTEM. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 337, 3(2) (May 2024), 352–356. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-53>.
3. Gaevskii O., Gaevskaya, A. and Konovalov, M. 2022. IMPACT OF THE LOAD OF DISTRIBUTION NETWORK ON THE VOLTAGE INCREASE AT THE POINT OF CONNECTION OF PV INVERTER. *Vidnovluvana energetika* . 2(69) (Jun. 2022), 48-55. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2\(69\).48-55](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69).48-55).
4. Gaevskii O., Gaevska A., Bodnyak, V. and Konovalov, M. 2022. THE PROBLEM OF OPTIMIZATION OF HYBRID ENERGY SYSTEM ACCORDING TO THE LEVEL OF DISPERSION OF GENERATED POWER. *Vidnovluvana energetika* . 1(68) (May 2022), 27-36. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\).27-36](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).27-36).
5. Kongtragool, B. and S. Wongwises. Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator. *Renewable Energy*, 2006.31(3): p. 345-359.
6. R.K.Rajput. Internal Combustion Engine. Laxmi Publication 2011, pp:-163.

7. Mehmet Sait Cengiz, Mehmet Salih Memiş, Metin Kaynakli. The Temperature-Pressure-Frequency Relationship Between Electrical Power Generating in Stirling Engines. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2017. pp. 59–64.
8. Li, Y. Modeling, design and control of dish-stirling solar-thermal power generating system. Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore. 2015.
9. Karabulut H., Aksoy F., and Öztürk F. Thermodynamic analysis of a Beta type Stirling engine with a displacer driving mechanism by means of a lever. *Renewable Energy*, 34(2). 2009. pp. 202-208.
10. Hans Müller-Steinhagen, Freng And Franz Trieb. Concentrating solar power. *International Journal of Engineering Research and Development*. A review of the technology. 2004. pp. 1–9.
11. Fuying Chen, Qing Yang. Assessment of concentrated solar power generation potential in China based on Geographic Information System (GIS). 2022.
12. Granqvist CG. Preparation of thin films and nanostructured coatings for clean tech applications: a primer. *Sol Energy Mater Sol Cell*. 2012;99:166–75.
13. Kalogirou S. Solar thermal collectors and applications. *Prog Energ Combust*. 2004; 30(3):231–95.
14. Pablo D. Tagle-Salazar, Krishna D.P. Nigam, and Carlos I. Rivera-Solorio. Parabolic trough solar collectors: A general overview of technology, industrial applications, energy market, modeling, and standards. *Green Processing and Synthesis* 2020; 9: 595–649.
15. Burkhardt III J, Heath G, Turchi C. Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives. *Env Sci Technol*. 2011;45(6):2457–64.
16. Klein S, Rubin E. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions, water and land use for concentrated solar power plants with different energy backup systems. *Energ Policy*. 2013;63:935–50.

17. Scalco P., Copetti J. C., Macagnan M. H., Oliveira J. D. Linear Fresnel Solar Collector Concentrator – A review. 26th International Congress of Mechanical Engineering. 2021. Brazil.
18. Webler, L. C., Macagnan, M. H., and Copetti, J. B., 2019. “Study of the geometric efficiency of a linear Fresnel reflector”. Conference Proceedings of 1st Franco-AMSUD Energy and Environment Meeting, Marseille, France, March 18 - 21, 2019.
19. Mertins, M. Technische und wirtschaftliche analyse von horizontalen Fresnelkollektoren. Universität Karlsruhe. 2009.
20. Barbón, A., Bayón-Cueli, C., Bayón, L. and Ayuso, P. F., 2020. “Influence of solar tracking error on the performance of a small-scale linear Fresnel reflector”. Renewable Energy, Vol. 162, pp. 43-54.
21. Salem Ghazzi and Rabah Boukhanouf. A Review of Small Scale Distributed Power Generation Technologies Using Solar Energy Driven Stirling Engine. International Conference on Environmental Science and Technology, 2014. pp. 129-135.
22. Internet resource - ENERGY MATTERS. Solar Power Tower: Use Molten Salt as an Energy Storage System. Access mode: <https://www.energymatters.com.au/renewable-news/solar-power-tower-use-molten-salt-as-an-energy-storage-system/>
23. Falahat, F. M., Gomaa, M. R. (2022). A review study on solar tower using different heat transfer fluid. Technology Audit and Production Reserves, 5 (1 (67)), 00–00. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.267560>
24. International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2014. Bonn, Germany: IRENA Publications; 2015. [cited 2020 Aug 19]. Available from: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf
25. Hafez AZ, Soliman A, El-Metwally KA, Ismail IM (2017) Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and

- applications. *Renew Sustain Energy Rev* 67:1019–36.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.077>
26. Azzouzi D, Boumeddane B, Abene A, Said N (2015) Experimental and parametric study of a solar paraboloid designed to receive a stirling engine. *Mech Indust* 16(2). <https://doi.org/10.1051/meca/ 2014082>
 27. Stoudenets, V. and Slavinska, K. 2019. NUMERICAL CALCULATION OF PARABOLIC AND PARABOLIC THROUGH CONCENTRATOR PARAMETERS FOR THE SOLAR POWER SYSTEM BASED ON STIRLING ENGINE. *Vidnovluvana energetika* . 1(56) (Mar. 2019), 36-44. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.1\(56\).36-44](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.1(56).36-44).
 28. Студенець, В. П., Пасічний, В. В., Остапенко, С. О., & Миротюк, П. А. (2011). Дослідницький стенд «сонячний концентратор–двигун Стірлінга та його базові характеристики. *Відновлювана енергетика*, (1), 24.
 29. Gholamalizadeh Ehsan, Chung Jae Dong (2017) Design of the collector of a solar dish-Stirling system: a case study. *IEEE Access* 5:20754–62. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758354>
 30. Bellos Evangelos, Bousi Erion, Tzivanidis Christos, Pavlovic Sasa (2019) Optical and thermal analysis of diferent cavity receiver designs for solar dish concentrators. *Energy Convers Manag*: X 2(June):100013. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100013>
 31. Leutz R, Suzuki A, Akisawa A, Kashiwagi T. Developments and designs of solar engineering Fresnel lenses. Hong Kong, China. In: *Proceedings Symposium on Energy Engineering (SEE 2000)*, vol. 2. 2000. p. 759–65.
 32. Ferriere, A.; Rodríguez, G.P. & Sobrino, J.A. (2004). Flux distribution delivered by a fresnel lens used for concentrating solar energy, *Journal of Solar Energy Engineering*, 126, 1, 654-660, ISSN 0199-6231
 33. Shen Liang, Qian He, Hongfei Zheng, Zhiyong Zhao, Huifang Kang, Xinglong Ma, Ge Wang. Optical and thermal performance of a uniaxial bidirectional tracked linear-focusing Fresnel lens solar concentrator. *International journal of energy research*, vol. 44. 2022, p.18768-18780.

34. Luis Rafael Sanchez Vega. Modeling and experimental evaluation of a small-scale fresnel solar concentrator system. *Renewables: Wind, Water and Solar a SpringerOpen Journal*. 2016.
35. Tsung Chieh Cheng, Chao Kai Yang and I Lin. Biaxial-Type Concentrated Solar Tracking System with a Fresnel Lens for Solar-Thermal Applications. *Applied Sciences*, 2016.
36. Sarah El Himer, Salima Al Ayane, Ali Ahaitouf. Optical modeling and Performance Design Of A Fresnel Lens For CPV Units. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 937, 2020.
37. Image Formation By Lenses. URL: <https://shiken.ai/physics/image-formation-by-lenses> (Дата звернення: 03.03.2024).
38. LibreTexts. Physics. Image Formation by Thin Lenses. URL: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Physics_\(Boundless\)/24%3A_Geometric_Optics/24.3%3A_Lenses](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Physics_(Boundless)/24%3A_Geometric_Optics/24.3%3A_Lenses) (Дата звернення: 23.03.2024).
39. Solar System Sizes and Distances. URL: https://www.jpl.nasa.gov/edu/pdfs/scalesless_reference.pdf (Дата звернення: 23.03.2024).
40. Table of Total Emissivity. URL: https://www.academia.edu/22294514/Table_of_Total_Emissivity (Дата звернення: 06.04.2024).
41. Absorbed Solar Radiation by Material. Engineering ToolBox. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/solar-radiation-absorbed-materials-d_1568.html (Дата звернення: 06.04.2024).
42. Asrori, A., Susilo, S. H. (2022). The development of Fresnel lens concentrators for solar water heaters: a case study in tropical climates. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 3–10. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002441>.
43. 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>.

44. 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>.
45. 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>.
46. Bondarenko , D. 2024. DEVELOPING ELECTRICAL MODELS TO SIMULATE THE CONVERSION OF SOLAR RADIATION INTO ELECTRICAL AND THERMAL ENERGY . *Vidnovluvana energetika.* 4(79) (Dec. 2024), 59-63. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).59-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).59-63).
47. Bondarenko , D. and Matyakh , S. 2025. RESEARCH ON THE STABILITY AND SIMULATION OF THE ELECTRICAL AND THERMAL PARTS OF A HYBRID PHOTOVOLTAIC THERMAL COLLECTOR. *Vidnovluvana energetika.* 2(81) (Jun. 2025), 106-113. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).106-113](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).106-113).
48. Joseph Adhemar, Araoz Ramos. Thermodynamic analysis of Stirling engine systems. Doctoral thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Department of Energy Technology, Division of Heat and Power Technology, Stockholm, 2015.
49. B. Kongtragool and S. Wongwises, "A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 7, no. 2. Pergamon, pp. 131–154, Apr. 01, 2003, doi: 10.1016/S1364-0321(02)00053-9
50. D. G. Thombare and S. K. Verma, "Technological development in the Stirling cycle engines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 1. Pergamon, pp. 1–38, Jan. 01, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2006.07.001.

51. F. Ahmed, H. Huang, S. Ahmed, and X. Wang, “A comprehensive review on modeling and performance optimization of Stirling engine,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 8, pp. 6098–6127, Jun. 2020, doi: 10.1002/er.5214.
52. R. Dyson, S. Wilson, and R. Tew, “Review of Computational Stirling Analysis Methods,” in *2nd International Energy Conversion Engineering Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
53. M. Ni, “Improved Simple Analytical Model and experimental study of a 100 W β -type Stirling engine,” *Appl. Energy*, vol. 169, pp. 768–787, May 2016, doi:10.1016/j.apenergy.2016.02.069.
54. Anas Siddique. A solar powered Stirling engine for a display mechanism. Faculty of engineering and technology multimedia university, Sep 2020.
55. I. Urieli and D. M. Berchowitz, *Stirling cycle engine analysis*. Bristol: Hilger Ltd., 1984.
56. MATLAB Help Center. Gamma Stirling Engine. URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/gamma-stirling-engine.html> (Дата звернення: 12.10.2025).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати:

1. Головка В.М., Бережнюк М.М. Аналіз концентраційних установок сонячного випромінювання для забезпечення роботи двигуна Стірлінга. *Відновлювана енергетика*, 2023. – №3 – с.18-31 DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).18-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).18-31).

2. Головка В.М., Бережнюк М.М. Аналіз зміни відстані лінзи Френеля до концентраційної поверхні для забезпечення функціонування двигуна Стірлінга. *Відновлювана енергетика*, 2024. – №2 – с.32-40 DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).32-40](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).32-40).

3. Головка В.М., Бережнюк М.М. Оцінка доцільності використання додаткового джерела енергії для забезпечення стабільної роботи двигуна Стірлінга. *Відновлювана енергетика*, 2025. – №2 – с.75-87 DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).75-87](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).75-87).

4. Головка В.М., Бережнюк М.М. Експериментальне дослідження роботи двигуна Стірлінга з сонячним концентратором та додатковим джерелом енергії. *Енергетика та автоматика*, 2025. – №4 – с.99-120 DOI: [https://doi.org/10.31548/energiya4\(80\).2025.099](https://doi.org/10.31548/energiya4(80).2025.099).

Наукові праці апробаційного характеру:

1. Бережнюк М.М., Головка В.М. Сонячна термодинамічна електроустановка на основі двигуна Стірлінга. *Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 22 грудня 2022 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. – Харків: 2022. – с.27-28. Режим доступу: <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2023/01/tezy-conf-22-12-22n.pdf>.*

2. Головка В.М., Бережнюк М.М. Концентраційна установка сонячного випромінювання на основі лінзи Френеля для забезпечення роботи двигуна Стірлінга. *XXV Міжнародна н.-п. конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»* – Київ, 2024. – с.220-222. DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024>.

3. Головка В.М., Бережнюк М.М. Стабілізація роботи двигуна Стірлінга при змінному надходженні сонячного випромінювання. *XXVI Міжнародна н.-п. конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»* – Київ, 2025. – с.114-115. DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.21-23.05.2025>.

4. Головка В.М., Бережнюк М.М. Моделювання й аналіз роботи двигуна Стірлінга в умовах нестабільного надходження теплоти. *Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 5 листопада 2025 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. – Харків: 2025. – с.64-65. Режим доступу: <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2025/11/conf-05-11-25-tezy.pdf>.*

Співавтором наукових праць за темою дисертації є науковий керівник – Головка Володимир Михайлович, який здійснював наукові консультації, брав участь у постановці задач дослідження, обговоренні результатів та виконував роботи редакційного характеру. Дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок.

ДОДАТОК Б. СКРИПТ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ МОДЕЛІ ДВИГУНА СТІРЛІНГА (GAMMASTIRLINGENGINEPARAMS.M)

%% Структури параметрів

```
geometry = struct();
crank_wheel = struct();
heat_source = struct();
ambient = struct();
displacer_piston = struct();
regenerator = struct();
passage_pipe = struct();
power_piston = struct();
impulse_torque = struct();
state_init = struct();
```

%% Геометрія

```
geometry.displacer_piston.radius = 6e-3;
geometry.displacer_piston.radius_head = 5.84e-3;
geometry.displacer_piston.length = 36e-3;
geometry.displacer_piston.steel_thickness = 1.6e-3;
```

```
geometry.power_piston.radius = 6e-3;
geometry.passage_pipe.length = 12e-3;
geometry.passage_pipe.radius = 0.9e-3;
```

```
geometry.wheel.radius = 18e-3;
geometry.wheel.thick = 2e-3;
geometry.cooler.length = 10.8e-3;
```

%% Кривошипно-шатунний механізм

```
crank_wheel.slidercrank_disp.crank_radius = 2.3e-3;
crank_wheel.slidercrank_disp.rod_length = 18e-3;
```

```
crank_wheel.slidercrank_pow.crank_radius = 4e-3;
crank_wheel.slidercrank_pow.rod_length = 24e-3;
```

```
rho = 7850; % Сталь [кг/м^3]
thick = geometry.wheel.thick;
rad = geometry.wheel.radius;
```

```
crank_wheel.wheel_mass = rho * thick * pi * rad^2;
crank_wheel.wheel_inertia = 0.5 * crank_wheel.wheel_mass * rad^2;
```

```
tau_damp = 0.03 / (1/5); % = 0.15
crank_wheel.rot_damp = log(4) * crank_wheel.wheel_inertia / tau_damp;
```

%% Навколишнє середовище

```
rad_ext = geometry.displacer_piston.radius +
geometry.displacer_piston.steel_thickness;
rad_int = geometry.displacer_piston.radius;
fins_factor = 4;
```

```
ambient.Temperature = 300;
ambient.pext = 0.101325;
```

```

ambient.Fins.cp = 500;
ambient.Fins.m = 0.35 * rho * geometry.cooler.length * ...
                pi * ((rad_ext * 1.5)^2 - rad_ext^2);

ambient.ConvAmbient2Fins.h = 35;
ambient.ConvAmbient2Fins.area = 2 * pi * rad_ext * geometry.cooler.length *
fins_factor;

ambient.ConvFins2Gas.h = 110;
ambient.ConvFins2Gas.area = 2 * pi * rad_int * geometry.cooler.length + pi *
rad_int^2;

ambient.Fins.Tinit = ambient.Temperature;

%% Початкові умови

state_init.T0 = 300;
state_init.p0 = 0.43 * ambient.pext;

%% Джерело теплоти (Heat Source)

rad_ext = geometry.displacer_piston.radius +
geometry.displacer_piston.steel_thickness;
rad_int = geometry.displacer_piston.radius;
L = geometry.displacer_piston.length;

heat_source.Temperature = 1273;
heat_source.Steel.cp = 500;
heat_source.Steel.m = 0.5 * rho * L * pi * (rad_ext^2 - rad_int^2);

heat_source.ConvHeater2Steel.h = 120;
heat_source.ConvHeater2Steel.area = 2 * pi * rad_ext * (L -
geometry.cooler.length) + pi * rad_ext^2;

heat_source.ConvSteel2Gas.h = 100;
heat_source.ConvSteel2Gas.area = 2 * pi * rad_int * (L - geometry.cooler.length)
+ pi * rad_int^2;

heat_source.Steel.Tinit = ambient.Temperature;
heat_source.TemperatureDecreaseStart = 305;
heat_source.TemperatureDecreaseEnd = 365;

%% Поршень-витискувач

displacer_piston.piston.area_intf = pi * geometry.displacer_piston.radius^2;
displacer_piston.piston.xini_cooler =
+crank_wheel.slidercrank_disp.crank_radius;
displacer_piston.piston.xini_heater = -
crank_wheel.slidercrank_disp.crank_radius;
displacer_piston.piston.vol_dead = 0.1 * 2 *
crank_wheel.slidercrank_disp.crank_radius * ...
                pi * geometry.displacer_piston.radius^2;

displacer_piston.hardstop.upbound = 1.03 * 2 *
crank_wheel.slidercrank_disp.crank_radius;
displacer_piston.hardstop.lowbound = -1.03 * 2 *
crank_wheel.slidercrank_disp.crank_radius;

%% Регенератор

```

```

A = pi * (geometry.displacer_piston.radius^2 -
geometry.displacer_piston.radius_head^2);
P = 2 * pi * (geometry.displacer_piston.radius +
geometry.displacer_piston.radius_head);

regenerator.geometry.length = geometry.displacer_piston.length - ...
2 * crank_wheel.slidercrank_disp.crank_radius;
regenerator.geometry.area = A;
regenerator.geometry.hydraulic_diam = 4 * A / P;

regenerator.fric_therm.roughness = 15e-6;
regenerator.fric_therm.Re_lam = 2000;
regenerator.fric_therm.Re_tur = 4000;

regenerator.m = 0.5 * rho * pi * (rad_ext^2 - rad_int^2) *
regenerator.geometry.length;
regenerator.conductionCooler.k = 870;
regenerator.conductionHeater.k = 870;
regenerator.Tinit = ambient.Temperature;

%% Канал з'єднання

passage_pipe.geometry.length = geometry.passage_pipe.length;
passage_pipe.geometry.area = pi * geometry.passage_pipe.radius^2;
passage_pipe.geometry.hydraulic_diam = 2 * geometry.passage_pipe.radius;
passage_pipe.fric_therm.roughness = 15e-6;
passage_pipe.fric_therm.Re_lam = 2000;
passage_pipe.fric_therm.Re_tur = 4000;

%% Робочий поршень

power_piston.piston.area_intf = pi * geometry.power_piston.radius^2;
power_piston.piston.vol_dead = 0.04 * 2 *
crank_wheel.slidercrank_pow.crank_radius * ...
pi * geometry.power_piston.radius^2;
power_piston.hardstop.upbound = 1.02 * 2 *
crank_wheel.slidercrank_pow.crank_radius;
power_piston.hardstop.lowbound = -0.02 * 2 *
crank_wheel.slidercrank_pow.crank_radius;

%% Імпульсний момент

dt = 0.1;
deltaOm = 800 * (1/5);

impulse_torque.t_start = 300;
impulse_torque.t_end = impulse_torque.t_start + dt;
impulse_torque.torque = deltaOm * crank_wheel.wheel_inertia / dt;

impulse_torque_second.t_start = 4040;
impulse_torque_second.t_end = impulse_torque_second.t_start + dt;
impulse_torque_second.torque = impulse_torque.torque * 1240;

R_high = 1e6; % 32e-1

flame.TemperatureDecreaseStart = 305;
flame.TemperatureDecreaseEnd = 605;

```

ДОДАТОК В. СКРИПТ МІКРОКОНТРОЛЕРА ARDUINO UNO

/*

Використовуються датчики:

- MAX6675 (температура)
- INA219 (струм, напруга, потужність)
- Фоторезистор (інсоляція)

Автор: Mykola Berezhniuk

Версія: 2.0 (production)

*/

```
#include <SPI.h>
```

```
#include "max6675.h"
```

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <Adafruit_INA219.h>
```

```
// ----- Константи -----
```

```
constexpr int THERMO_DO_PIN = 12; // SO (MISO)
```

```
constexpr int THERMO_CS_PIN = 10; // CS (Chip Select)
```

```
constexpr int THERMO_CLK_PIN = 13; // SCK (Serial Clock)
```

```
constexpr int LDR_PIN = A0; // Фоторезисторний модуль
```

```
constexpr float LDR_CALIBRATION = 1080.0; // Калібрування для інсоляції (Вт/м²)
```

```
constexpr int SAMPLE_COUNT = 10; // Кількість вимірів для усереднення
```

```
constexpr unsigned long LOOP_DELAY_MS = 1000; // Період вимірювання
```

```
// ----- Об'єкти -----
```

```
MAX6675 thermocouple(THERMO_CLK_PIN, THERMO_CS_PIN, THERMO_DO_PIN);
```

```
Adafruit_INA219 ina219;
```

```
// ----- Ініціалізація -----
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(115200);
```

```
    delay(500);
```

```
// --- MAX6675 ---
```

```

float testTemp = thermocouple.readCelsius();
if (isnan(testTemp)) {
    Serial.println("ERR: MAX6675 не відповідає або не підключено.");
}

// --- INA219 ---
if (!ina219.begin()) {
    Serial.println("ERR: Не вдалося знайти INA219. Перевірте з'єднання SDA/SCL.");
    while (true); // Зупиняємось, якщо немає сенсу продовжувати
}
ina219.setCalibration_16V_400mA();

// --- Заголовок CSV ---
Serial.println("Temperature_C,Voltage_V,Current_mA,Power_mW,Irradiance_Wm2");
}

// ----- Основний цикл -----
void loop() {
    float temperatureC = averageTemperature();
    float busVoltage = ina219.getBusVoltage_V();
    float current_mA = ina219.getCurrent_mA();
    float power_mW = ina219.getPower_mW();
    float irradiance = readIrradiance();

    // Фільтр: відсікання шуму INA219
    if (fabs(current_mA) < 2.0) current_mA = 0.0;

    // Вивід CSV
    Serial.print(temperatureC, 2);
    Serial.print(",");
    Serial.print(busVoltage, 3);
    Serial.print(",");
    Serial.print(current_mA, 2);
    Serial.print(",");
    Serial.print(power_mW, 2);

```

```

Serial.print(",");
Serial.println(irradiance, 2);

delay(LOOP_DELAY_MS);
}

// ----- Допоміжні функції -----

// Усереднення температури для стабільності показів
float averageTemperature() {
    float sum = 0;
    for (int i = 0; i < SAMPLE_COUNT; i++) {
        float t = thermocouple.readCelsius();
        if (!isnan(t)) sum += t;
        delay(10);
    }
    return sum / SAMPLE_COUNT;
}

// Розрахунок інсоляції з фоторезистора
float readIrradiance() {
    long total = 0;
    for (int i = 0; i < SAMPLE_COUNT; i++) {
        total += analogRead(LDR_PIN);
        delay(5);
    }
    float avgSensorValue = total / float(SAMPLE_COUNT);
    return LDR_CALIBRATION * (1023.0 - avgSensorValue) / 1023.0;
}

```

ДОДАТОК Г. СКРИПТ NODE.JS СЕРВЕРА

```
/**
 * Production-ready Node.js сервер для збору даних з Arduino Uno
 * і надсилання їх у Google Sheets через Google Apps Script.
 *
 * Автор: Mykola Berezhniuk
 * Версія: 2.0 (production)
 */

import dotenv from 'dotenv';
import axios from 'axios';
import { SerialPort } from 'serialport';
import { ReadlineParser } from '@serialport/parser-readline';

dotenv.config();

// ----- Конфігурація -----
const SERIAL_PORT = process.env.SERIAL_PORT || '/dev/cu.usbserial-A5069RR4';
const BAUD_RATE = parseInt(process.env.BAUD_RATE || '115200', 10);
const GOOGLE_SCRIPT_URL = process.env.GOOGLE_SCRIPT_URL;

if (!GOOGLE_SCRIPT_URL) {
  console.error('✗ GOOGLE_SCRIPT_URL не задано у .env');
  process.exit(1);
}

// ----- Ініціалізація Serial -----

let port;
let parser;

function initSerial() {
  try {
    port = new SerialPort({ path: SERIAL_PORT, baudRate: BAUD_RATE });
    parser = port.pipe(new ReadlineParser({ delimiter: '\n' }));
  }
}
```

```

port.on('open', () => console.log(`✔ Підключено до ${SERIAL_PORT} @ ${BAUD_RATE} baud`));

port.on('error', (err) => console.error(`✖ Помилка SerialPort:`, err.message));

port.on('close', () => {
    console.warn(`⚠ Порт закрито. Повторна спроба через 5 секунд...`);
    setTimeout(initSerial, 5000);
});

parser.on('data', handleSerialData);
} catch (err) {
    console.error(`✖ Не вдалося ініціалізувати порт:`, err.message);
    setTimeout(initSerial, 5000);
}
}

initSerial();

// ----- Обробка даних -----

async function handleSerialData(line) {
    const trimmed = line.trim();
    if (!trimmed || !trimmed.includes(',')) return;

    try {
        const [temperature, voltage, current, power, irradiance] = trimmed.split(',').map(parseFloat);
        const timestamp = new Date().toISOString();

        const data = {
            timestamp,
            temperature: temperature.toFixed(2),
            voltage: voltage.toFixed(3),
            current: current.toFixed(2),
            power: power.toFixed(2),
            irradiance: irradiance.toFixed(2),
        };

        console.log(`☞ Дані отримано:`, data);
    }
}

```

```

    await sendToGoogle(data);
  } catch (err) {

    console.error('✖ Помилка при парсингу рядка:', trimmed, err.message);

  }
}

// ----- Надсилання даних -----

async function sendToGoogle(data) {
  try {
    const response = await axios.get(GOOGLE_SCRIPT_URL, {
      params: {
        ...data,
        // Для сумісності з Google Sheets (де десяткові коми)
        temperature: data.temperature.replace('.', ','),
        voltage: data.voltage.replace('.', ','),
        current: data.current.replace('.', ','),
        power: data.power.replace('.', ','),
        irradiance: data.irradiance.replace('.', ','),
      },
      timeout: 5000,
    });

    if (response.status === 200) {
      console.log('✓ Дані надіслані: ${response.data}');
    } else {
      console.warn('⚠ Відповідь Google Scripts: ${response.status}');
    }
  } catch (err) {
    console.error('✖ Помилка при надсиланні: ${err.message}');
  }
}

```

ДОДАТОК Г. СКРИПТ GOOGLE APPS SCRIPT

```
/**
 * Production-ready Google Apps Script для отримання даних з Arduino
 * і запису їх у Google Sheet.
 *
 * Автор: Mykola Berezhniuk
 * Версія: 2.0
 */

function doGet(e) {
  const ss = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet();
  const sheet = ss.getSheetByName("Data") || ss.getActiveSheet();
  const logSheet = ss.getSheetByName("Logs") || ss.insertSheet("Logs");

  const params = e.parameter;

  try {
    // Логування отриманих параметрів
    Logger.log("Received parameters: " + JSON.stringify(params));

    // Перевірка обов'язкових параметрів
    const requiredFields = ["temperature", "voltage", "current", "power", "irradiance"];
    const missingFields = requiredFields.filter(field => !params[field]);
    if (missingFields.length > 0) {
      const msg = `Missing parameters: ${missingFields.join(", ")}`;
      logSheet.appendRow([new Date(), "PARAMETER_ERROR", msg, JSON.stringify(params)]);
      return ContentService
        .createTextOutput(JSON.stringify({ status: "error", message: msg }))
        .setMimeType(ContentService.MimeType.JSON);
    }

    // Парсинг числових параметрів
    const temperature = parseFloat(params.temperature.replace(",", "."));
    const voltage = parseFloat(params.voltage.replace(",", "."));
    const current = parseFloat(params.current.replace(",", "."));
```

```

const power = parseFloat(params.power.replace(",", "."));
const irradiance = parseFloat(params.irradiance.replace(",", "."));
const timestamp = params.date ? new Date(params.date) : new Date();

// Перевірка на NaN
if ([temperature, voltage, current, power, irradiance].some(isNaN)) {
    const msg = "One or more parameters are not valid numbers";
    logSheet.appendRow([new Date(), "PARSE_ERROR", msg, JSON.stringify(params)]);
    return ContentService
        .createTextOutput(JSON.stringify({ status: "error", message: msg }))
        .setMimeType(ContentService.MimeType.JSON);
}

// Запис у лист Data
sheet.appendRow([timestamp, temperature, voltage, current, power, irradiance]);

// Повернення успішної відповіді
return ContentService
    .createTextOutput(JSON.stringify({ status: "success", message: "Data received" }))
    .setMimeType(ContentService.MimeType.JSON);

} catch (error) {
    // Логування помилки у лист Logs
    logSheet.appendRow([new Date(), "EXCEPTION", error.message, JSON.stringify(params)]);
    return ContentService
        .createTextOutput(JSON.stringify({ status: "error", message: error.message }))
        .setMimeType(ContentService.MimeType.JSON);
}
}

```

ДОДАТОК Д. АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ ТА ВИКОРИСТАННЯ НАУКОВИХ І ПРАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету
механіки, енергетики та
інформаційних технологій
Львівського національного
університету ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С.З. Гжицького
канд. техн. наук, професор

С. Й. Ковалишин



12 2025 р.

АКТ

впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Бережнюка Миколи Миколайовича на тему «Термоелектрична установка на
основі двигуна Стірлінга», що готується на здобуття освітньо-наукового рівня
доктор філософії зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

Акт складено тому, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи Бережнюка Миколи Миколайовича на тему «Термоелектрична установка на основі двигуна Стірлінга» використовуються у навчальному процесі на кафедрі енергетики факультету механіки, енергетики та інформаційних технологій Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.

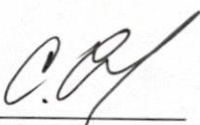
Бережнюк М. М. у рамках дисертаційного дослідження розробив методику вибору геометричних параметрів лінзи Френеля та визначення точності її позиціонування відносно нагрівача двигуна Стірлінга. А також методику енергетичного розрахунку доцільності застосування додаткового джерела енергії залежно від рівня та тривалості зниження інсоляції.

Впровадження зазначених методик у навчальний процес дає змогу поглибити підготовку здобувачів вищої освіти з дисциплін, пов'язаних із сонячною енергетикою, теплотехнікою та систем керування. Методики можуть бути використані для виконання лабораторних робіт, проєктних завдань і наукових досліджень, сприяючи формуванню практичних навичок

модельовання, аналізу та оптимізації концентраційних систем. Це підвищує науково-методичний рівень навчального процесу та розширює можливості прикладної підготовки студентів.

Отримані М. М. Бережнюком наукові та практичні результати використовуються при проведенні лекційних занять, практичних та лабораторних робіт з дисциплін "Засоби та обладнання відновлюваної енергетики" та "Проектування засобів та систем відновлюваної енергетики" для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, "Сонячна енергетика" та "Проектування, монтаж та експлуатація систем відновлюваної енергетики" спеціальності 145 Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика (бакалаврський рівень), а також у дипломному проектуванні за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Завідувач кафедри енергетики,
канд. техн. наук, доцент


С. В. Сиротюк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету
електроенерготехніки та
автоматики Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
доктор техн. наук, професор



В.І. Будько
2025р.

АКТ

впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Бережнюка Миколи Миколайовича на тему «Термоелектрична установка на
основі двигуна Стірлінга», що готується на здобуття освітньо-наукового рівня
доктор філософії зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

Акт складено тому, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи Бережнюка Миколи Миколайовича на тему «Термоелектрична установка на основі двигуна Стірлінга» використовуються у навчальному процесі на кафедрі відновлюваних джерел енергії факультету електроенергетики та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Бережнюк М. М. в рамках дисертаційної роботи розробив імітаційну модель в середовищі Simulink для дослідження та оптимізації електричних систем на основі двигуна Стірлінга, а також експериментальний стенд з програмним забезпеченням для перевірки результатів моделювання, дослідження реакції двигуна Стірлінга на коливання рівня сонячного випромінювання та оцінювання доцільності застосування додаткового джерела енергії.

Впровадження розробленої імітаційної моделі та експериментального стенду у навчальний процес забезпечує можливість проведення лабораторних робіт і наукових досліджень, спрямованих на аналіз та оптимізацію

електричних систем на основі двигуна Стірлінга. Застосування створеної моделі та експериментального стенду дозволяє скоротити час на виконання досліджень, розширити експериментальну базу та створює ефективні умови для формування практичних навичок у студентів і здобувачів вищої освіти.

Отримані М. М. Бережнюком наукові та практичні результати використовуються при проведенні лекційних занять та лабораторних робіт з дисциплін «Низькопотенційні джерела енергії» та «Технічна термодинаміка» (бакалаврський рівень), а також у дипломному проектуванні за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Завідувач кафедри ВДЕ,
докт. техн. наук, професор



О.В. Остапчук

ПОДЯКА

Висловлюю щирю подяку своєму науковому керівнику, доктору технічних наук, професору Головку Володимирі Михайловичу – за професійне наставництво, ґрунтовні рекомендації та послідовну методичну підтримку впродовж виконання дослідження. Високо ціную конструктивний характер співпраці та дружні взаємини, що сформувалися в процесі підготовки роботи.

Окремо висловлюю подяку своїм батькам – Бережнюку Миколі Васильовичу та Бережнюк Ларисі Василівні – за всебічну підтримку, розуміння та створення сприятливих умов для навчання й професійного розвитку.

Щирі слова подяки висловлюю своїй дружині – Бережнюк Василені Вікторівні – за терпіння, підтримку та розуміння впродовж усього періоду підготовки дисертації.

Також висловлюю подяку своєму другові, однокласнику та одногрупнику – Козельцю Миколі Івановичу – за надану допомогу під час проведення експериментальних досліджень.