

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка системи енергозабезпечення із двигуном Стірлінга

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр, назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр, назва
Освітня програма «Електропобутова техніка»

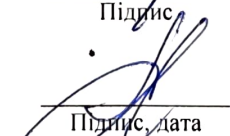
Шифр МРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТмз-22-1


Підпис

Є. В. Неймак
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

О. С. Поліщук
Ініціали, прізвище


Нормоконтролер


Підпис, дата

доц. Поліщук
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС
24 12 2023 р.


Підпис, дата

О. С. Поліщук
Ініціали, прізвище

Хмельницький 2023

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

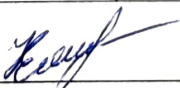
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

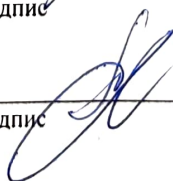
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих з технологічних та технічних рішень тематики магістерської роботи.	до 30.10.23р.	
2. Розробка конструкції сонячного концентратора параболоїдного типу із двигуном Стірлінга	до 10.11.23р.	
3. Експериментальні дослідження сонячного концентратора параболоїдного типу із двигуном Стірлінга	до 20.11.23р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.23р.	

Студент


Підпис

Є.В. Неймак
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

О.С. Поліщук
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Неймак Свгенія Володимирівна

2. Тема магістерської роботи Розробка системи енергозабезпечення із двигуном Стірлінга

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента Ворошич Г.Р. к.т.н.

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 8 арк., сторінок записки 74

5. На сьогоднішній день важливий вплив на формування економічної ситуації в Україні має енергетичний фактор. Тому альтернативні джерела енергії є одним із пріоритетних напрямків економічного розвитку України. Такими джерелами є сонячна, вітрова геотермальна енергетика. Енергія сонця, що потрапляє на поверхню нашої планети, має колосальну потужність. Сонячне випромінювання за тиждень за потужністю перевершує всі нині відомі світові запаси нафти, урану і вугілля разом узяті. Крім того, сонячна енергія - екологічно чиста, при її виробленні не утворюється вуглекислий газ, вона повністю радіаційно безпечна і не вимагає подальшої утилізації відходів. Удосконалення технології призвело до того що сонячна енергія стала найдешевшою серед інших альтернативних видів енергії. В магістерській роботі здійснюється розробка системи енергозабезпечення із двигуном Стірлінга, що є актуальним як для домашнього використання, так і для навчальних потреб. В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому розділі розроблено конструкцію системи енергозабезпечення із двигуном Стірлінга. В третьому розділі проведено експериментальні дослідження сонячного концентратора параболоїдного типу із двигуном Стірлінга.

Підпис студента _____
"23" 12 2023 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол БЗ від "29" 12 2023 р.

Оцінка проекту ЕК визначено 5,0 / А
Рекомендації ЕК _____

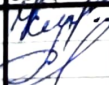
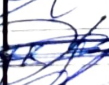


Особливі відмітки _____
Технічний секретар А

"29" 12 2023 р.

ЗМІСТ

	Вступ		5
1	Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи		7
1.1	Перспективи застосування двигунів Стірлінга в автономній енергетиці XXI століття		7
1.2	Сучасні області застосування енергетичних установок із двигунами Стірлінга		11
1.3	Конструкції існуючих сонячних концентраторів		24
	Висновки до першого розділу		28
2	Розробка конструкції сонячного концентратора параболоїдного типу із двигуном Стірлінга		29
2.1	Розрахунок параметрів сонячного концентратора		30
2.2	Опис конструкції двигуна Стірлінга УДС-1		42
2.3	Вибір електрогенератора для експериментальної установки		53
	Висновки до другого розділу		55
3	Експериментальні дослідження сонячного концентратора параболоїдного типу із двигуном Стірлінга		56
3.1	Експериментальні дослідження системи сонячний концентратор-двигун Стірлінга-електрогенератор		56
3.2	Статичні характеристики двигуна УДС-1		60
	Висновки до третього розділу		67
	Загальні висновки		69
	Перелік джерел посилання		70

МРМА 23.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Неймак С.В.			Розробка системи енергозабезпечення із двигуном Стірлінга	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Поліщук О.С.				4	74	
Н.контр					ХНУ гр.ЕТмз-22-1			
Перевір		Поліщук О.С.						

ВСТУП

Актуальність роботи На сьогоднішній день енергетичні фактори мають важливий вплив на економічну ситуацію в Україні. Тому альтернативні джерела енергії є одним із пріоритетних напрямів економічного розвитку України. До таких джерел енергії належать сонячна, вітрова та геотермальна енергія.

Енергія сонця, що досягає поверхні Землі, величезна. Кількість сонячного випромінювання за тиждень перевищує всі відомі на сьогоднішній день запаси нафти, урану і вугілля у світі разом узяті. Крім того, сонячна енергія не завдає шкоди навколишньому середовищу: вона не виділяє вуглекислого газу, не використовує радіацію і не потребує утилізації відходів. Удосконалення технологій зробило сонячну енергію найдешевшою з усіх інших альтернативних джерел енергії.

Цілі та завдання дослідження Метою дослідження є визначення характеристик і параметрів параболічного концентратора з використанням двигуна Стірлінга.

Завдання магістерської дисертації.

- Проаналізувати наявні рішення щодо використання сонячних концентраторів;
- Проаналізувати наявні конструкції двигунів Стірлінга;
- Розробити математичну модель параболічного сонячного концентратора з двигуном Стірлінга;
- Розробити випробувальний стенд для дослідження ефективності параболічних сонячних концентраторів з двигуном Стірлінга;
- Представити методику вибору максимальних значень продуктивності сонячних електростанцій.

						Арк.
						5
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Поставлені в даній роботі задачі розв'язувалися на основі сучасних математичних методів з використанням класичних теорій механіки, фізики та електротехніки, а також комп'ютерного моделювання.

						Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Перспективи застосування двигунів Стірлінга в автономній енергетиці ХХІ століття

Сьогодні всім очевидно, що одним із головних напрямів розвитку економіки і науково-технічного прогресу в ХХІ столітті є пошук перспективних технологій перетворення енергії та масове виробництво нової техніки на основі високоефективного термодинамічного циклу з використанням поновлюваних видів палива і нових робочих тіл. Це означає створення, виробництво і масове застосування високоефективних та екологічно чистих енергетичних систем, що гарантовано задовольняють мінімальні потреби промисловості та населення в енергії.

У всіх розвинених країнах (переважно в ЄС і США) основою інноваційного розвитку промисловості є завдання переходу на новий технологічний рівень, пов'язане з енергозбереженням, охороною довкілля та зниженням частки традиційних енергоресурсів. Наприклад, до 2025 року понад 20 % енергії в ЄС буде вироблятися з альтернативних і поновлюваних видів палива. Для вирішення цих завдань, на думку багатьох міжнародних експертів, найперспективнішим напрямком є розробка, виробництво і широке впровадження систем перетворення енергії на основі двигуна Стірлінга.

Термодинамічний цикл двигуна, що розглядається, був запропонований шотландцем Робертом Стірлінгом 1816 року. Термодинамічні коефіцієнти корисної дії ідеальних циклів Стірлінга і Карнауха рівні через існування двох ізотерм. Тому теоретично двигун, що працює за циклом Стірлінга, може бути найефективнішим з усіх наявних типів двигунів.

						Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для них характерні чисті вихлопи, низький рівень шуму через відсутність вибухового горіння, відсутність системи газорозподілу та запалювання і висока паливна економічність. Перші та найінтенсивніші серйозні дослідження зі створення конкурентоспроможного двигуна Стірлінга було проведено 1934 року в компанії Philips в Нідерландах, де було покладено початок.

З 1975 до 1990-х років двигуни Стірлінга розробляли переважно для автомобільних компаній, таких як General Motors, Ford Motors і MAN-BMW, а також для військових. Транспортні двигуни Стірлінга зазвичай були подвійної дії, з лінійним приводом тощо. При створенні транспортних двигунів Стірлінга використовували дорогі матеріали (кобальт, цинк, мідь, нікель тощо), складні технічні проекти унікальних конструктивних елементів, враховували численні цикли старт-стоп, потужність, яка часто змінюється, і жорсткі вимоги до ваги та розмірів. Такий підхід дав змогу домогтися найвищого ККД серед усіх поршневих двигунів, але при цьому значно збільшив вартість виробу. Сьогодні двигуни Стірлінга транспортного типу широко використовують за кордоном в аерокосмічній техніці, будівництві підводних човнів, як джерело енергії для портативних станцій зв'язку диверсійних груп і спецпідрозділів, а також в іншій військовій техніці [2].

Із середини 1990-х років минулого століття розробка двигунів Стірлінга набула широкого поширення в галузі стаціонарних електростанцій. Під час їх постійного виробництва та експлуатації найважливішим показником є вартість, що складається з витрат на виготовлення та обслуговування. Вага і габарити не мають такого вирішального значення для стаціонарних когенераційних установок. Виходячи з цього, в сучасних двигунах Стірлінга реалізовано нові технологічні рішення, що дають змогу значно знизити витрати. Слід зазначити, що низка зарубіжних компаній уже

									Арк.
									8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

розпочала випуск двигунів із технічними характеристиками, що перевершують ДВЗ і газові турбіни, у діапазоні потужностей 1-100 кВт.

Основні технічні характеристики електростанцій на базі двигунів Стірлінга, представлених нині на ринку, залежно від виробника, перебувають у такому діапазоні.

- Питома вартість від 1 300 до 3 000 доларів США за кіловат встановленої потужності;

- Ресурс двигуна від 20 000 до 87 000 годин;

- Ефективний ККД до 45 %. За останні роки ринок двигунів Стірлінга зазнав значних змін. Більшість найбільших енергетичних компаній світу розпочали розробку двигунів Стірлінга, а деякі провідні світові виробники електростанцій, такі як TODEM, Cumminspowergeneration, ToshibaCorp і MitsubishielectricCorp, оголосили про плани розробки двигунів Стірлінга. Наприклад, європейська швейцарсько-німецька компанія "Stirling Systems AG" і великі енергетичні компанії зі США, Японії, Італії та Німеччини (Merloni Termosanitari (MTS Group) (Італія), Bosch Group (Німеччина), Rinnai (Японія), Infinia (США)) [3]), виникли транснаціональні компанії, зокрема й нові потужні об'єднання.

Поява таких великих компаній, що об'єднують значні фінансові та виробничі потужності, пояснюється новими, вищими вимогами до ефективності енергосистем, екологічними міркуваннями та зростаючим попитом на використання поновлюваних і чистих місцевих енергоресурсів. Безсумнівно, в найближчому майбутньому на ринку двигунів Стірлінга і автономних електростанцій загалом спостерігатиметься жорстка конкуренція.

Перспектива використання двигунів Стірлінга в різних галузях енергетики сьогодні очевидна для всіх промислово розвинених країн, і, за даними зарубіжних експертів, наразі щонайменше 140 науково-дослідних інститутів і компаній проводять інтенсивні дослідження в цій галузі.

									Арк.
									9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

Провідними країнами в галузі розроблення та виробництва машин Стірлінга є США, Великобританія, Японія, Німеччина, Швеція і Нідерланди. Крім цих країн, інтенсивні дослідження в галузі двигунів Стірлінга нещодавно почалися в Китаї, ПАР, Австралії, Ізраїлі, Канаді, Індії та багатьох інших країнах. Об'єктивно, за останні 15-20 років у світі почала формуватися нова і перспективна галузь - техніка Стірлінга.

Машина Стірлінга - це машина, що працює за замкнутим термодинамічним циклом, у якій цикли стиснення і розширення відбуваються за різних температурних режимів, а потік робочої рідини регулюється шляхом зміни її об'єму.

Машини Стірлінга являють собою вдалу комбінацію компресорів, детандерів, теплообмінників (навантажувальних теплообмінників (нагрівачів або конденсаторів), регенераторів і охолоджувачів). Як робочу рідину, як правило, використовують гелій, а також азот і повітря.

До переваг машин із циклом Стірлінга належить не тільки енергоефективність, а й високий ступінь екологічності, як щодо робочої рідини машини Стірлінга, так і щодо викидів, що утворюються під час її роботи.

До переваг машин Стірлінга можна віднести низку фундаментальних характеристик, притаманних саме цим машинам, які є реальною передумовою для їхнього широкого застосування практично в усіх галузях промисловості та техніки.

- Універсальність самого термодинамічного циклу дає змогу виготовляти перетворювачі як прямого (електродвигуни), так і зворотного циклу (холодильні та криогенні машини) в різних конструктивних виконаннях;

- Найвища енергоефективність (теоретичний ККД ідеального циклу Стірлінга дорівнює ККД циклу Карно);

- Як робочий орган машини Стірлінга, так і викиди, що утворюються в результаті її роботи, є високоекологічними;

- Багатопаливні двигуни - можливість використовувати як джерела тепла не тільки спалювання традиційних енергоносіїв (наприклад, нафтопродуктів, природного газу), а й сонячне випромінювання, біогаз, деревину, торф і вугілля [4].

Концентрація токсичних речовин у продуктах згорання двигунів Стірлінга майже на два порядки нижча, ніж в інших поршневих і газотурбінних двигунах, тому з усіх двигунів, які випускаються, електростанції, що використовують двигуни Стірлінга, є найбільш екологічно чистими. Найважливішою споживчою особливістю двигунів Стірлінга є те, що вони мають найнижчий рівень шуму, як порівняти з іншими типами наявних двигунів. Нині цей показник для двигунів Стірлінга коливається на рівні 60-65 дБ. Це дає змогу встановлювати генератори Стірлінга в безпосередній близькості від споживача і виключити втрати під час передачі електроенергії.

1.2 Сучасні області застосування енергетичних установок із двигунами Стірлінга

Сучасна світова енергетика розвивається в напрямі децентралізації енергопостачання, сприяючи створенню автономних когенераційних установок і максимальному використанню поновлюваних джерел енергії. Двигуни Стірлінга мають виняткову особливість - вони є двигунами із зовнішнім нагріванням, що дає змогу використовувати всі види альтернативного палива, відомі в сучасному світі, включно з біогазом, вугіллям, деревиною, сільськогосподарськими відходами, сонячною тепловою, ядерною, високопотенційною теплотою вихлопних газів та всіма іншими видами енергії, а також традиційним паливом, і є особливо

						Арк.
						11
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

привабливими з погляду використання енергії з поновлюваних джерел. Двигуни Стірлінга можуть використовуватися в будь-якій галузі, де теплову енергію потрібно перетворити на механічну.

1.2.1 Когенераційні електростанції з двигуном Стірлінга, що працюють на традиційному газовому паливі (природний газ і пропан).

Завдяки високій екологічності та ефективності, двигуни Стірлінга можна використовувати для когенераційних установок (КГУ) потужністю до 100 кВт, що виробляють електрику і тепло одночасно безпосередньо в точці споживання. Це нова технологія комбінованого вироблення тепла та електроенергії, що базується на автономному двигуні та системі рекуперації тепла, яка використовує енергію охолоджувальної води та вихлопних газів для потреб опалення споживачів. Вища ефективність використання двигунів Стірлінга в когенераційних установках порівняно з двигунами внутрішнього згоряння та газовими турбінами зумовлена особливістю теплового балансу, що виражається в різниці між тепловими втратами за рахунок вихлопних газів та охолоджувальної води. У випадку з двигунами Стірлінга цей баланс становить 10 % і 40 % відповідно, що, з огляду на високий ККД самого двигуна, дає змогу створювати компактні та високоефективні когенераційні установки (КГУ). ККД сучасних генераторів Стірлінга зарубіжного виробництва може досягати 95 %, якщо враховувати додаткове тепло, що виділяється.

						Арк.
						12
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Двигун Стірлінга, що працює на природному газі, потужністю 9 кВт

На рис. 1.1 показано двигун Стірлінга потужністю 9 кВт, що працює на природному газі. Двигун є частиною когенераційної установки, що виробляє ще 27 кВт теплової енергії [МРМА 23.00.00.000ДО, рис. 1].

Використання ТЕЦ на базі двигунів Стірлінга дає змогу скоротити витрату палива на виробництво електричної та теплової енергії на 40% порівняно з централізованою подачею. Вартість 1 кВт/год електроенергії, виробленої на когенераційній установці, у 3-4 рази нижча від чинного тарифу централізованої системи електропостачання (в Україні), а тепло практично безкоштовне! При використанні ТЕЦ ринок тепло- і електропостачання може бути ефективно доповнити ринок поставок тепла і електроенергії без необхідності перебудовувати перевантажену стару мережу. Автономна робота когенераційних установок дає змогу постачати споживачам тепло й електроенергію зі стабільними температурними показниками та якісною гарячою водою.

З 2008 року в Німеччині та багатьох інших розвинених країнах реалізується федеральна енергетична програма зі встановлення в будинках і квартирах когенераційних установок із двигуном Стірлінга електричною потужністю 1,5 кВт і більше. На думку німецьких експертів, реалізація цього проекту дала б змогу відмовитися від будівництва в країні трьох великих атомних електростанцій.

1.2.2 Електростанції з двигуном Стірлінга, що використовують тверді біоресурси

Нині, у зв'язку з виснаженням раніше розвіданих запасів і зростанням цін на викопне паливо (нафта і природний газ), багато країн цікавляться можливістю масового виробництва генераторів середніх розмірів (3-100 кВт), модифікованих двигунів Стірлінга для використання місцевого палива. Як місцеве паливо для генераторів Стірлінга можна використовувати торф, подрібнене вугілля, горючий сланець, сільськогосподарські відходи та відходи деревообробки. Вирішення цієї проблеми дасть змогу в найближчому майбутньому забезпечити багато регіонів світу дешевим, оперативним, самопідтримуваним джерелом енергії на місцевому паливі.

Наразі на ринку вже представлені когенераційні установки з двигуном Стірлінга, що працюють на деревній трісці, торфі, біогазі та сільськогосподарських відходах.

Повернення до біоресурсів - це не повернення до минулого, а розумний підхід до економіки та довкілля. Поширення самодостатніх джерел енергії, що працюють на місцевих видах палива, відображає глобальну тенденцію до економії енергії та ресурсів. Найінтенсивніше цей сектор розвивається в країнах із багатими біологічними ресурсами (наприклад, лісами, торфовищами): Швеції, Норвегії, Данії, Фінляндії, Росії, країнах Африки та Південної Америки. На рис. 1.2 показано двигун Стірлінга потужністю 28,5 кВт, що працює на деревній трісці [МРМА 23.00.00.000ДО, рис. 2].

								Арк.
								14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				



Рисунок 1.2 – Двигун Стірлінга, потужністю 28,5 кВт, що працює на деревній трісці

1.2.3 Електростанції з двигунами Стірлінга, що працюють на генераторному газі.

Ще одним застосуванням генераторів Стірлінга на твердій біомасі є використання технології газифікації біомаси. Під час газифікації деревних відходів утворюються паливні гази на основі CO, H₂ і N₂, які можна використовувати як газоподібне паливо для двигунів Стірлінга. При виробництві генераторного газу з деревини його теплотворна здатність зазвичай становить 12-13 МДж/кг, а питома вага - 1,10-1,15 кг/м³. Виробництво газу становить у середньому 1,8-2,5 м³ на кг газифікованої біомаси. Висока ефективність процесу газифікації (вихід газу для генераторів становить 85-90 %) і зручність використання газу як палива роблять газифікацію більш чистим і ефективним методом виробництва тепла, ніж пряме спалювання твердого палива. Ще однією важливою перевагою є те, що для роботи газогенератора можна використовувати низькоякісне паливо, таке як рисове лушпиння, стружка та подрібнена кора.

Переробка деревної тирси шляхом піролізу дає змогу отримувати дешеву енергію. Газові генератори можуть розв'язати проблему забезпечення теплом і електрикою людей, що живуть у невеликих селах або на околицях

великих міст. Демонтовані колоди, кора, деревні відходи від планових рубок і промислові відходи. Найгірші деревні відходи мають низьку калорійність і високий відсоток вологи (до 50 %) і можуть використовуватися для газогенераторів. Розмір тріски, використовуваної як паливо, становить до 30 см.

Газогенератори засновані на принципі перетворення твердого палива в газоподібне під впливом високих температур без доступу кисню. У результаті цього процесу, званого піролізом, утворюється деревний газ, який і виробляє електроенергію. Газогенератори мають дуже просту конструкцію і не потребують спеціально навченого обслуговуючого персоналу. Газогенератор складається з трьох основних частин: газогенераторної камери, камери згоряння і завантажувального бункера. Деталі, що працюють за високих температур, виготовляються з жароміцних матеріалів. Висока рентабельність газових генераторів Стірлінга залежить від низької вартості електричної та теплової енергії, доступності місцевого палива, близькості до споживачів, відсутності дорогих ліній електропередач і підстанцій, екологічної безпеки та мобільності.

1.2.4. електростанції з двигуном Стірлінга, що працюють на сонячній енергії.

Висока ефективність і надійність конструкції двигуна Стірлінга робить його ефективним для використання в сонячних електростанціях (рис. 1.3). Сонячне світло концентрується увігнутих дзеркалом, яке нагріває двигун (як джерело тепла). Навколишнє повітря може використовуватися як теплоносій. Роль таких екологічно чистих джерел енергії в сучасному суспільстві легко зрозуміти. У сонячних електростанціях, що перебувають у практичному використанні, найбільшого ККД досягають установки з параболічними дзеркалами і двигунами Стірлінга [МРМА 23.00.00.000ДО, рис. 3].

									Арк.
									16
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

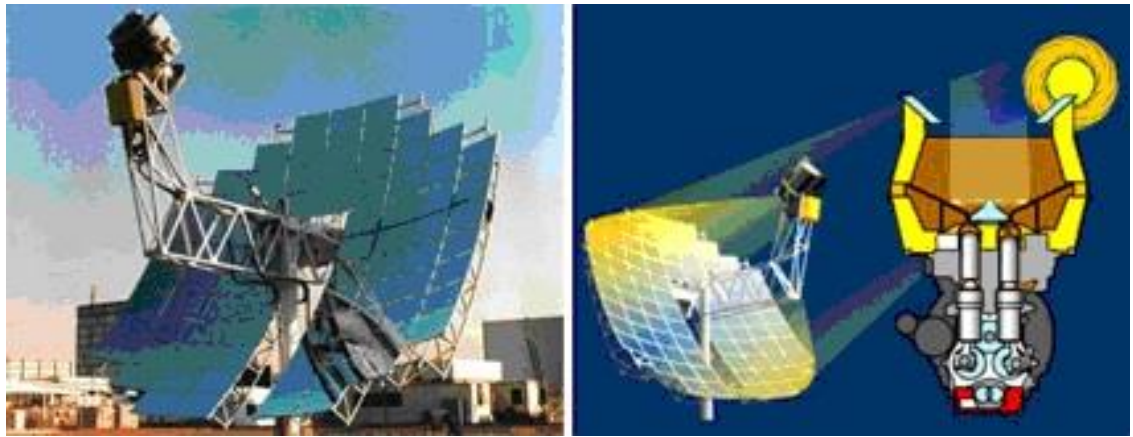


Рисунок 1.3 – Сонячна енергетична установка із двигуном Стірлінга

Одним із найважливіших проєктів у галузі сонячної енергетики, що реалізуються нині, є проєкт будівництва великомасштабної сонячної електростанції на півдні США. Згідно з цим проєктом, на площі 160 квадратних кілометрів у штаті Невада буде створено сонячну енергосистему на основі сонячного двигуна Стірлінга.

В кінцевому підсумку передбачається компактно розмістити десятки тисяч таких установок, які будуть перетворювати сонячну енергію і поставляти електрику в енергорозподільні компанії на південному заході США.

За розрахунками американських фахівців, у разі успіху проєкту на півдні США буде створено ферма сонячних стирлінгів площею 160 x 160 км, здатна забезпечити потреби в електроенергії всієї країни [МРМА 23.00.00.000ДО, рис. 4].



Рисунок 1.4 – Сонячна ферма із двигунами Стірлінга в штаті Невада

Відомо, що низка великих іноземних компаній намагається створити сонячні електростанції з двигунами Стірлінга для космічних кораблів, орбітальних космічних станцій і "місячних баз" з двигунами Стірлінга потужністю від 3 до 200 кВт. Компанія Allison розробила і побудувала космічну сонячну електростанцію з двигуном Стірлінга потужністю 5 кВт. Швидкість обертання двигуна становила $n = 3000$ об/хв, а ККД - 37,5%. Як джерело тепла використовували параболічний концентратор діаметром 5,8 м, що створює температуру 947 К у приймачі. Як радіаційний приймач передбачався тепловий акумулятор, що випромінює тепло фазового переходу за постійної температури в тіньовій області траєкторії польоту. Анаеробна установка важила 250 кг і тривалий час експлуатувалася на одному зі штучних супутників Землі (ШСЗ) типу Geminai.

Наразі великі зарубіжні компанії, як-от NASA і Sanpower у США і British Aerospace Public Company у Великій Британії, розробляють сонячні електростанції з двигуном Стірлінга для різних цілей. Наприклад, MC Donnell Douglas Aerospace і United Stirling AB створили кілька зразків "сонячних двигунів Стірлінга" потужністю до 25 кВт.

До кінця цього року американська компанія Infinia планує завершити розробку нового генератора на основі сонячного двигуна Стірлінга для країн, що розвиваються. На відміну від звичайних сонячних панелей, ефективність яких становить 12-15% і рідко досягає 22%, ККД установок Infinia на базі двигуна Стірлінга становитиме понад 24%. Потужність двигуна становить від 3 до 5 кВт.

1.2.5 Атомні електростанції з двигунами Стірлінга

Великі дослідження зі створення електростанцій із двигунами Стірлінга, що працюють на ядерній енергії, були проведені в США. Двигуни Стірлінга можуть гарантувати надійну роботу електростанцій з термоелектричним коефіцієнтом перетворення 35-40% і терміном служби понад п'ять років (до 80 000 годин). Як джерела тепла для двигунів Стірлінга можуть використовуватися радіоізотопні теплові пристрої та реактори. Атомні електростанції з двигунами Стірлінга потужністю 0,5-15 кВт плануються для довготривалих пілотованих і безпілотних космічних кораблів; електростанції потужністю від 15 кВт до більш як 200 кВт підходять для використання на пілотованих орбітальних станціях і місячних базах з більш високими вимогами до потужності. Наприклад, проєкт SP-100 для планованої місячної бази в США являє собою атомну електростанцію з трьома двигунами Стірлінга загальною потужністю 250 кВт і масою 3000 кг.

У 2011 році NASA відправило до місяців Юпітера зонд, оснащений ядерним реактором. Однак раніше, у 2009 році, ядерні двигуни планувалося використовувати в наступній американській місії на Марс. Lockheed Martin і Центр Гленна розробляють ядерний двигун Стірлінга для NASA. Наразі вже розроблено двигун Стірлінга потужністю 25 кВт, який буде встановлено в електростанції для збудження радіоізотопів [МРМА 23.00.00.000ДО, рис. 5].

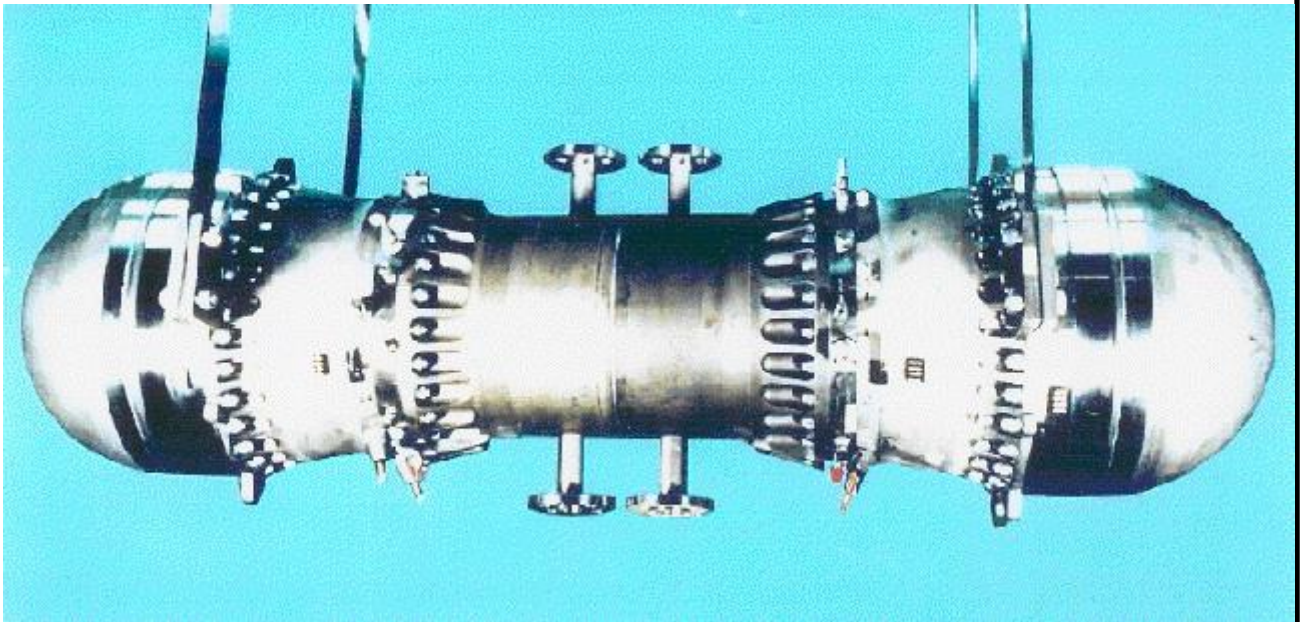


Рисунок 1.4 – Космічний апарат із двигуном Стірлінга

Програма використання ядерної енергії покликана різко (на один-два порядки) підвищити науковий ефект міжпланетних місій завдяки збільшенню ресурсу і продуктивності космічних апаратів і приладів, розміщенню на МКС кількох посадкових апаратів і потужних приладів, організації високошвидкісних каналів зв'язку.

1.2.6 Електростанції з двигуном Стірлінга на нетрадиційному газовому паливі (біогаз, звалищний газ, супутній нафтовий газ тощо)

Одним із напрямів використання місцевих біоресурсів є проєкт з енергопостачання невеликого поселення за допомогою двигуна Стірлінга, що працює на біогазі. Біогаз виробляється в метантенку на околиці селища і подається трубопроводами в окремі будинки, обладнані когенераційними установками з двигунами Стірлінга. На малюнку 1.5 показано ескіз цього проєкту [МРМА 23.00.00.000ДО, рис. 6].

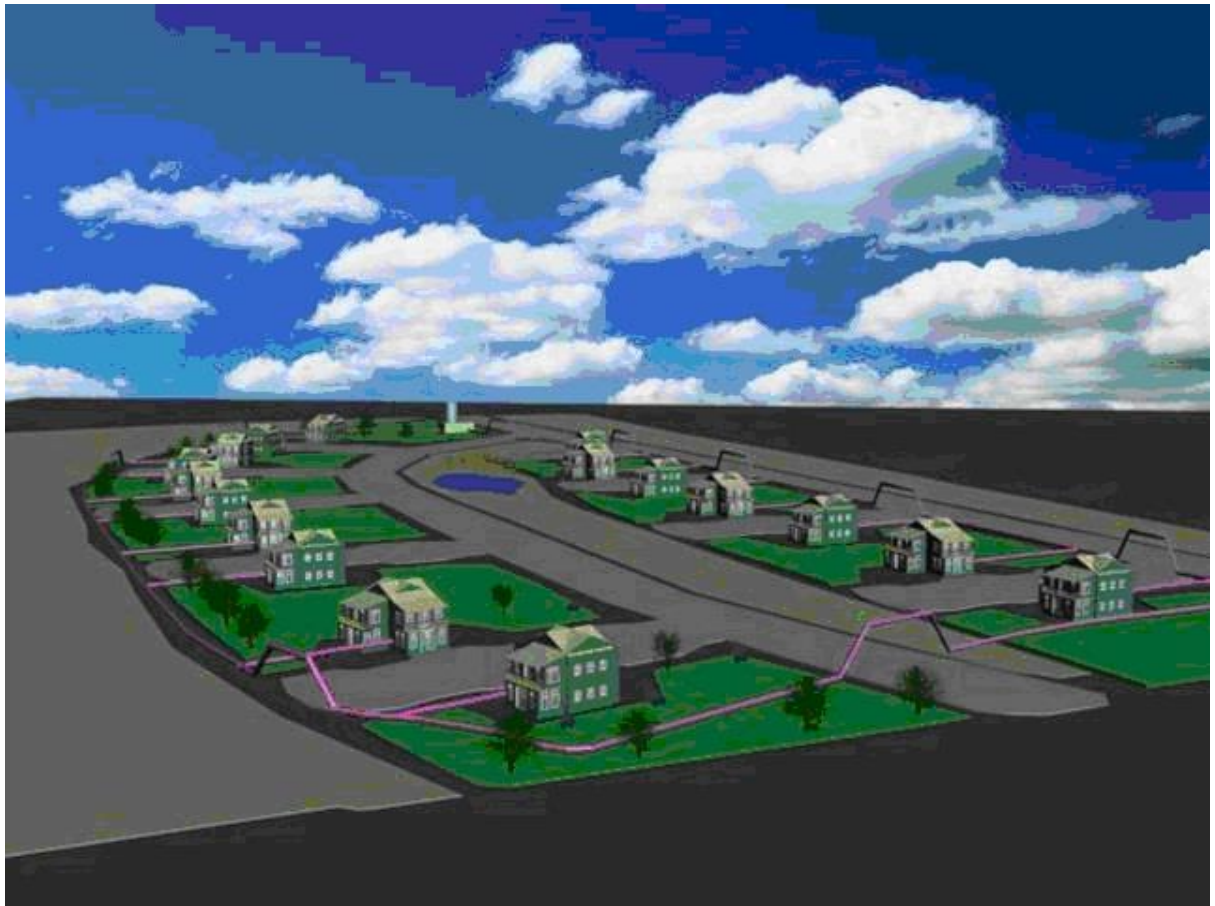


Рисунок 1.5 – Ескіз проекту енергопостачання невеликого населеного пункту з використанням двигунів Стірлінга, що працюють на біогазі

Іншим перспективним напрямком є використання біогазу з твердих побутових відходів (ТПВ) як палива для двигунів Стірлінга. Для отримання біогазу з ТПВ подрібнені відходи змішуються в метантенку з осадом стічних вод з первинних і вторинних відстійників на очисних спорудах. 2005 року в Китаї було збудовано перший у світі експериментальний енергетичний модуль потужністю 250 кВт з п'ятьма двигунами Стірлінга, що працюють на біогазі з твердих побутових відходів. У 2005 році в Китаї на експериментальній основі було побудовано перший у світі енергетичний модуль потужністю 250 кВт з п'ятьма двигунами Стірлінга, що працюють на біогазі з твердих побутових відходів. Випробування успішно тривали протягом трьох років.

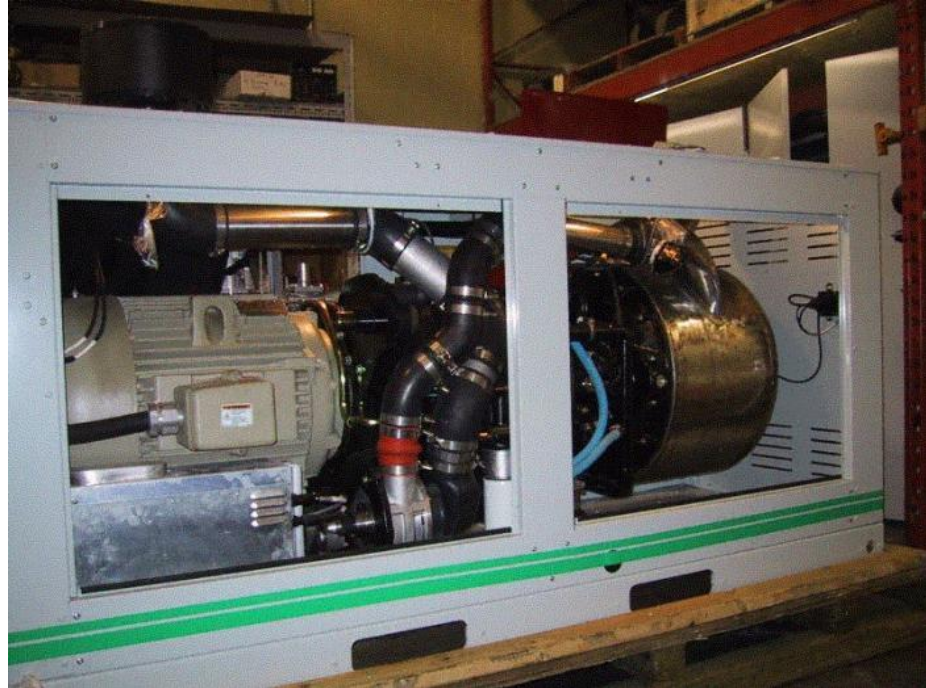


Рисунок 1.6 – Двигун Стірлінга потужністю 50 кВт

Автономні енергетичні установки з двигунами Стірлінга (генератори Стірлінга) незамінні в нафтогазовій галузі, де для освоєння нових родовищ потрібне повномасштабне енергетичне обладнання, особливо для геологорозвідувальних, бурових і зварювальних робіт в Арктиці та Північному Льодовитому океані.

Основні характеристики двигунів Стірлінга, що серійно випускаються найбільшими компаніями, наведено в таблиці 1.1 [5].

У цих умовах як паливо можна використовувати неперероблений природний газ, супутній нафтовий газ, видобутий разом із нафтою і газовим конденсатом. Така різноманітність видів палива робить генератори Стірлінга універсальним джерелом енергії. Таким чином, знімається проблема енергозабезпечення свердловин, вахтових селищ, вузлів зв'язку та інших автономних систем.

Таблиця 2.1 - Основні характеристики двигунів Стірлінга, що випускаються серійно

Модель ДС	4-95"USS"	МОД-1 "USS"	P-75"USS"	LL 23	2W17A	4-215ДА	4S1216
Номінальна потужність, кВт	45	54,4	75	95	102	127	280
Частота обертання, хв ⁻¹	4000	2000	2400	2100	1800	4000	1500
Температура стінки нагрівача, ДО	993	993	-	1033	868	-	923
Ефективний ККД, %	28	34	37	35	28,4	-	35
Питома ефективна витрата палива, г/(кВт·ч)	307	249	-	263	-	-	-
Число циліндрів	4	4	4	4	2	4	4
Робоче тіло	водень	водень	водень	водень	водень	водень	водень
Середній тиск у внутрішньому контурі, МПа	15	15	15	10,3	7,6	20	10,35

Попередні розрахунки показують, що генератор Стірлінга потужністю 100 кВт, що працює на природному або попутному нафтовому газі, може забезпечити електрикою і теплом обертювий табір, в якому працюють до 50 працівників газової, нафтової та геологічної галузей. При цьому немає необхідності імпортувати паливо з материка і не завдається шкода навколишньому середовищу, оскільки шкідливі викиди зведені до мінімуму.

Безперервне виробництво двигунів Стірлінга дасть змогу задіяти високотехнологічні підприємства вітчизняного машинобудування, що залишилися, перетворити низку оборонних підприємств країни і забезпечити експорт високотехнологічних технологій у сфері автономної енергетики.

1.3 Конструкція наявних сонячних концентраторів

Сонячні генератори-концентратори - це пристрої, що концентрують сонячне світло на охолоджувальній рідині для підвищення ефективності та виробництва альтернативних джерел енергії, таких як вітряні турбіни. Охолоджувальною рідиною часто слугує ємність із водою або олією, що поглинає сонячну енергію.

Існують різні типи сонячних концентраторів, включно з циліндричними параболоми, тарілчастими параболічними концентраторами, дзеркалами та геліоцентричними конструкціями, що базуються на принципі вежі.

Залежно від конструкції сонячна енергія може бути сконцентрована в одній конкретній точці або вздовж лінії. Слід зазначити, що такі концентратори ефективні тільки в сонячну погоду, що значно знижує їхню корисність в умовах українського клімату. Український клімат своєрідний і мінливий, що також ускладнює розрахунок концентраторів. У зв'язку з цим концентратори встановлюють у районах із високою часткою прямих сонячних променів, тобто в пустелях і степах. Якщо такі системи

використовуються в промислових масштабах (крім необхідності обслуговування системи, вартість якого значно вища), їх додатково оснащують спеціальною системою моніторингу для більш точного спрямування пристрою в бік сонячного світла.

Принцип роботи системи концентраторів полягає в тому, що сонячне випромінювання відбивається на поверхні приймача. Це призводить до підвищення температури і теплопередачі через приймач.

Через високу вартість концентраторів і необхідність регулярного обслуговування трєкових сонячних батарей їх застосування обмежене в основному промисловими системами вироблення електроенергії. Для підвищення ефективності концентратори часто використовують у так званих гібридних системах, де поряд із сонячною енергією використовують паливо. У цьому разі енергія виробляється практично 24 години на добу без перерви, незалежно від сонячного циклу.

Перший тип концентраторів - параболічний (рис. 1.7). Їхня довжина може досягати 50 метрів [7]. Такі концентратори складаються з увігнутих дзеркал. Кожне дзеркало концентрує та накопичує сонячне проміння в певній точці. Фокусною точкою кожного дзеркала є окремий відрізок труби з охолоджувальною рідиною, розташований по всій конструкції дзеркала. Труби укладені в скляний кожух для зниження теплових втрат. У деяких випадках замість труб можуть використовуватися спеціальні фотоелементи, що дають змогу домогтися аналогічних результатів за меншої площі збору світла. Однак ризик перегріву фотоелемента дуже високий. У цьому разі дуже важливо своєчасно оснастити їх системою охолодження. У багатьох випадках розташування такого концентратора визначається базовою точкою (зазвичай йде з півночі на південь). З цієї причини дуже важлива система моніторингу положення сонця.



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд параболоїдного концентратора

Концентратори нагадують супутникові тарілки (рис. 1.2). Вони зібрані з параболічних дзеркал, які дають змогу концентрувати сонячне світло на відповідних поверхнях. У цьому випадку температура теплоносія досягає 1000 °С.

Теплоносій одразу ж починає впливати на генератор і двигун (найчастіше використовують двигуни Брайтона і Стірлінга, які дають змогу максимально збільшити продуктивність системи).

СЕС, що використовують двигуни Стірлінга, являють собою сонячні електростанції з концентратором, у фокусній точці якого встановлено двигун Стірлінга. Двигуни Стірлінга мають конструкцію, в якій не використовується кривошипно-шатунний механізм, а вібрації поршня перетворюються безпосередньо в електричну енергію. Це дає змогу досягти високої ефективності перетворення енергії. ККД таких електростанцій може досягати 32 %. Як робоча рідина використовується водень або гелій.



Рисунок 1.8 – Загальний вигляд концентратора-тарілки

Концентратори вважаються дуже перспективним напрямком, який активно розвивається та вдосконалюється найбільшими енергетичними компаніями [8].

Наприклад, якщо у вас є дача в сонячному місці, ви можете зібрати власний концентратор і використовувати його для зменшення рахунків за електрику. Третій тип концентратора являє собою баштову конструкцію з приймачем, як показано на рис. 1.9. У цьому разі вся сонячна енергія збирається приймачем на вершині баштової конструкції. Вежа оточена спеціальними відбивачами (геліостатами), які стежать за положенням сонця і можуть повертатися так, щоб промені фокусувалися на приймачі [7].

Приймач поглинає теплову енергію і приводить в обертання силову турбіну. Як охолоджувальні рідини використовують пари і гази (температура яких може досягати тисячі градусів Цельсія), рідини і рідкі метали (температура x може досягати 800 градусів Цельсія).



Рисунок 1.9 – Загальний вигляд концентратора баштового типу

У цьому разі охолоджувальна вода не тільки впливає на турбіну для вироблення електроенергії, а й може брати участь у виробничому процесі. Цей тип концентраторів, хоча й трудомісткий і дорогий, вважається дуже ефективним. Крім того, він вимагає дуже великої площі землі (не менше 50 гектарів), щоб отримати максимальну віддачу від конструкції.

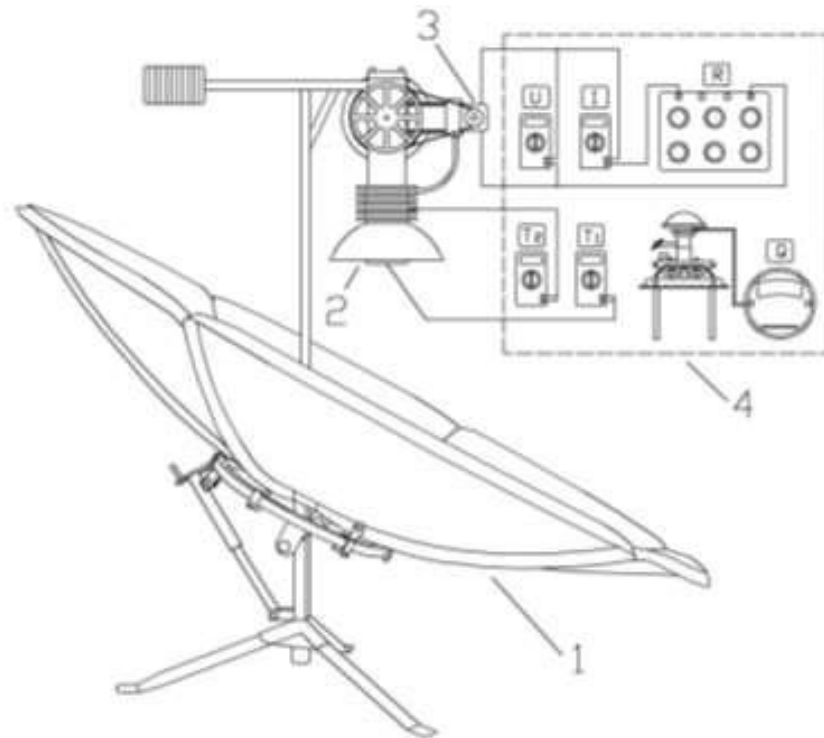
Висновки з розділу 1

У розділі 1 було розглянуто та проаналізовано перспективи використання двигунів Стірлінга у сфері незалежної енергетики в ХХІ столітті, а також розглянуто сфери, у яких може бути використано цей тип двигунів. Також було проаналізовано основні типи сонячних концентраторів. На підставі даного огляду метою магістерської дисертації є розробка параболічного сонячного концентратора з двигуном Стірлінга, який може бути використаний у навчальному процесі кафедри "Механіка, обладнання, електромеханіка та енергетичні системи" Хмельницького державного університету.

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ СОНЯЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ПАРАБОЛОЇДНОГО ТИПУ ІЗ ДВИГУНОМ СТІРЛІНГА

Основою для розробки послугувало обладнання, створене в лабораторії Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ "КПІ" [9].

В основу даного дослідження покладено дослідницький стенд "Параболічний сонячний концентратор - двигун Стірлінга УДС-1 - генератор" [МРМА 23.00.00.00.000 ДІ], який перетворює сонячну енергію в електричну..



1 - параболічний сонячний концентратор (СК), вкритий тонкою дзеркальною плівкою; 2 - двигун УДС-1 у гарячій порожнині у фокусі СК; 3 - генератор (ЕГ) ДП-2-26, з'єднаний пасовою передачею зі шківками СК; 4 - вимірювальне обладнання (сонячне випромінювання, температура гарячої й холодної порожнин СК, швидкість обертання СК та ЕГ, вимірювання вихідної потужності).

Рисунок 2.1 - Експериментальна сонячна електростанція

2.1 Розрахунок параметрів сонячного концентратора

За основу було обрано метод, описаний у [10].

На малюнку 2.2 показано, як зміщений і симетричний концентратори "вирізаються" з первинного параболоїда. Первинний параболоїд - це площина параболічного обертання, де F - фокусна відстань. Фокусна точка розташована на осі Y на відстані F від початку координат. Параболічне зміщене фокусувальне дзеркало відтинається від первинної параболи циліндром поперечного перерізу, вісь і добуток якого паралельні до осі вихідної параболи. Якщо поперечний циліндр лежить на осі первинної параболи, то виходить симетричне фокусувальне дзеркало [7].

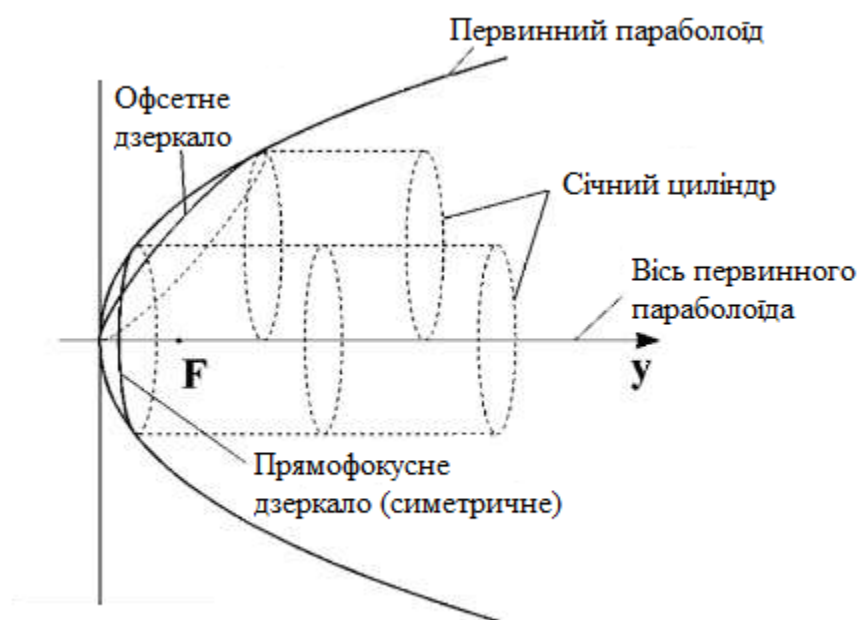


Рисунок 2.2 - Утворення симетричного і офсетного дзеркал із вихідного параболоїда

Як концентратор сонячної енергії для визначення інших параметрів було обрано офсетний концентратор з невеликим діаметром вала 0,8 м. Щоб максимально використовувати всю площу концентратора, коефіцієнт має становити від 0,5 до 0,6. За співвідношення 0,55 фокусна відстань становить

0,44 м. Апертурний кут меншої осі дорівнює 900, а кут більшої осі варіюється між 800 і 900. У цьому випадку $D/F = 0,55$, тому кут дорівнює 850. Виходячи з уже відомих параметрів, велика вісь офсетного дзеркала зазвичай на 10% більша за меншу вісь і визначається таким рівнянням

$$d = \frac{D \cdot (16 \cdot F^2 + D^2)}{4 \cdot F}. \quad (2.1)$$

Трикутник розмірів офсетного концентратора зображено на рисунку 2.3, а формули для визначення цих параметрів наведені нижче [МРМА 23.00.00.000 РР, рисунок 1]:

$$a = d; b = F + \frac{D^2}{4 \cdot F}; c = F. \quad (2.2)$$

Щоб збільшити збирання світла на теплоприймальній поверхні і, необхідно зменшити площу точки збирання світла, тобто теплоприймальна поверхня має бути орієнтована якомога більш перпендикулярно до точки максимальної глибини збирання світла. Цю точку можна знайти так: розділіть бік b навпіл і проведіть з його центру лінію, паралельну до осі параболі, тобто паралельну стороні c трикутника, що перетинає параболу в точці P .

Сторона трикутника з розмірами зміщеної фокусувальної лінзи - це вісь c вихідної параболі, сторона b - проекція частини параболі на поперечну вісь, а сама фокусувальна лінза - частина бічної області вихідної параболі (рис. 2.4). Якщо відомі параметри дзеркала, то можна отримати рівняння вихідної параболі.

Загальна схема рівняння параболі [7].

									Арк.
									31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c. \quad (2.3)$$

Розв'язавши рівняння, отримаємо значення параметрів a , b і c :

$$a = 0,6875; b = 0; c = 0.$$

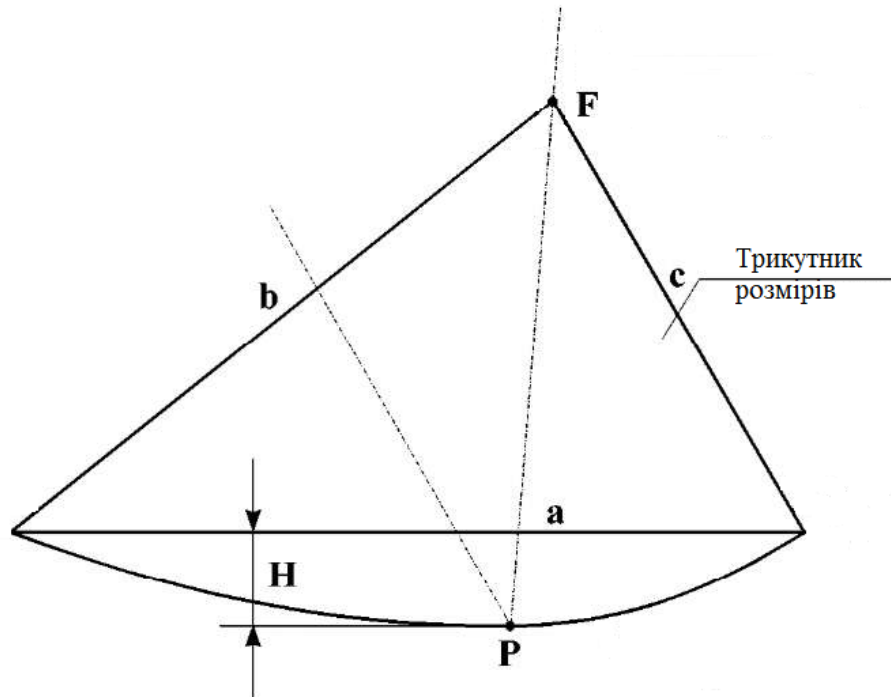


Рисунок 2.4 – Трикутник розмірів офсетного концентратора

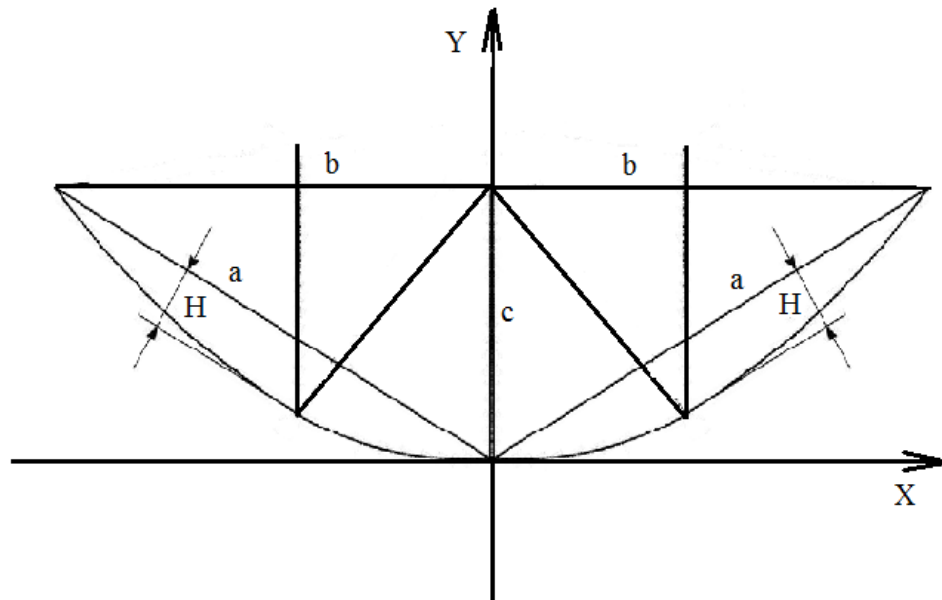


Рисунок 2.5 – Представлення вигляду вихідного параболоїда

Рівняння вихідної параболі:

$$y = 0,6875 \cdot x^2 . \quad (2.4)$$

Давайте порівняємо і обчислимо бічні площі вихідного параболоїда, зміщеного концентратора і симетричного концентратора, вирізаного в тому ж поперечному циліндрі, що і зміщений концентратор.

Щоб обчислити площу бічної поверхні вихідного параболоїда, нам потрібно знати рівняння цього параболоїда і січного циліндра; рівняння січного циліндра в системі координат хуз наведено нижче:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (2.5)$$

де a і b – менша і більша півосі еліпса, що лежить в основі циліндра.

Для даного параболоїда, який являється тілом обертання, а в основі лежить круговий циліндр, отримаємо формулу:

$$1,375 \cdot z = x^2 + y^2 . \quad (2.6)$$

Для визначення бічної площі параболоїда скористаємося формулою подвійного інтеграла:

$$S = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy , \quad (2.7)$$

$$\text{де } z = \frac{x^2}{1,375} + \frac{y^2}{1,375} .$$

$$x^2 + y^2 = 0,8^2 . \quad (2.8)$$

Підставляючи отримані значення у вираз подвійного інтеграла і переходячи до полярної системи координат отримаємо значення площі:

$$x^2 + y^2 = r^2, \quad (2.9)$$

$$S = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{1,375}\right)^2 + \left(\frac{2y}{1,375}\right)^2} dx dy = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + (2,116 \cdot (x^2 + y^2))} dx dy =$$

$$= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{0,8} \sqrt{1 + 2,116 \cdot r^2} \cdot r \cdot dr = 1,75 \text{ м}^2.$$

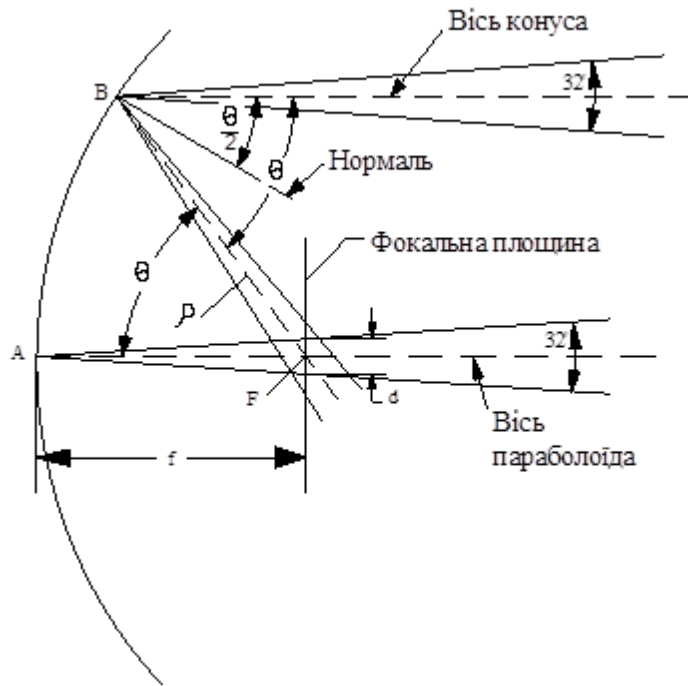


Рисунок 2.6 – Схема відображення сонячного проміння в фокус параболоїдного концентратора

Аналогічно, як і для первинного параболоїда, проведемо розрахунок бічної площі симетричного концентратора, вирізаного січним циліндром з радіусом 0,4 м [МРМА 23.00.00.000 РР, рисунок 2].

$$S = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{1,375}\right)^2 + \left(\frac{2y}{1,375}\right)^2} dx dy \approx 1,1 \text{ м}^2.$$

Розрахунок офсетного концентратора такий самий, як і в двох попередніх випадках, але радіус поперечного циліндра становить 0,4 м.

Інтегральна межа змінюється в межах $[0; 0,8]$, а полярний кут - у межах $[0; 0,8]$. $\left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$:

$$S = \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{1,375}\right)^2 + \left(\frac{2y}{1,375}\right)^2} dx dy \approx 0,8 \text{ м}^2.$$

Світло від сонця потрапляє в конічний параболічний концентратор із тілесним кутом $32'$, як показано на малюнку 2.6.

Визначається потужність, одержувана від елементарних кілець концентратора в сонячному зображенні:

$$\Delta P = \left(\frac{f^2}{p^2} \cos \theta\right) \left(p_0 \cdot \Delta S \cdot \cos \frac{\theta}{2}\right), \quad (2.10)$$

$$\Delta P = p_0 \cdot \frac{f^2}{p^2} \cos \theta \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \Delta S,$$

f - фокусна відстань;

ρ - відстань від точки фокуса до будь-якої точки лінзи, що фокусує;

p_0 - сонячна постійна;

ΔS - площа елементарного кільця.

Площа елементарного кільця становить.

$$\Delta S = 2\pi \cdot \rho \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{(\Delta \rho)^2 + \rho^2 (\Delta \theta)^2}. \quad (2.11)$$

Відповідно до методики розрахунку симетричного концентратора [9] визначаються основні характеристики для отримання ступеня концентрації.

Площа кільця:

$$\Delta S = 2\pi \cdot \rho^2 \cdot \sin \theta \cdot \sec \frac{\theta}{2} \cdot \Delta \theta. \quad (2.12)$$

Повна можлива потужність, яка проходить через зображення:

$$P = \pi \cdot p_0 \cdot f^2 \cdot \sin^2 \theta. \quad (2.13)$$

Повна наявна потужність:

$$P = \pi \cdot \eta_a \cdot \eta_r \cdot p_0 \cdot f^2 \cdot \sin^2 \theta. \quad (2.14)$$

Питома потужність:

$$P = 46,1 \cdot 10^3 \cdot \eta_a \cdot \eta_r \cdot p_0 \cdot \sin^2 \theta.$$

Ступінь концентрації:

$$C = \frac{P}{\eta_a \cdot \eta_r \cdot p_0} = 46,1 \cdot 10^3 \cdot \sin^2 \theta. \quad (2.15)$$

Для приймача у вигляді плоскої пластини, що підкоряється закону Ламберта:

$$C = 30,7 \cdot 10^3 (1 - \cos^3 \theta).$$

Коефіцієнт концентрації для приймача у вигляді плоскої пластини, що підкоряється закону Ламберта:

$$\eta_c = \frac{\varepsilon_n}{6} (1 + \cos \theta) (1 + \cos \theta + \cos^2 \theta). \quad (2.16)$$

Ступінь концентрації та коефіцієнт концентрації для симетричного та офсетного концентраторів представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Ступінь концентрації та коефіцієнт концентрації для симетричного та офсетного концентраторів

Тип концентратора	C	η_c
Симетричний	30679,7	0,12
Офсетний	30057,1	0,17

Залежність коефіцієнта збору і фокусування світла від кута розкриття дзеркала показано на малюнках 2.7 і 2.8.

Як видно, у разі симетричних фокусувальних дзеркал коефіцієнт фокусування цілком придатний як безрозмірна властивість ефективності. Однак у разі дзеркала зі зміщеним фокусуванням така послідовність обчислень не може бути використана. Це пов'язано з тим, що дзеркало не є симетричним і має еліптичний переріз, унаслідок чого фокус зміщується відносно осі, що призводить до різної крутизни форми фокусувального дзеркала і різної швидкості зміни кута θ від осі до периферії фокусувального дзеркала.

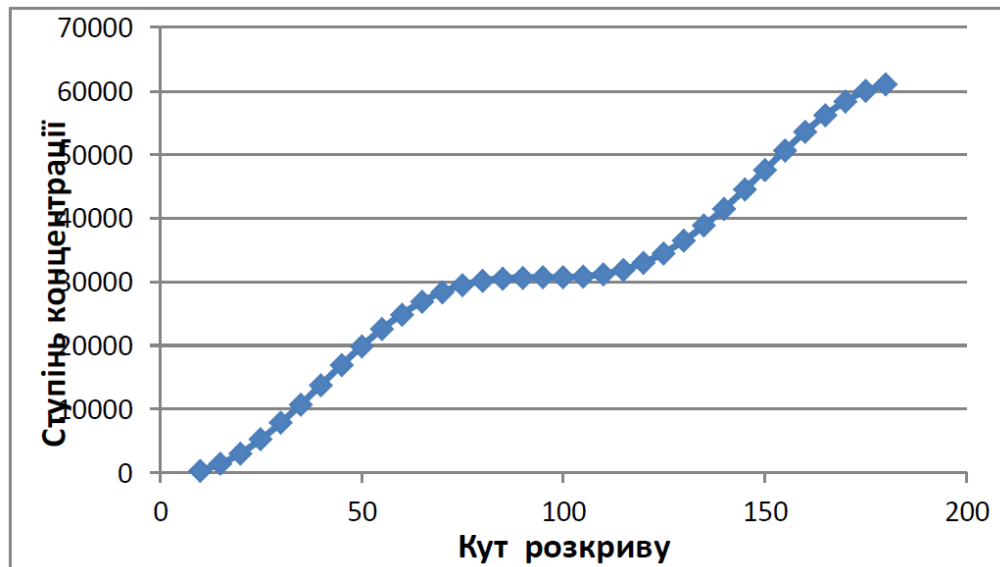


Рисунок 2.7 – Залежність ступеня концентрації від кута розкриття

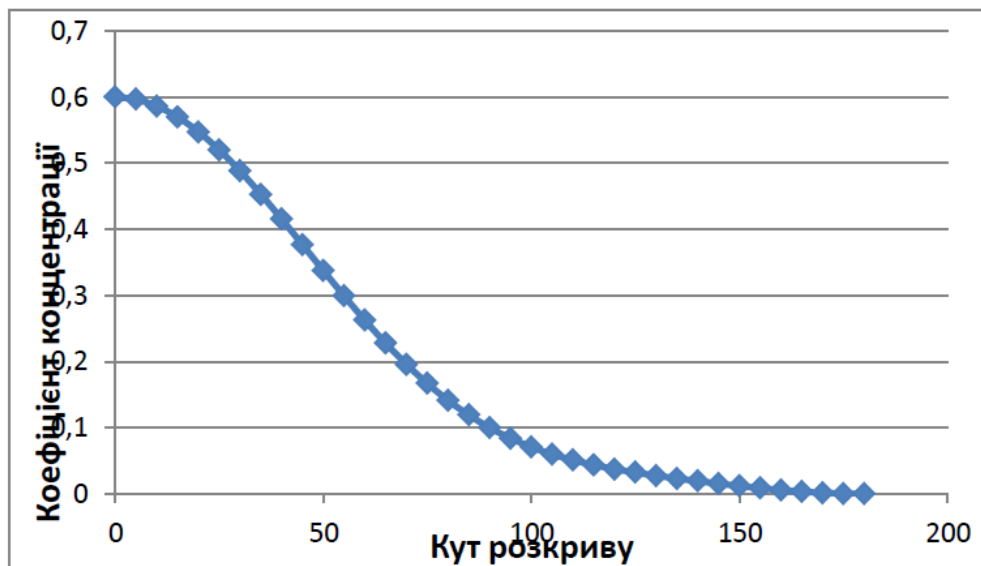


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнта концентрації від кута розкриття

Під час аналізу подібних ситуацій і порівняння різних концентраторів можна використовувати значення щільності теплового потоку з таких причин:

- Щільність теплового потоку змінюється залежно від відстані від осі концентратора до периферії, а також від інтенсивності збору світла;

- Щільність теплового потоку - величина, що залежить від площі бічної поверхні фокусувального дзеркала, тому від функціональної залежності цієї величини від форми дзеркала та її складного розрахунку можна відмовитися.

Щільність прямої сонячної радіації (вимірюється піранометром).

Тепловий потік, що падає на концентратор:

$$Q_{\text{ПАД}} = E_C \cdot A_K = q_a \cdot A_K, \quad (2.17)$$

де $A_K = \frac{\pi D^2}{4}$ - площа міделя концентратора,

D - діаметр концентратора.

Тепловий потік, що потрапляє в теплоприймач. У ролі теплоприймача виступає плоска поверхня – торець циліндра витискувача ДС:

$$\begin{aligned} Q_S &= \eta_a \eta_r q_0 (\pi f^2) \sin^2 \theta = \eta_r q_a (214,6)^2 F_S \sin^2 \theta = \\ &= \eta_r (214,6)^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \frac{F_S}{A_K} Q_{\text{ПАД}}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

де відповідає положенню концентратора і являє собою відсоток від ідеальної сонячної постійної, що враховує втрати в атмосфері;

- Коефіцієнт відбиття; являє собою втрати, пов'язані з відбиттям або поглинанням в оптичній системі;

- Сонячна постійна;

- фактичний потік сонячного випромінювання в положенні концентратора;

$F_S = \pi \frac{f^2}{(214,6)^2}$ – площа зображення Сонця;

густина потоку:

$$q_s = \frac{Q_s}{F_s} = \eta_a \eta_r q_0 (214,6)^2 \sin^2 \theta = \eta_r q_a (214,6)^2 \sin^2 \theta =$$

$$= \eta_r (214,6)^2 \sin^2 \theta \cdot E_C. \quad (2.19)$$

Повний потік:

$$Q_S = N_t = AA_K E_C = A Q_{ПАД}, \quad (2.20)$$

де N_t – теплова потужність концентратора,

A – коефіцієнт ефективності оптичної системи, який дорівнює відношенню енергії, отриманої у фокальній області концентратора, до падаючої на дзеркало (у випадку прямого наведення концентратора на Сонце можна прийняти рівним 0,6-0,7):

$$A = \frac{Q_{ВХ}}{Q_{ПАД}} = \rho_3 \eta_{СЛ}, \quad (2.21)$$

де ρ_3 – коефіцієнт відбиття дзеркальної поверхні концентратора ($\rho_3 = 0,55$),

$\eta_{СЛ}$ – коефіцієнт ефективності системи слідування ($\eta_{СЛ} = 1$),

$\eta_{ЮСТ}$ – коефіцієнт, що враховує юстировку дзеркала ($\eta_{ЮСТ} = 0,9$).

Розрахунок:

$$Q_S = 0,5 \cdot Q_{ПАД},$$

$$q_s = \frac{Q_S}{F_f},$$

де $F_f = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – площа фокальної плями.

Оскільки офсетний концентратор являється частиною первинного параболоїдного концентратора, то можна зробити припущення, що середня густина теплового потоку по площі параболоїда буде рівна середній густині теплового потоку офсетного концентратора.

$$Q_{BX} = q_{BX} \cdot F_H,$$

де $F_H = 3,42 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – площа поверхні нагріву.

Температура на поверхні нагріву теплоприймача T_{BX} :

$$T_{BX} = \left(\frac{3q_{BX}}{2\varepsilon_n \sigma_0} \right)^{0,25}, \quad (2.22)$$

де $\varepsilon_n = 0,6$ – ступінь чорноти поверхні нагріву (латунь, окислена при нагріванні до 600°C).

Поглинаний тепловий потік – тепловий потік, переданий робочому тілу (РТ):

$$q_{РТ} = \frac{2}{3} \varepsilon_n \frac{1 - \cos^3 \theta}{1 - \cos^2 \theta} q_{BX}, \quad (2.23)$$

$$Q_{РТ} = q_{РТ} \cdot F_H.$$

Температура стінки теплоприймача – робочого тіла (для плоского приймача, коли $\varepsilon = \varepsilon_n \cos \theta$):

$$q_{РТ} = \frac{2}{3} (214,6)^2 \eta_a \eta_r q_0 \alpha_n (1 - \cos^3 \theta) = \frac{2}{3} \varepsilon_n \sigma T_m^4, \quad (2.24)$$

Робочими порожнинами двигуна є об'єми V_g і V_x , а також об'єми нагрівача, регенератора, охолоджувача і сполучних каналів, заповнених робочою рідиною. Робочий об'єм - це об'єм, що звільняється під час переміщення робочого поршня з верхньої мертвої точки в нижню мертву точку. Об'єм усієї порожнини ДК, коли робочий поршень перебуває у ВМТ, називається "мертвим" об'ємом [МРМА 23.00.00.000 ДТ].

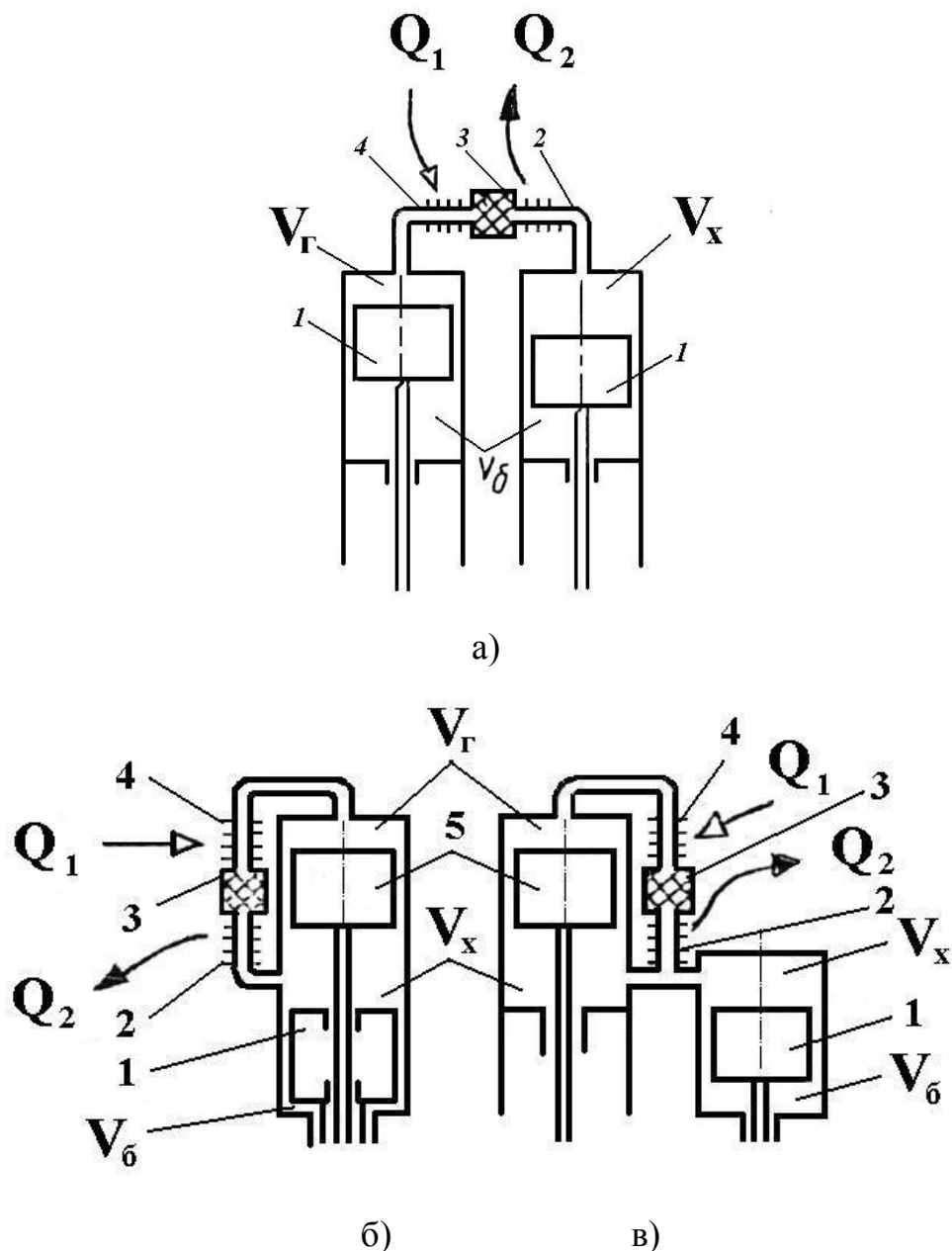


Рисунок 2.9 – Принципові схеми двигуна Стірлінга простої дії:
 а – модифікації α ; б – модифікації β ; в – модифікації γ .

Стиснення і розширення відбуваються внаслідок переміщення витісняючого поршня (модифікований поршень □). Об'єм порожнини двигуна не змінюється під час руху витісняючого поршня.

У версії двигуна □ витісняючий поршень відсутній. Кожен поршень поперемінно виконує функції робочого та витісняючого поршня. Під час роботи робоча рідина переміщається з більш гарячої порожнини в більш холодну і навпаки. Під час стиснення більша частина робочої рідини перебуває в порожнині з низькою температурою, а під час розширення - в порожнині з високою температурою.

Принцип отримання корисної роботи за рахунок стиснення газу за низької температури T_x і його розширення за високої температури T_g лежить в основі процесу DS. Ідеальний цикл Стірлінга - це термодинамічний цикл, що складається з двох ізотермічних процесів розширення і стиснення з підведенням тепла і двох ізотермічних процесів нагріву та охолодження. Корисна робота циклу визначається різницею між роботами розширення і стиснення газу в гарячій і холодній порожнинах.

Продуктивність ДЦ залежить від маси і середнього тиску робочої рідини в робочій порожнині. Тому ДС будуються герметичними, а робоча рідина закачується під тиском; максимальна потужність ДС змінюється майже прямо пропорційно тиску цієї робочої рідини. У сучасних ДС середній тиск становить 10,0... 15,0 МПа і вище. Це значно вище, ніж тиск короткочасного згоряння поршневих двигунів внутрішнього згоряння.

Високий середній тиск двигунів внутрішнього згоряння передається на кривошипно-шатунний механізм і впливає на нього за один оберт колінчастого вала. У результаті навантаження на деталі та підшипники колінчастого вала зростає. У результаті деталі та підшипники повинні мати великі розміри і виготовлятися з особливо міцних матеріалів. Крім того, робота, що виникає в процесі стиснення, також значно зростає і в 25-30 разів перевищує роботу дизельного двигуна того ж робочого об'єму. Тому в ДС

неминуче створюється так звана буферна порожнина, яка розташовується нижче робочого поршня. Об'єм буферної порожнини в кілька разів перевищує робочий об'єм циліндра і з'єднаний з порожниною приводу ДС через капілярні трубки або спеціальні проточні канали таким чином, щоб різкі зміни тиску в порожнині приводу ДС під час ходу поршня не передавалися в буферну порожнину.

Під час ходу виконавчого поршня об'єм буферної порожнини зменшується, тиск у ній збільшується, і частина енергії, що виробляється ДК, накопичується в цій порожнині. Ця енергія витрачається в процесі стиснення.

У буферній порожнині підтримується дещо менший середній тиск, ніж у робочій порожнині ДЦ. Завдяки більшому об'єму буферної порожнини коливання тиску в ній менші, ніж у порожнині ДК.

Камера згоряння, система подачі палива і повітря, система попереднього підігріву повітря, що надходить у камеру згоряння, система охолодження і система автоматичного керування дуже важливі для двигунів внутрішнього згоряння. У системі подачі повітря зазвичай використовується нагнітальний вентилятор.

Управління двигунами Стірлінга складніше, ніж поршневіми двигунами. Це пов'язано з особливостями регулювання потужності в двигунах внутрішнього згоряння і необхідністю автоматичного підтримання постійної температури нагрівача і складу паливно-повітряної суміші в камері згоряння на всіх режимах роботи.

Розглянемо двигун внутрішнього згоряння, у якому робочий і витискний поршні розташовані в одному загальному циліндрі (поліпшений □) або у двох окремих циліндрах (поліпшений □). Корисна робота в такому двигуні відбувається під дією тиску газу на робочий поршень в інтервалі від НМТ до НМТ робочого ходу робочого поршня. Ефективна потужність виражається тим самим рівнянням, що й для двотактного поршневого двигуна внутрішнього згоряння:

$$N_e = p_e \cdot V_h \cdot i \cdot n_d / 60, \quad (2.26)$$

де p_e – середній ефективний тиск;

V_h – робочий (витискувальний) об'єм робочого циліндра – це об'єм між НМТ і ВМТ у циліндрі стиску (холодному циліндрі);

i – число циліндрів;

n_d – частота обертання вала ДС.

З рівняння (2.26) видно, що потужність двигуна можна регулювати зміною середнього ефективного тиску p_e . Цей тиск рівний:

$$p_e = p_i \cdot \eta_m = p_t \cdot \eta_0 \cdot \eta_m, \quad (2.27)$$

де p_i – середній індикаторний тиск;

η_m – механічний ККД двигуна;

p_t – середній тиск термодинамічного циклу;

η_0 – відносний ККД.

У роботі [3] показано, що середній тиск термодинамічного циклу Стірлінга можна виразити рівнянням:

$$p_t = p_a (T_g / T_x - 1) \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \ln \varepsilon, \quad (2.28)$$

де p_a – тиск на початку такту стиску;

T_g – температура робочого тіла в гарячій порожнині ДС;

T_x – температура робочого тіла в холодній порожнині ДС;

ε – ступінь стиску.

Ступінь стиску рівний:

$$\varepsilon = V_a / V_c, \quad (2.29)$$

де V_a – об'єм усіх порожнин ДС, коли робочий поршень перебуває в НМТ;

V_c – об'єм усіх порожнин ДС, коли робочий поршень перебуває у ВМТ.

Рівняння (2.26)... (2.28) показує, що вихідний сигнал постійного струму можна регулювати, змінюючи тиск p_a , температурне співвідношення T_g/T_x і ступінь стиснення \square . Останні два параметри впливають на термічний ККД циклу Стірлінга, як видно з наведеного нижче рівняння для циклу Стірлінга з регенератором [3].

$$\eta_t = 1 - \frac{(T_z / T_x)(1 - \eta_p) - [(1 - \eta_p) - (k - 1) \ln \varepsilon]}{(T_z / T_x)[(1 - \eta_p) + (k - 1) \ln \varepsilon] - (1 - \eta_p)}, \quad (2.30)$$

де η_p – ККД регенератора.

Аналіз рівняння (2.30) показує, що зі зменшенням відношення T_g/T_x і ступеня стиснення \square тепловий ККД циклу знижується. Це означає, що якщо потужність ДВЗ регулюється шляхом зміни цих параметрів, то ефективність ДВЗ погіршуватиметься в міру зменшення потужності.

Тому розумним способом регулювання вихідної потужності ДВЗ є зміна тиску p_a , тобто середнього тиску робочої рідини в ДВЗ. На практиці це можна зробити двома способами: змінити масу робочої рідини в двигуні або змінити мертвий об'єм. У першому випадку ДК стає дуже складним, оскільки він має бути оснащений циліндром зі стислою робочою рідиною і компресором, який відкачує робочу рідину з ДК і впорскує її в циліндр. У другому випадку потрібна додаткова порожнина для регулювання мертвого об'єму, що робить ДК громіздким.

Наведені вище міркування справедливі і для ДЦ із двома поршнями у двох незалежних циліндрах (модифікований □) і ДЦ подвійної дії, але їхні аналітичні залежності складніші. У сучасних ДЦ регулювання продуктивності здійснюється шляхом зміни середнього тиску робочої рідини.

Існує ще два способи керування продуктивністю ДС. Один із них впливає з рівняння (2.26), з якого випливає, що потужність N_e залежить від робочого об'єму V_h . Можна змінювати V_h за допомогою змінного ходу ДС. Цей метод дуже ефективний, але потребує значно складнішої конструкції двигуна, тому експериментальних прикладів мало [7].

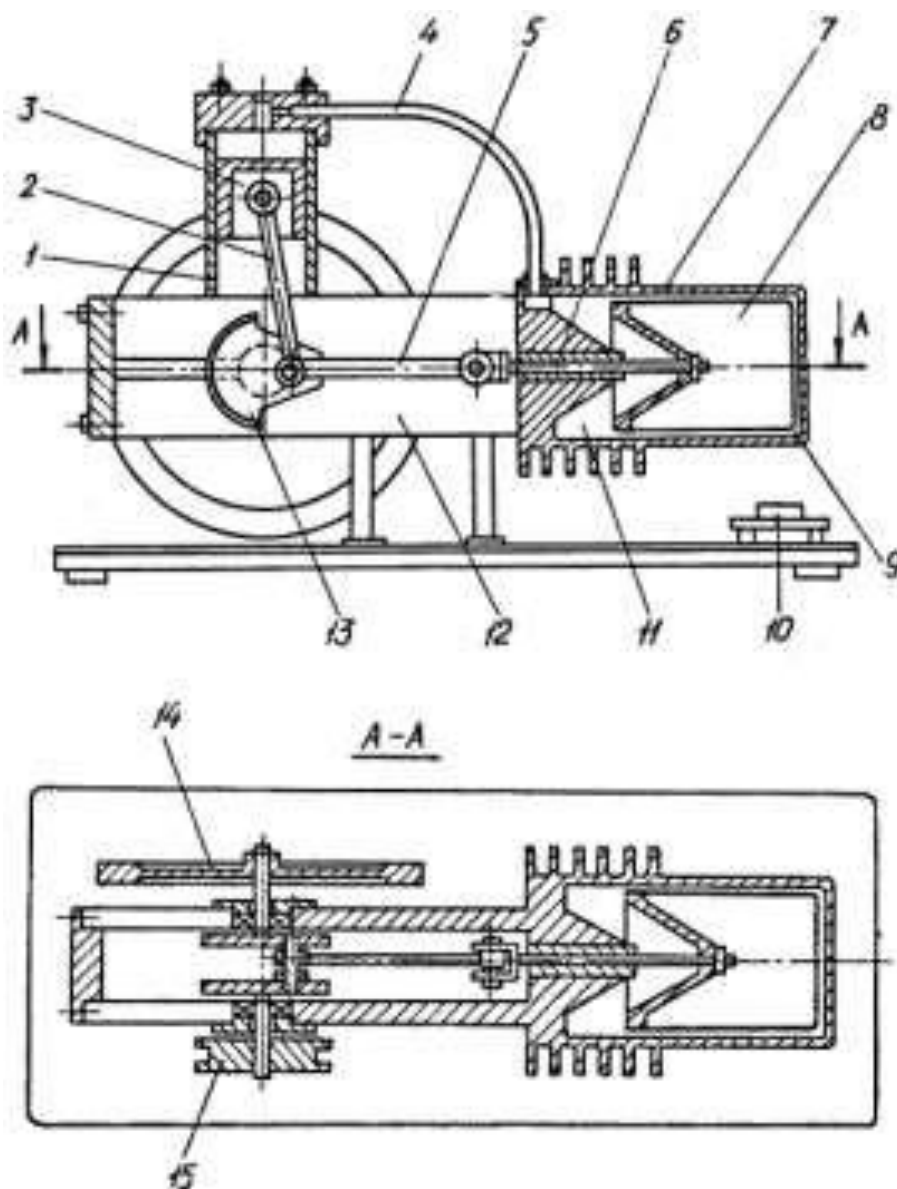
Інший метод полягає у зміні фазового кута між робочим і витісняючим положеннями поршня, а в багатоциліндрових двигунах - у зміщенні тактів окремих циліндрів. Однак це призводить до погіршення ефективності двигуна за часткового навантаження і потребує складнішої конструкції двигуна.

З рівняння (2.30) впливає і друга умова, необхідна для забезпечення максимально можливої ефективності ДВЗ, а саме підтримання максимально можливого температурного співвідношення T_g/T_x . В ідеалі це відношення температур T_g/T_x має бути однаковим для всіх режимів роботи ДВЗ. Обмежувальним фактором є термічний опір нагрівача. Тому важливо підтримувати температуру стінок нагрівача точно на заданому рівні, щоб запобігти руйнуванню стінок нагрівача.

Зміна середнього тиску робочої рідини в ДС впливає на тепловіддачу від внутрішніх стінок нагрівача. Тому, якщо тепловий потік, що надходить у нагрівач, постійний у всьому діапазоні навантажень, температура нагрівача змінюватиметься обернено пропорційно середньому тиску робочої рідини. Це призводить до зниження ККД і потужності двигуна або до перегріву стінок радіатора та їхнього руйнування.

У двигунах внутрішнього згоряння тепло забезпечується за рахунок згоряння газоповітряної або паливно-повітряної суміші в камері згоряння.

Для підтримання температури нагрівача на необхідному рівні змінюється витрата палива і повітря, що подаються для згоряння [МРМА 23.00.00.000 ДІ1].



1 – робочий циліндр, 2 – шатун, 3 – робочий поршень, 4 – трубка внутрішнього контуру, 5 – шатун, 6 – втулка, 7 – циліндр, 8 – поршень-витискувач, 9 – гаряча порожнина, 10 – місце для зовнішнього підводу теплоти, 11 – холодна порожнина, 12 – корпус, 13 – кривошип, 14 – маховик, 15 – шків.

Рисунок 2.10 - Навчально-демонстраційна модель двигуна Стірлінга UDS-1.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

. Слід зазначити, що кількісне співвідношення повітря і палива суттєво впливає на процес горіння і склад продуктів згорання. Тому необхідно підтримувати оптимальне співвідношення надлишку повітря під час зміни витрати палива і повітря в камері згорання Як ДС використовували як навчальні, так і демонстраційні варіанти, УДС-1, виготовлені фірмою "Плазматрон" у Києві в 1986-1987 роках. Нині ці двигуни використовують на багатьох спеціалізованих кафедрах університетів [13, 14].

Двигун УДС-1 являє собою вдосконалений варіант спрощеного V-подібного ДС □ - витіснювального типу з двома циліндрами, розташованими під кутом 90°. Один із них - робочий циліндр 1, інший - додатковий циліндр 7. Робочий циліндр 1 переміщує поршень 3, а додатковий циліндр 7 - розширювач 8. Поршень і розширювач з'єднані з кривошипом 13 колінчастого вала шатунами 2 і 5. Робоче колесо спрямовується втулкою 6, яка ділить додатковий циліндр на дві порожнини - гарячу 9 і холодну 11. Обидві порожнини з'єднані зазором між розширювачем і стінкою додаткового циліндра. Холодна порожнина з'єднана з робочим циліндром трубкою внутрішнього контуру 4.

Таблиця 2.1 - Паспортні дані двигуна Стірлінга

Номінальна потужність, Вт	5
Кутова швидкість вихідного валу, об/хв	500
Число циліндрів, шт	1
Система згорання	Зовнішня
Охолодження	Повітряне
Робоче тіло	Повітря
Схема	γ-схема
Обертання маховика	За годинниковою стрілкою
Маса, кг,	не більше 8
Габаритні розміри, мм,	не більше 340x160x170

Додатковий циліндр виконує роль нагрівача й охолоджувача робочого тіла, яким в УДС-1 служить повітря. Теплота підводиться до робочого тіла

зовні через стінки циліндра від продуктів згоряння палива, або від іншого джерела тепла.

Таблиця 2.2 – Основні характеристики двигуна Стірлінга

Найменування характеристики ДС	символ	величина
1. Діаметр робочого циліндра	D	40 мм
2. Діаметр циліндра витискувача	D _v	65 мм
3. Діаметр витискувача	d _v	63,4 мм
4. Хід поршня та витискувача	S	30 мм
5. Відношення ходу поршня до діаметру циліндра	S _D	0,75
6. Робочий об'єм	V _s	37,68 см ³
7. Повний об'єм	V _T	130,86 см ³
8. Мертвий об'єм	V _D	93,18 см ³
9. Мінімальний тиск у робочих порожнинах	P _{min}	0,1 МПа

У двигуні UDS-1 немає регенератора тепла, який зазвичай використовується в двигунах постійного струму, і його роль частково виконує витіснювач⁸. Коли повітря проходить через зазор від гарячої порожнини до холодної, витіснювач поглинає частину тепла, а коли повітря повертається з холодної порожнини до гарячої, тепло передається від витіснювача до повітря.

У роботі [15] було запропоновано експериментальний САР ДС із низьким енергоспоживанням. Ця ДС має "мертвий" об'єм, що змінюється для регулювання вихідної потужності, та систему автоматичного керування температурою нагрівача (САР) і частотою обертання колінчастого вала (СЧК), яка є частиною САР. до ДС під'єднано генератор, який можна

використати як електричний переривник у міні Стірлінг Електрик. Агрегат (рис. 2.11) завершено.

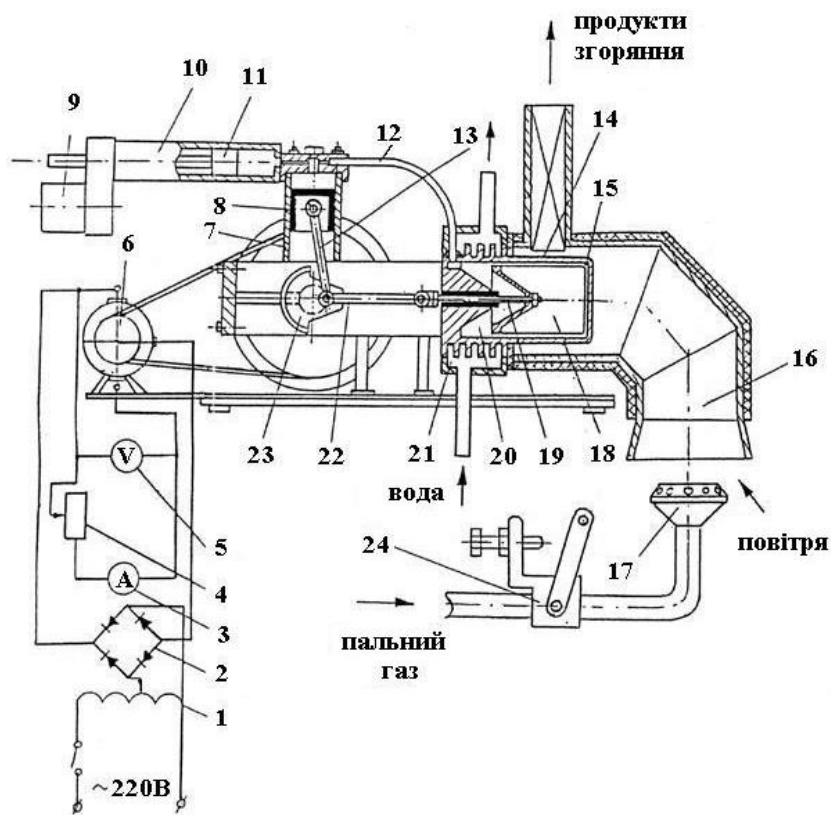


Рисунок 2.11 – Схема експериментального ДС із регулюванням потужності за допомогою «мертвого об'єму»

UDS-1 має додатковий циліндр, який служить нагрівачем і охолоджувачем робочої рідини - повітря. Як паливо використовується скраплений газ пропан-бутан. Температура продуктів згоряння регулюється зміною кількості спалюваного газу і визначається положенням клапана 24.

Внутрішні ланцюги двигуна УДС-1 схильні до витоків. Коли двигун не працює, тиск повітря всередині двигуна дорівнює атмосферному. Робочий циліндр з'єднаний із циліндром 10 з поршнем 11, який може переміщатися за допомогою гвинтової передачі, що приводиться в рух реверсивним електродвигуном 9.

2.3 Вибір генераторів для експериментальної установки

Технічні характеристики електрогенератора (ЕГ) насамперед визначаються швидкістю обертання УДС-1 600 об/хв. Такі ЕГ з вихідною напругою 220 В і номінальною швидкістю обертання характеризуються великими габаритами і не можуть бути використані в конструкціях ЕЕС. Встановлення мультиплікатора економічно недоцільне. Основою для цього дослідження послугувало вивчення семи ЕГ, проведене в лабораторії Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУ "КПІ", унаслідок якого було виявлено найпотужніший ЕГ зі швидкістю обертання 400 об/хв, що є найближчим до швидкості обертання ДС у реальних умовах. Як навантаження було обрано умовне навантаження 15 Ом (формат магазину резисторів) [9].

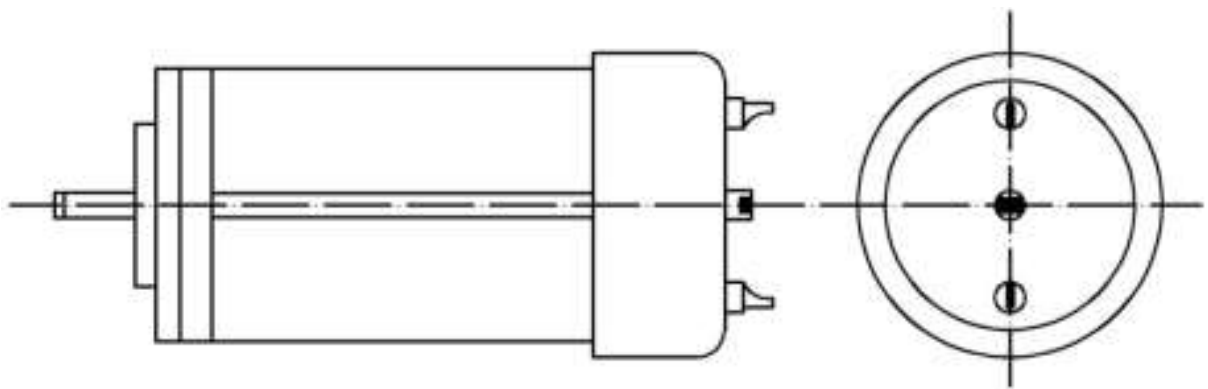


Рисунок 2.12 – Електродвигун марки ДП-2-26

Як динамічний перетворювач було обрано двигун ДП-2-26, що являє собою машину постійного струму з постійним магнітним збудженням. Його принципову схему наведено на рисунку 2.12, а паспортні характеристики - у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Паспортні характеристики ДП-2-26

Частота обертання	3800 об/хв
Напруга	27 В
Струм	1,2 А
Обертаючий момент	29,4 (мН·м)
Напруга живлення	27В ± 2,7 В
Номінальна потужність	12Вт
Номінальний обертаючий момент	0,0294 Нм
Маса	0,3 кг
Довжина	90 мм
Діаметр	39мм
Мінімальне напрацювання	300 год

Висновки до другого розділу

У цьому розділі було спроектовано сонячно-теплову енергоустановку з параболічним концентратором і двигуном Стірлінга, а також розраховано параметри сонячно-теплової енергоустановки.

Отримані результати дали змогу визначити ККД двигуна Стірлінга і всієї установки загалом залежно від прямого сонячного випромінювання. Загалом спостерігається кореляція між теоретичними та експериментальними даними, що свідчить про коректність застосованого теоретико-експериментального підходу. Постійна розбіжність у значеннях температури гарячої зони вказує на те, що для дослідження розбіжності між теоретичними та експериментальними даними необхідні подальші експериментальні записи температури, включно з максимально можливими значеннями температури.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ПАРАБОЛОЇДНОГО ТИПУ ІЗ ДВИГУНОМ СТІРЛІНГА

3.1 Експериментальні дослідження системи сонячний концентратор-двигун Стірлінга-електрогенератор

Тобто експерименти в закритих приміщеннях, експерименти у відкритих приміщеннях і експерименти у відкритих приміщеннях без однієї, двох або трьох секцій СК. У результаті було встановлено пряму залежність між інтенсивністю сонячної радіації і температурою гарячої та холодної порожнин СК, швидкістю обертання і вихідною потужністю СПП. При збільшенні сонячної радіації всі перераховані вище параметри збільшуються, незалежно від того, де проводили експеримент - у закритому або відкритому просторі. Також можна встановити пряму залежність між температурою і швидкістю вітру в гарячій і холодній порожнинах ДК з урахуванням погодних умов.

У таблиці 3.1 наведено усереднені за всіма експериментами значення температури, швидкості обертання і вихідної потужності СЕМ у гарячій і холодній порожнинах джерела живлення постійного струму, перераховані на площу середньої частини джерела живлення постійного струму (Ак).

Експериментами було встановлено пряму залежність між площею сонячного концентратора і температурою гарячої та холодної порожнин СК, швидкістю його обертання та електричною потужністю СЕМ: зі зменшенням площі міделя концентратора зменшуються всі перераховані параметри.

Таблиця 3.1 – Параметри СЕУ в залежності від кількості активних секцій СК

Кількість активних секцій СК	Ак, м2	T1, К	ΔT, К	N, об/хв.	W, Вт
6 (всі)	1,77	897	565	332	1,802
5 (без 1 секції)	1,47	873	542	251	0,919
4 (без 2 секцій)	1,18	858	534	245	0,879
3 (без 3 секцій)	0,88	840	511	162	0,41

Термодинамічний аналіз і розрахунків властивостей ДС з використанням ізотермічної моделі проводили за методом Шмідта відповідно до методики [10]. Результати розрахунків наведено на рисунках 3.1 і 3.2, де результати теоретичних розрахунків подано чорними лініями, а експериментально-теоретичні результати - червоними лініями. В обох випадках спостерігається пряма кореляція між отриманими даними. Зі збільшенням сонячної радіації зростає температура робочої рідини в гарячій порожнині, потужність ДС, ККД ДС і ефективність сонячної електростанції.

Розрахунок загального ККД сонячної електростанції (СЕС) залежно від щільності прямої сонячної радіації.

$$\eta_{CEU} = \eta_{TP} \eta_t, \quad (3.1)$$

де η_{CEU} – коефіцієнт перетворення сонячної енергетичної установки;

η_{TP} – коефіцієнт ефективності теплоприймача;

η_t – ккд двигуна Стірлінга.

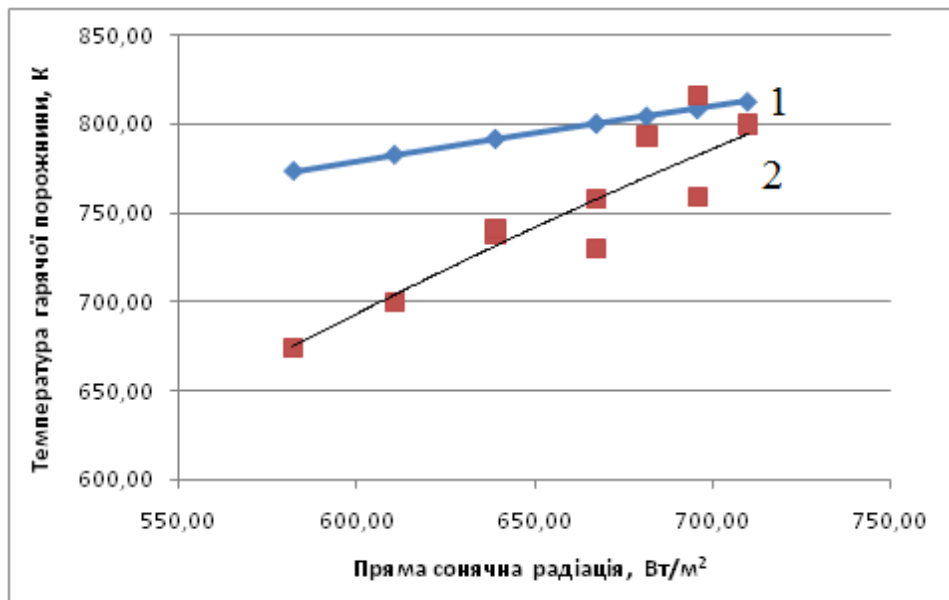
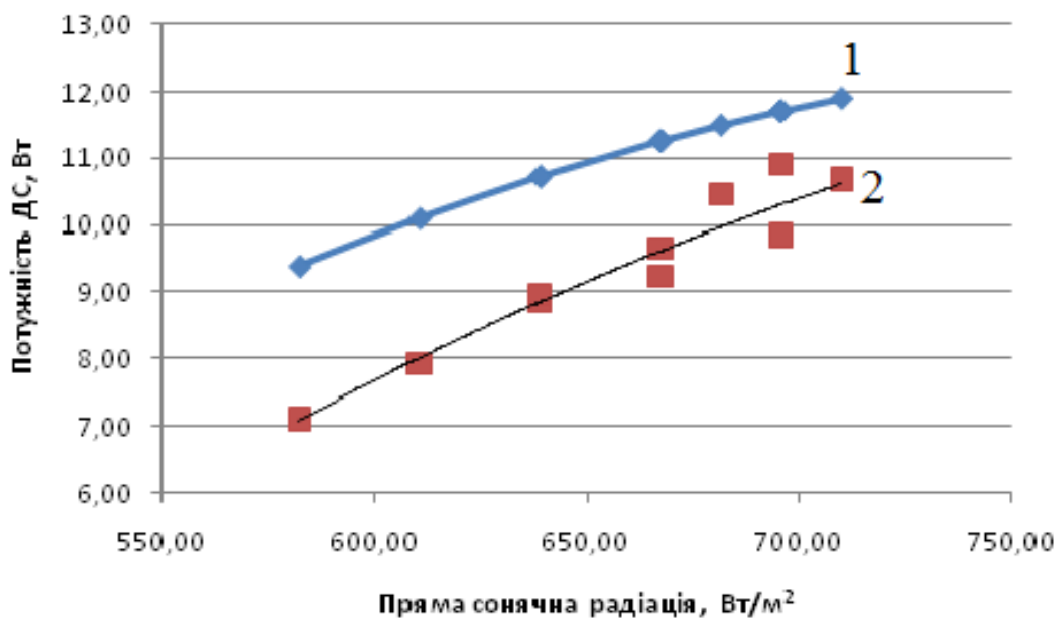


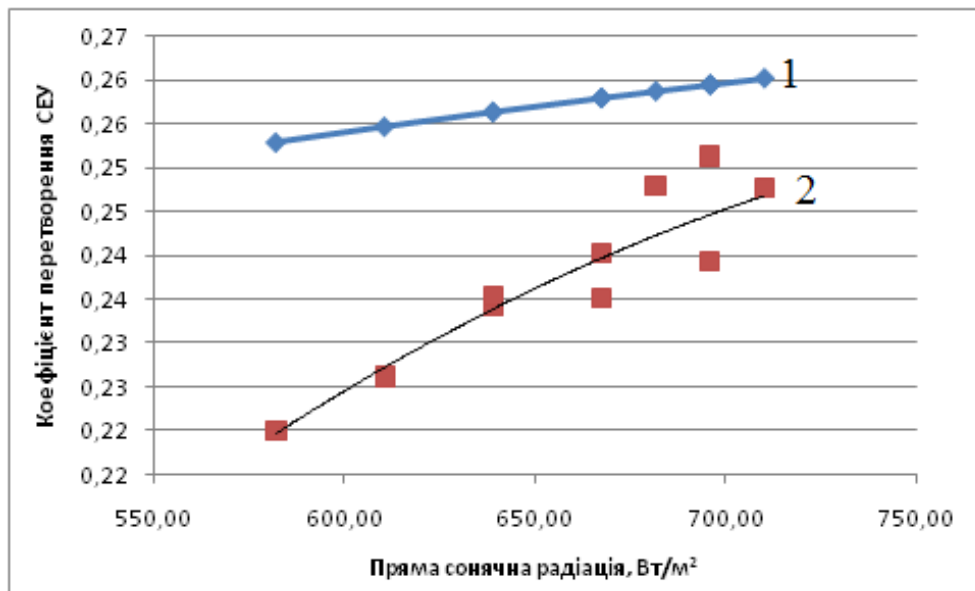
Рисунок 3.1 – Порівняння температури гарячої порожнини ДС при теоретичному підході до розрахунку (залежність 1) і теоретично-експериментальному підході (залежність 2)



1 – теоретичний підхід, 2 – експериментальний підхід
Рисунок 3.2 – Залежність потужності двигуна Стірлінга від прямої сонячної радіації

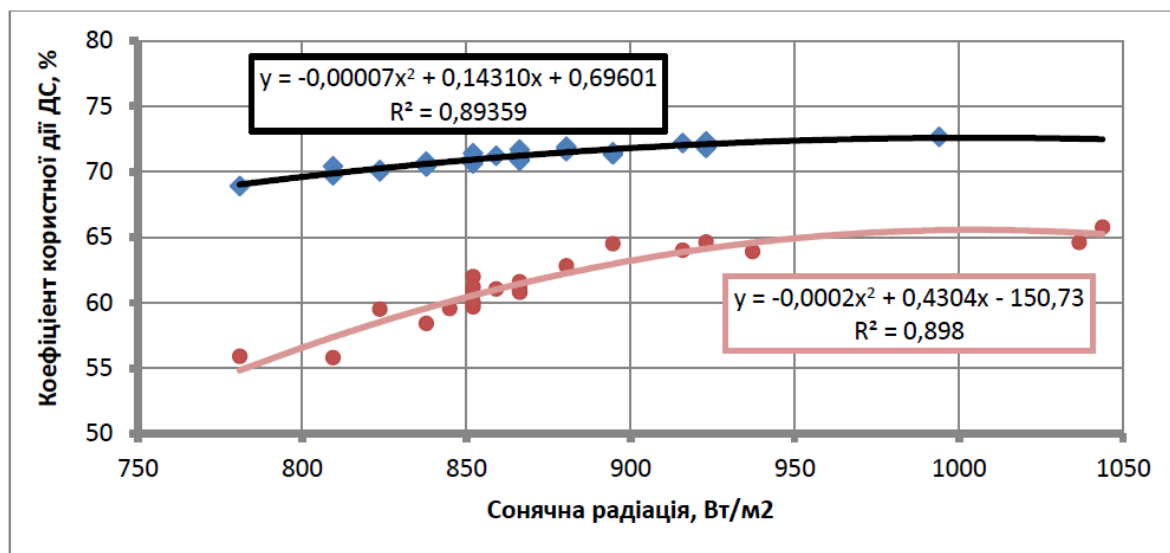
Відповідно до наведеної методики було розраховано основні властивості основних елементів СЕМ та ефективність процесу конверсії. Для

цього використовувалася як суто теоретична методологія, так і підхід, що ґрунтується на експериментальних даних. Результати наведено на рисунках 3.3 і 3.4 [МРМА 23.00.00.000 ГД].



1 – теоретичний підхід, 2 – експериментальний підхід

Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта перетворення СЕУ від прямої сонячної радіації



1 – теоретичний підхід, 2 – експериментальний підхід

Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта корисної дії ДС від прямої сонячної радіації

Було встановлено пряму залежність між інтенсивністю сонячної радіації і температурою гарячої та холодної порожнин ДС, швидкістю обертання і вихідною потужністю СПП. При збільшенні сонячної радіації всі перераховані вище параметри збільшуються, незалежно від того, чи проводився експеримент у закритому або відкритому приміщенні.

Аналогічним чином можна встановити пряму залежність між площею концентратора і температурою гарячої та холодної порожнин ДС, швидкістю обертання і вихідною потужністю СПП. Результати теоретичних та експериментальних розрахунків показують, що між отриманими даними існує пряма залежність. Зі збільшенням сонячної радіації зростає температура робочої рідини в гарячій порожнині, вихідна потужність ДС, ККД ДС і ККД СЕП. Остаточні розрахункові параметри СЕУ (сонячна радіація 753-1044 Вт/м²) такі: ефективність СЕУ може бути збільшена завдяки зниженню температури холодної порожнини та підвищенню тиску в робочій порожнині ДК у разі використання таких конструктивних рішень: водяний або повітряний ДК; примусове охолодження радіатора; нагнітання робочої рідини (повітря) у робочу порожнину ДК до ~3 бар.

3.2 Статичні характеристики двигунів УДС-1

Для вивчення двигуна УДС-1 як регульованого об'єкта звертається увага на його зовнішні та часткові швидкісні статичні характеристики і залежність характеристик двигуна від вхідних параметрів (температури T_n , величини додаткового "мертвого" об'єму і швидкісних характеристик умовних механічних втрат двигуна).

Швидкісною характеристикою двигуна УДС-1 за максимальної температури $T_n \text{ max}$ і поблизу неї є зовнішня швидкісна характеристика. Ця характеристика наведена на малюнку 3.5 [81, 82]. Вона відноситься до діапазону частот обертання вала від мінімальної усталеної частоти обертання

									Арк.
									59
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

$n_{\min}=200$ хв-1 до максимальної частоти обертання холостого ходу $n_{\max}=785$ хв-1, коли додатковий "мертвий" об'єм відключено. Температура $T_n \max=915$ К підтримувалася постійною.

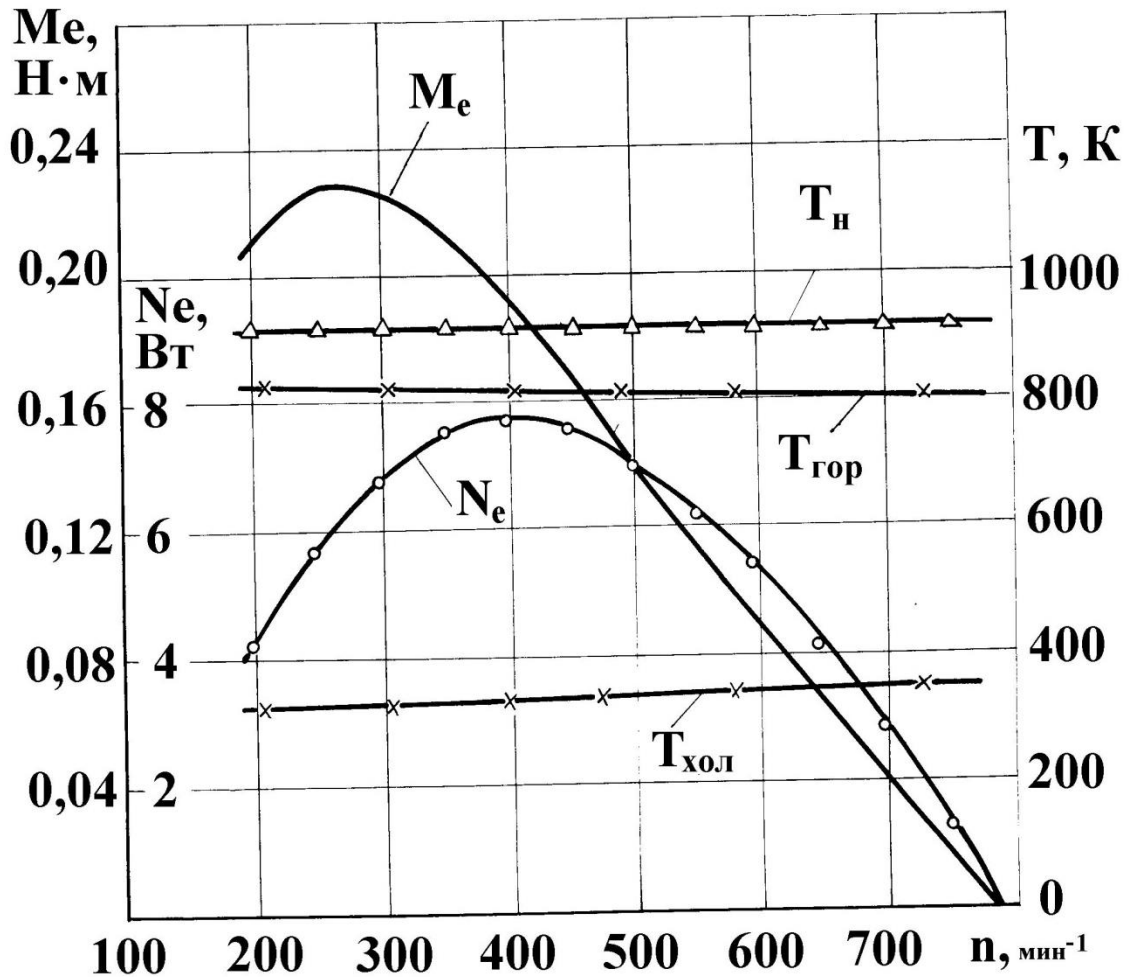


Рисунок 3.5 – Зовнішня швидкісна характеристика двигуна УДС-1

На малюнку 3.5 показано, що залежність N_e і M_e від частоти обертання колінчастого вала аналогічна швидкісним характеристикам бензинового двигуна внутрішнього згорання з іскровим запалюванням. Максимальна потужність $N_e \max = 7,7$ Вт досягається при $n = 400$ хв-1. Температури $T_{\text{гор}}$ і $T_{\text{хол}}$ мало змінюються в межах швидкісної характеристики. Область використання цієї характеристики знаходиться в діапазоні швидкостей обертання 200-400.... 450 хв-1, який можна розглядати як ділянку швидкісної

характеристики. При подальшому збільшенні швидкості обертання Ne зменшується. Це пов'язано з тим, що дедалі більша частина зазначеної потужності витрачається на подолання втрат енергії в самому двигуні, і за $n = 785$ хв-1 витрачається вся зазначена потужність.

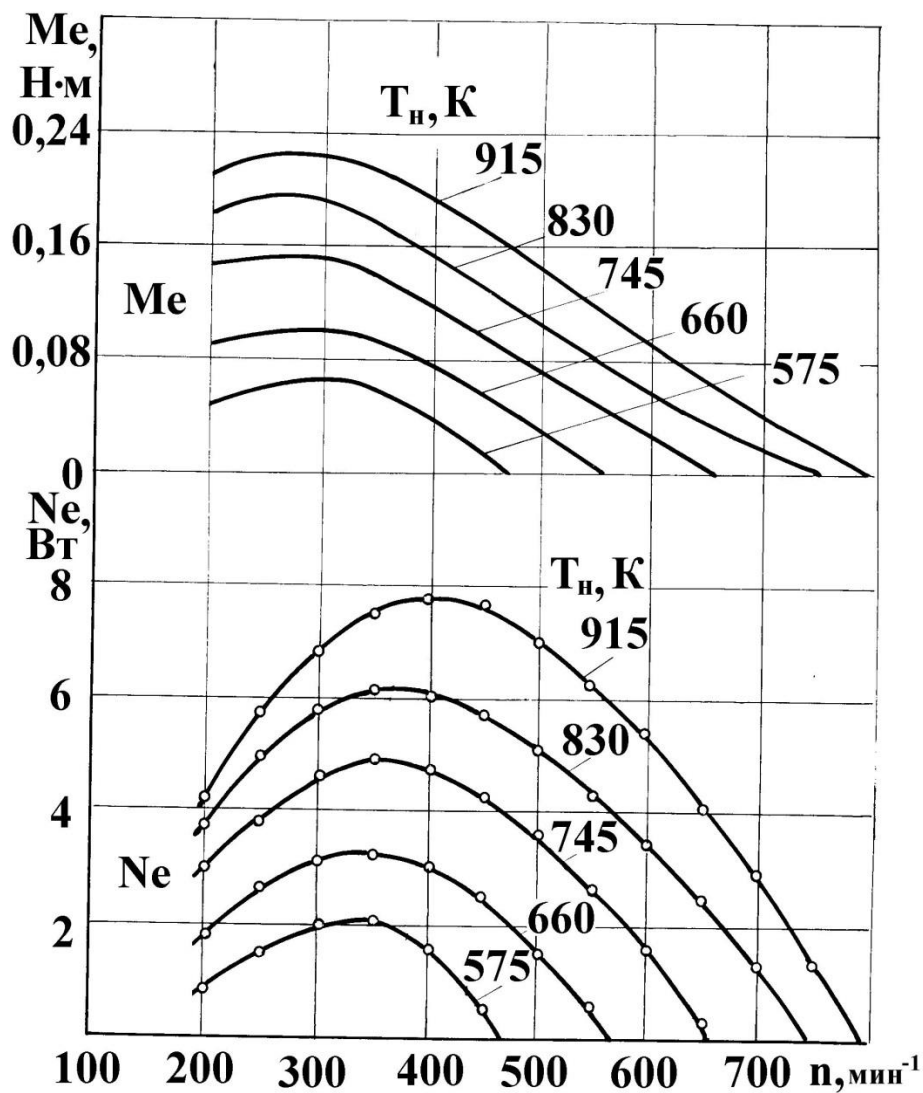


Рисунок 3.6 – Швидкісні характеристики двигуна УДС-1

На рисунку 3.6 показано зовнішні та парціальні швидкісні характеристики, отримані за різних постійних значень температури T_n : зі зменшенням T_n криві ефективної потужності та крутного моменту зміщуються в бік зменшення цих параметрів, а максимальна швидкість стає нижчою.

На малюнку 3.7 показано залежність крутного моменту M_e від температури T_n за постійної частоти обертання колінчастого вала: для кожного значення n крутний момент збільшується майже лінійно зі зростанням температури T_n .

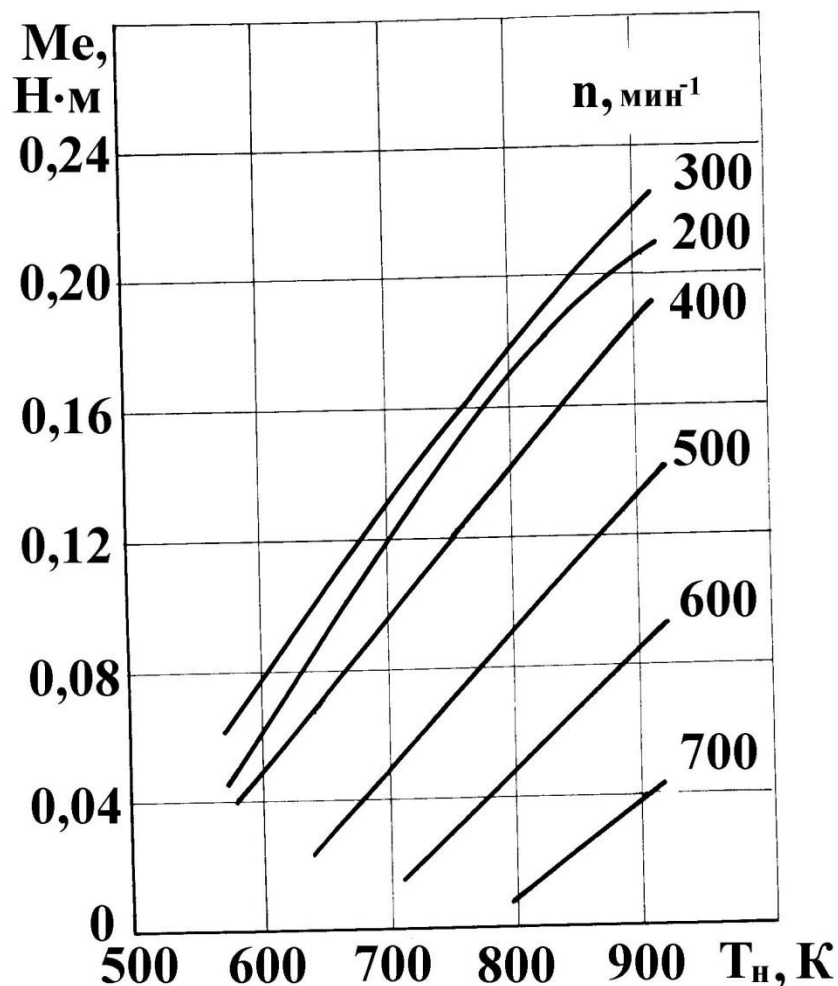


Рисунок 3.7 – Залежності крутного моменту від температури T_n і частоти обертання колінчастого вала двигуна УДС-1

На рисунку 3.8 побудовані залежності крутного моменту M_e від температури T_n при трьох постійних значеннях додаткового “мертвого”

об'єму й постійній частоті обертання $n=400 \text{ хв}^{-1}$. Як видно при кожному значенні V_M крутний момент лінійно збільшується з ростом температури T_H .

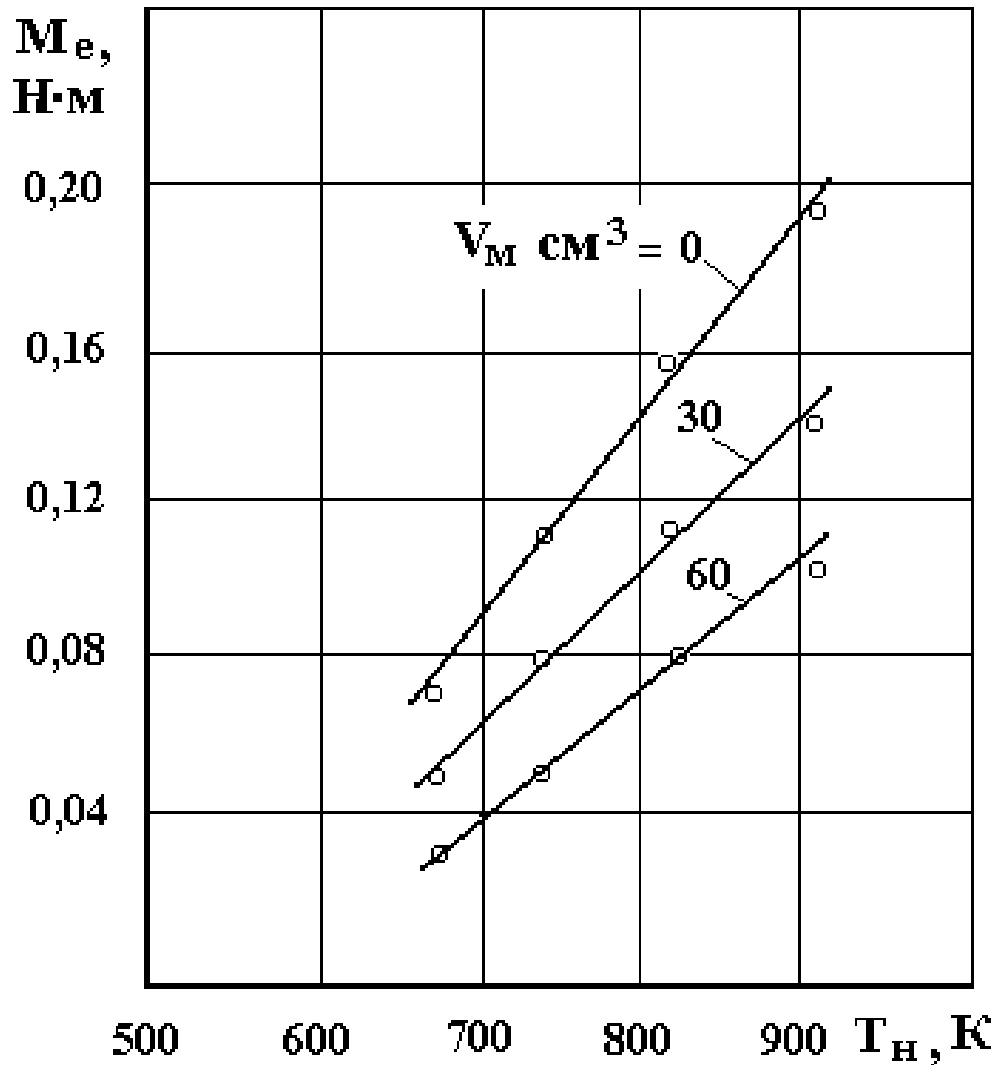


Рисунок 3.8 – Залежності крутного моменту від температури T_H і додаткового об'єму при $n=400 \text{ хв}^{-1}$

Швидкісні характеристики умовних механічних втрат поршневих двигунів внутрішнього згорання можна отримати дослідним шляхом, наприклад, обертаючи колінчастий вал за допомогою електродвигуна. Для ДС цей метод не підходить. Це пов'язано з тим, що при обертанні вала електродвигуном ДС починає працювати як холодильна машина.

Тому умовні механічні втрати у двигуні УДС-1 визначалися в такий спосіб [16].

Відомо, що потужність умовних механічних втрат у теплових двигунах рівна:

$$N_m = N_i - N_e, \quad (3.1a)$$

де N_i , N_e – індикаторна й ефективна потужності, відповідно.

За постійної температури стінок додаткового циліндра змінювалося навантаження на генератор і знімалися швидкісні характеристики двигуна за методикою SEA. Під час зміни швидкісної характеристики в робочому циліндрі створювався тиск, змінювалися ефективна потужність і частота обертання вала двигуна УДС-1.

За індикаторною діаграмою розраховували індикаторну потужність, а за рівнянням (3.1a) отримували потужність N_m .

Звісно, отримане значення N_m містить у собі втрати генератора і пасової передачі. Іншими словами, це не потужність двигуна, а потужність механічних втрат усієї СЕС разом із первинним двигуном. Це саме те, що необхідно для математичної моделі.

На малюнку 3.9 наведено швидкісні характеристики двигуна УДС-1, отримані цим методом, де показано залежність індикаторної потужності, ефективної потужності та умовної потужності механічних втрат від частоти обертання колінчастого вала двигуна [84]. Ці характеристики отримано за температури $T_n = 920$ К.

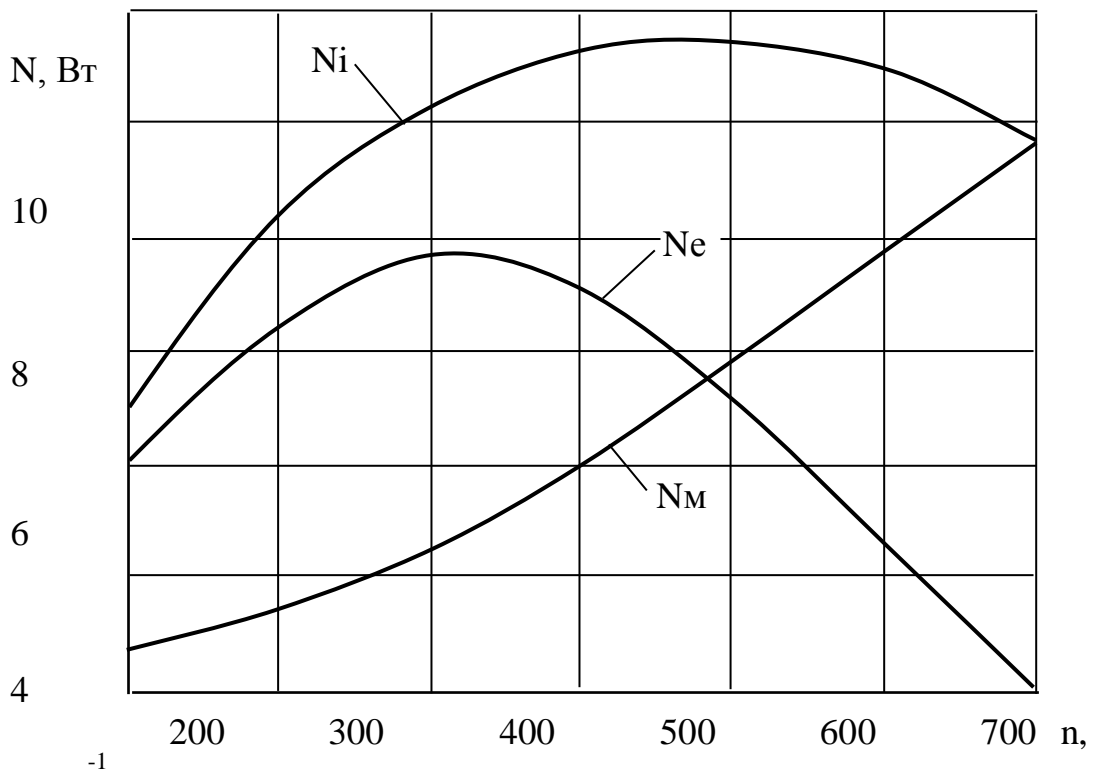


Рисунок 3.9 – Швидкісна характеристика двигуна УДС-1

Потужність N_i швидко зростає до швидкості обертання $n = 550$ хв-1, а потім поступово знижується; N_m збільшується параболічно зі зростанням швидкості обертання, при цьому N_e досягає максимуму за $n = 450$ хв-1 і нуля за $n = 785$ хв-1. За цієї швидкості обертання $N_m = N_i$.

На малюнку 3.10 показано залежність моменту M_m умовних механічних втрат, розрахованого за даними малюнка 3.9, від частоти обертання колінчастого вала n .

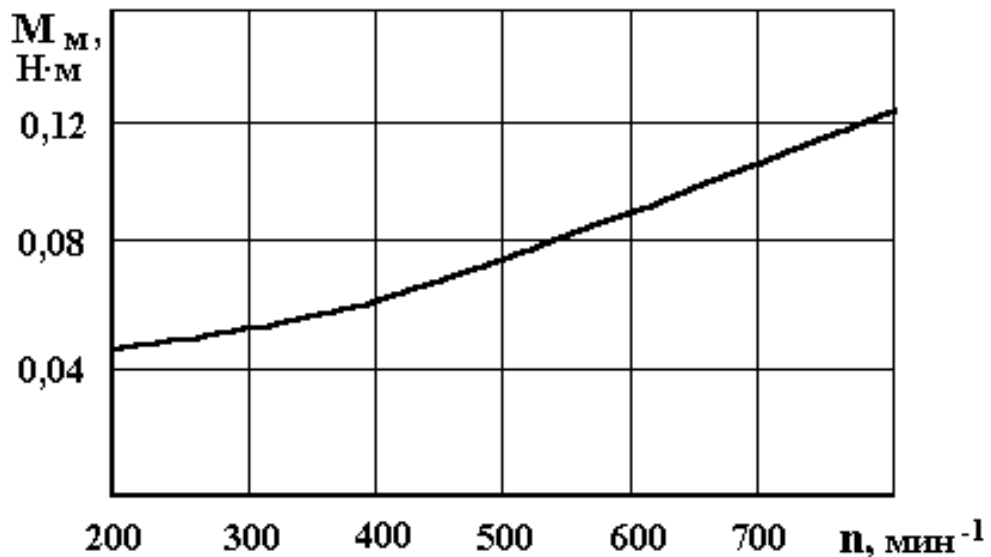


Рисунок 3.10 – Швидкісна характеристика умовних механічних втрат двигуна УДС-1 при $T_n=920$ К

Видно, що ця залежність має параболічний характер. Для математичної моделі вона апроксимована поліномом

$$M_m = 0,0504 - 5,5607 \cdot 10^{-5} \cdot n + 2,0178 \cdot 10^{-7} \cdot n^2. \quad (3.2)$$

Висновки до третього розділу

1. проведено експериментальне дослідження параболічного концентратора сонячної батареї з двигуном Стірлінга.
2. встановлено пряму залежність між інтенсивністю сонячного випромінювання і температурою гарячої та холодної порожнини ДС, швидкістю обертання і вихідною потужністю СПП: при збільшенні сонячного випромінювання всі перераховані параметри збільшуються,

незалежно від того, де проводили експеримент - у закритому або відкритому просторі.

3. встановлено пряму залежність між площею сонячного концентратора і температурою гарячої та холодної порожнин ДС, швидкістю обертання і вихідною потужністю СПП: у разі зменшення площі міді концентратора всі перераховані вище параметри зменшуються.
4. остаточні розрахункові параметри СПП (сонячна радіація 753-1044 Вт/м²): ККД СК 45%, ККД ДС 55-68%, ККД ЕГ 5-14%, ККД ЕО 1-14% ККД ЕО можна знизити за рахунок зниження температури холодної порожнини та збільшення тиску в робочій порожнині ДС; під час проєктування рішення можуть бути використані для поліпшення: примусове охолодження радіатора ДС водою або повітрям; нагнітання робочої рідини (повітря) в робочу порожнину ДС до ~3 бар.
5. розраховано статичні характеристики УДС-1: швидкісні характеристики умовних механічних втрат двигуна УДС-1 за $T_n = 920$ К.

						Арк.
						67
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської дисертації було вирішено такі завдання:

- аналіз існуючих рішень щодо використання сонячних концентраторів;
- аналіз існуючих конструкцій двигунів Стірлінга;
- розроблено математичну модель параболічного сонячного концентратора з двигуном Стірлінга;
- розроблено лабораторний стенд для дослідження ефективності параболічних сонячних концентраторів з двигунами Стірлінга;
- результати дослідження будуть впроваджені в навчальний процес у вигляді методичних вказівок до лабораторного практикуму, в тому числі. фахівців спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» із курсу «Нетрадиційні джерела енергії».

						Арк.
						68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Tadashi Kondoh, Kikuo Katoh. Automotive Stirling Engine Development for Small Passenger Car// SAE Techn. Pap. Ser. –1988.- №880538. – 7 p.
2. Hiester Nevin K., Tietz Thomas E., Loh Eugene, Duwez Pol. Theoretical considerations on performance characteristics of solar furnaces // Jet Propulsion. Journal of the American Rocket Society. – 1957. – vol.27. – №5. – P. 507-513, 546.
3. Meacher John S. Mod II automotive Stirling engine performance and manufacturing cost reduction. – SAE Techn. Pap. Ser., 1989. - №890151. – 11p.
4. Michael A. Simetkosky. Automotive Stirling Engine Development Program. Mod I Stirling Engine Development. 18th Inrsociety Energy Conversion Engineering Conf.: Energy Marketplace, Orlando, Flo, Aug. 21-26, 1983. Proc. Vol.2, p. 856-862.
5. Alber E. Richney. Mod II Automotive Stirling Engine Description and Performance Projections. – SAE Tech. Pap. Ser., 1986. - №860059. – 8p.
6. Roger A. Farrel. Mod II Stirling Engine Overview. – SAE Techn. Pap. Ser., 1988. - №880539. – 12p.
7. V160 Stirling Engine Program Update / Lohansson L., Torstensson B., Williams T.Y., Houtman W.H., Monahan R.// SAE Techn. Pap. Ser.- 1988.- №880542.-9p.
8. Richney A.E.. Mod.2 Automotive Stirling Engine Description and Performance Projections // SAE Techn. Paper Ser.- 1986.- №860059. – 8 p.
9. Студенець В.П., Пасічний В.В, Остапенко С.О., Миротюк П.А. Дослідницький стенд «сонячний концентратор – двигун Стірлінга та його базові характеристики // Відновлювана енергетика. – 2011. – №1(24) – С. 5-10.

									Арк.
									69
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

10. Птуха А.А., Студенець В.П. Сонячна енергоустановка “Офсетний концентратор – двигун Стірлінга” // Енергетика. Екологія. Людина. – 2012. - №1 – С. 451-461.

11. Chip Hinde and Robert Stotts. Automotive Stirling Engine System Component Review. – SAE Techn. Pap. Ser., 1987. - №870102. – 5p.

12. Постол Ю.О. Перехідні процеси в САР дослідного міні Стірлінг – електричного агрегату // Тези доповідей на 59-й науковій конференції НТУ. – К.: НТУ, 2003. – С. 9.

13. Долганов К.Є., Лісовал А.А., Мержиєвська В.В., Постол Ю.О. Регулювання потужності двигуна Стірлінга моделі УДС-1 // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів: Зб. наук. пр. – К.: НТУ; ТАУ, 2003. - №16. – С.56-60.

14. Долганов К.Є., Постол Ю.А. Характеристики мініатюрного двигателя Стирлінга моделі УДС-1 // Авіаційно-космічна техніка і технологія. Двигуни та енергоустановки: Зб. наук. пр. / НАУ “ХАІ”. –Харків: “ХАІ”, 2002. –Вип.30. - С.28-30.

15. Долганов К.Є., Лісовал А.А., Постол Ю.О. Вдосконалення двигуна Стірлінга моделі УДС-1 // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів: Зб. наук. пр. – К.: УТУ, 2001. - №11. – С.26-30.

16. Долганов К.Є., Мержиєвська В.В., Постол Ю.О. Характеристики удосконалення двигуна Стирлінга моделі УДС-1 // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів: Зб. наук. пр. – К.: НТУ; ТАУ, 2002. - №13. – С.13-18.