

УДК 621.4

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2023.1-38.0201>**Ігор Косминський**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри Машин і Обладнання Технологічних Процесів,  
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,  
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0234-7166>  
E-mail: [kosminskyi.iv@knuba.edu.ua](mailto:kosminskyi.iv@knuba.edu.ua)

**Ілля Санкін,**

студент спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»  
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,  
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна  
E-mail: [sankin\\_ko@knuba.edu.ua](mailto:sankin_ko@knuba.edu.ua)

**Катерина Левчук**

студентка спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»  
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,  
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна  
E-mail: [levchuk\\_ilya@knuba.edu.ua](mailto:levchuk_ilya@knuba.edu.ua)

## ВИБІР СТИРЛІНГ ТЕХНОЛОГІЇ, ЯК ШЛЯХ ДО ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТРАДИЦІЙНИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

**ABSTRACT.** Проаналізовано можливості використання двигунів Стірлінга в якості енергоперетворюючої техніки. В глобальному огляді технологій перетворення енергії він визнаний двигуном з потенціалом для подальшого розвитку. Високий ККД, простота та надійність конструкції двигуна Стірлінга зумовлюють ефективність його використання у різних енергетичних установках, зокрема в когенераційних. Найбільш перспективним напрямком розвитку децентралізованого теплопостачання з точки зору максимального наближення джерела тепла до споживача є використання теплових насосів. Використання теплових насосів дозволяє скоротити споживання паливних ресурсів на 10% на рік та утилізувати відпрацьоване тепло з навколишнього середовища.

**Ключові слова:** енергозбереження, двигун Стірлінга, когенераційні установки, теплові насоси, електрогенератори.

## CHOOSING STIRLING TECHNOLOGY AS A WAY TO ENERGY SAVING AND REDUCING THE USE OF TRADITIONAL ENERGY RESOURCES

**ABSTRACT.** The possibility of using Stirling engines as energy converting equipment is analyzed. In a global review of energy conversion technologies, it is recognized as an engine with potential for further development. The high efficiency, simplicity and reliability of the Stirling engine design determine the effectiveness of its use in various power plants, in particular in cogeneration ones. The most promising development direction of decentralized heat supply from the point of view of bringing the heat source as close as possible to the consumer is the use of heat pumps. The use of heat pumps allows you to reduce the consumption of fuel resources by 10% per year and dispose of waste heat from the environment.

**Key words:** energy saving, Stirling engine, cogeneration plants, heat pumps, electric generators.

У всіх розвинених країнах світу (перш за все, ЄС і США) основою інноваційного розвитку промисловості стає завдання переходу на новий технологічний рівень, пов'язаний з енергозбереження, екології та скороченням частки використання традиційних енергоресурсів. Так, до 2025 року в країнах ЄС більше 20% енергії вироблятиметься за рахунок використання альтернативних і поновлюваних видів палива. [1].

Як відзначають автори [2,13] у світових оглядах по енергоперетворюючій техніці, двигун Стірлінга розглядається як двигун, що володіє можливостями для подальшої розробки. Двигун Стірлінга відноситься до класу двигунів із зовнішнім підведенням

теплоти (ДЗПТ). У зв'язку з цим, в порівнянні з ДВЗ, в двигунах Стірлінга процес горіння здійснюється поза робочих циліндрів і протікає більш рівноважно, робочий цикл реалізується в замкнутому внутрішньому контурі при малих швидкостях підвищення тиску в циліндрах двигуна, плавному характеру теплогідролічних процесів робочого тіла внутрішнього контуру, при відсутності газорозподільчих механізмів клапанів».

Сучасні традиційні системи автономного енергопостачання на основі термомеханічних установок були адаптовані до рівня суспільного і технологічного розвитку. Однак, зростання нагальних національних і глобальних проблем, таких як виснаження природних ресурсів, енергетична криза, забруднення навколишнього середовища, руйнування озонового шару і посилення парникового ефекту, зумовили необхідність прийняття у другій половині 20-го століття низки важливих міжнародних і українських законів з питань екології, природокористування та енергозбереження.[3,4]. Основним змістом цих законів було скорочення викидів CO<sub>2</sub>, припинення виробництва озоноруйнівних речовин і фреону R-12, холодоагенту, що використовується в парокомпресійних холодильних машинах (ПКХМ), ресурсо- та енергозбереження, а також перехід автомобільного транспорту на екологічно чисте паливо.

До переваг машин Стірлінга можна віднести наступні ключові особливості, які є унікальними для машин Стірлінга і є передумовою їх широкого застосування практично у всіх галузях промисловості і техніки

- Сам термодинамічний цикл надзвичайно універсальний і може бути перероблений для створення перетворювачів як прямого, так і зворотного циклу;
- Найвища енергоефективність (теоретичний ККД ідеального циклу машини Стірлінга дорівнює ККД циклу Карно);
- Високий ступінь екологічної чистоти як самої машини, так і вихлопних газів від її роботи;
- Використання місцевої сировини та нетрадиційних джерел тепла, таких як сонячне тепло, природний газ, торф, вугілля тощо.

У глобальному огляді технологій перетворення енергії двигун Стірлінга був визнаний двигуном з потенціалом для подальшого розвитку. Низький рівень шуму, низький рівень викидів, здатність працювати на різних видах палива, тривалий термін служби, порівняні розміри і вага, хороші характеристики крутного моменту - це ті параметри, які дозволять двигунам Стірлінга замінити двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) в найближчому майбутньому.

Двигуни Стірлінга належать до класу двигунів із зовнішнім підведенням теплоти (ДВТ). Тому, порівняно з двигунами внутрішнього згорання, двигуни Стірлінга працюють більш рівномірно, а процес згорання відбувається поза робочим циліндром. Робочий цикл здійснюється в замкнутому внутрішньому контурі з відносно низькою швидкістю підвищення тиску в циліндрі двигуна, плавними теплогідролічними процесами в робочих елементах внутрішнього контуру і відсутністю шлепакового механізму газорозподілу.

Широке використання автономних джерел енергії, що працюють на місцевому паливі, відображає світову тенденцію до енерго- та ресурсозбереження. Цей напрямок інтенсивно розвивається у країнах, що мають значний запас біоресурсів (ліси, торф'яних боліт тощо): Швеції, Норвегії, Данії, Фінляндії, прибалтійські країни. Найбільших результатів досягла Швеція. Природний газ як енергетичне паливо в шведській енергетиці займає трохи більше 2%, тоді як біоресурси дають більше 21% від загального обсягу одержуваної енергії.[5] Загалом у країнах Європейського Союзу близько 14% загальної енергії отримано із біоресурсів [6]. В Індії програма децентралізації виробництва енергії, ініційована у 1995 році, дозволить вже найближчим часом забезпечити отримання енергії з біоресурсів у кількості 44% від запланованого споживання електроенергії[7].

В даний час низкою провідних компаній (Philips, STM Inc., Daimler Benz, Solo, United Stirling) розпочато виробництво двигунів, технічні характеристики яких вже зараз перевершують ДВС і газотурбінні установки (ГТУ). Ці двигуни мають ефективний ККД (до 45%), питому масу від 3,8 до 1,2 кг/кВт, ресурс до 40 тис. годин та потужність від 3 до 1200 кВт[8].

Високий ККД, простота та надійність конструкції двигуна Стірлінга зумовлюють ефективність його використання у сонячних енергетичних установках. Сонячне світло фокусується увігнутими дзеркалами для розігріву двигуна (як джерело тепла). У ролі охолоджувача може використовуватися навколишнє атмосферне повітря. Роль такого екологічно чистого джерела енергії у світі легко оцінити. З відомих практично реалізованих сонячних установок для отримання електроенергії найбільшим ККД мають установки з параболічним дзеркалами і двигунами Стірлінга [9]. Концентратор з двома ступенями свободи відображає сфокусовані промені, переміщаючись з урахуванням річних та добових змін положення Сонця. Промені прямують на теплообмінник, в якому нагрівається робоче тіло двигуна Стірлінга, що приводить генератор електричного струму.

В умовах зростання цін на основні енергоносії практика показала, що набагато вигідніше отримувати електроенергію і тепло від невеликих локальних теплових електростанцій (когенераційних установок). Когенерація - це нова технологія комбінованого виробництва електричної та теплової енергії на основі незалежних двигунів і систем рекуперації тепла, які використовують енергію охолоджувальної води та вихлопних газів для потреб опалення споживачів.

Когенераційні установки з двигунами Стірлінга потужністю від десятків до тисяч кВт матимуть незаперечну перевагу над відомими автономними електростанціями з двигунами внутрішнього згоряння. Порівняно з двигунами внутрішнього згоряння, ефективність двигунів Стірлінга в когенераційних установках обумовлена особливістю їх теплового балансу, що виражається як різниця між тепловими втратами з вихлопними газами і з охолоджувальною водою. У випадку двигунів Стірлінга цей баланс становить 10% і 40% відповідно і, враховуючи високий ККД двигуна, дозволяє створити компактну і високоефективну когенераційну установку. В інших країнах розпочато виробництво когенераційних установок з двигунами Стірлінга, що працюють на деревній трісці, торфі, біогазі та сільськогосподарських відходах (рисовій лушпинні, кавовій лушпинні) потужністю 5-40 кВт і тепловою потужністю 12-120 кВт [10].

Ця нова технологія відкриває великі можливості для забезпечення електроенергією і теплом сіл, ферм та інших об'єктів. Це допоможе вирішити багато проблем, пов'язаних з міським житлово-комунальним господарством. Магістральні трубопроводи централізованого теплопостачання дуже довгі, а це означає, що значна частина теплової енергії втрачається під час транспортування гарячої води від ТЕЦ до споживача. Якщо в мікрорайоні встановити районні теплоелектроцентралі на базі когенераційних установок з двигуном Стірлінга, вони можуть цілий рік забезпечувати недорогими електроенергією, теплом і гарячою водою житлові будинки, школи і дитячі садки.

Найбільш перспективним напрямком розвитку децентралізованого теплопостачання з точки зору максимального наближення джерела тепла до споживача є використання теплових насосів. Використання теплових насосів дозволяє скоротити споживання паливних ресурсів на 10% на рік та утилізувати відпрацьоване тепло з навколишнього середовища. Теплові насоси на основі циклу Стірлінга можуть забезпечити 3-7 кВт тепла з 1 кВт електроенергії. Теплові насоси Стірлінга можуть використовуватися для забезпечення теплом нових і реконструйованих будівель і споруд і особливо ефективні для установки в розосереджених будівлях, таких як ферми, митниці, піонерські поселення, котеджі і приватні житлові будинки.

Основна відмінність теплових насосів Стірлінга від інших теплових насосів, таких як парокомпресійні та абсорбційні теплові насоси, полягає в тому, що робоче тіло теплового насоса Стірлінга не змінює фазового стану протягом усього циклу, так що навіть зовнішнє повітря з температурою нижче  $-30^{\circ}\text{C}$  може використовуватися як відпрацьоване низькопотенційне тепло, а тепло з температурою вище  $100^{\circ}\text{C}$  - як теплоносії для системи опалення. Ще однією перевагою теплових насосів Стірлінга є їхня висока термодинамічна ефективність і використання екологічно чистих приводів.

Найбільш перспективним є серійне виробництво електрогенераторів невеликої потужності з модифікацією двигуна Стірлінга під місцеве біопаливо: торф, відходи сільського

господарства і лісопереробній промисловості. Нова технологія відкриває широкі можливості для постачання електроенергією і теплом сільських районів, селищ, фермерських господарств, тваринницьких ферм, птахофабрик і тощо. Вона також допоможе вирішити багато проблем житлово-комунальних господарств міст.

Серійне виробництво двигунів Стірлінга дозволить забезпечити завантаження високотехнологічних підприємств вітчизняного машинобудування та експорт наукомістких технологій в області автономної енергетики.

### Список використаних джерел:

1. Економічна Правда. (2022). Як війна в Україні пришвидшує перехід ЄС на відновлювані джерела енергії. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2022/05/12/686934/>.
2. О.П. Шматенко, Ю.І. Семірненко, І.І. Семірненко, А.М. Соломенний (2017) Використання малих когенераційних установок з двигунами Стірлінга для виробітку енергії в модульних системах військово-медичних підрозділі. Наук.-практ. журн. «Військова Медицина України», № 2, Том 17, с. 85-90. URL: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/6696/1/1.pdf>.
3. Постанова Верховної Ради України. (2000) Про рекомендації парламентських слухань щодо дотримання вимог екологічного законодавства в Україні, напрямів реалізації та вдосконалення екологічної політики. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2130-14#Text>.
4. Закон України. (2019). Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>.
5. Біоенергетична асоціація України. (2022). Досвід ефективного заміщення викопних палив відновлюваними у європейських країнах. URL: <https://uabio.org/materials/12780/>.
6. Каталоги | Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського (2011). URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/ecee\\_2011\\_11\\_7.pdf](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/ecee_2011_11_7.pdf).
7. Зварич І.Я. (2015). Енергетичне Майбутнє Індії. DSpace at West Ukrainian National University, с. 15. URL: <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/12059/1/ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАЙБУТНЄ ІНДІЇ.pdf>.
8. Двигун Стірлінга. Журнал "Аква-Терм" №3 (67), 2012 URL: <https://td-bm.com.ua/blogs/dvigun/uk/vnesnij-dvigun-stirlinga/>.
9. Внутренний сайт АУЭС - aues.kz. (2020). Проект микро ТЭЦ на основе твердотопливного котла и двигателя Стирлинга. URL: [https://info.aues.kz/diploms/2016/tef/pte/anorbaev\\_ka\\_AUES.pdf](https://info.aues.kz/diploms/2016/tef/pte/anorbaev_ka_AUES.pdf).
10. ТОВ "ВІССМАНН". (2023). Використання когенерації для децентралізованого виробництва електроенергії. URL: <https://www.viessmann.ua/uk/zhytlovi-budynky/jaka-opaliuvalna-systema/koheneracia.html>.
11. Stirling Engine Assessment, EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 1007317. –URL: <http://www.engr.colostate.edu/~marchese/mech337-10/epri.pdf>.
12. Паращук В. Р. (2019). Енергоефективність застосування двигунів Стирлінга з концентратором сонячного випромінювання : дипломна робота магістра за спеціальністю „141 — електроенергетика, електротехніка та електромеханіка“. — Тернопіль: ТНТУ, 2019. — 104 с.
13. Пирогов В.В., Якушева Н.О. (2017). Перспективи Розвитку І Області Застосування Двигунів Стірлінга. Міжнародна науково-практична конференція. м. Ужгород, 21-22 квітня 2017 р., с. 38-41. URL: <http://molodyvcheny.in.ua/files/conf/tech/14april2017/122.pdf>.
14. Леонов Д. М., Буслова Н. В. (2020). Розвиток Альтернативної Енергетики В Україні: Перспективи Та Проблеми. International scientific e-journal: ΛΟΓΟΣ. ONLINE. № 16. DOI: <https://doi.org/10.36074/2663-4139.16.14>.

### REFERENCES:

1. Economic Truth. (2022). Jak vijna v Ukraini prishvidshue perehid ES na vidnovljuvani dzhherela energii (How the war in Ukraine is speeding up the EU's transition to renewable energy sources). URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2022/05/12/686934/>.
2. Shmatenko O.P., Semirnenko Yu.I., Semirnenko I.I., Straw A.M. (2017). Viktoristannja malih kogeneracijnih ustanovok z dvigunami Stirlinga dlja virobitku energii v modul'nih sistemah vijs'kovo-medichnih pidrozdili (The use of small cogeneration units with Stirling engines for power generation in

- modular systems of the military-medical unit.). Scientific and practical journal "Military Medicine of Ukraine", No. 2, Vol. 17, p. 85-90. URL: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/6696/1/1.pdf>.
3. Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine. (2000) Pro rekomendacii parlaments'kih sluhan' shhodo dotrimannja vimog ekologichnogo zakonodavstva v Ukraïni, naprjamiv realizacii ta vdoskonalennja ekologichnoï politiki (On the recommendations of the parliamentary hearings regarding compliance with the requirements of environmental legislation in Ukraine, directions for implementation and improvement of environmental policy). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2130-14#Text>.
  4. Law of Ukraine. (2019). Pro Osnovni zasady (strategiju) derzhavnoï ekologichnoï politiki Ukraïni na period do 2030 roku (About the Basic principles (strategy) of the state environmental policy of Ukraine for the period up to 2030). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>.
  5. Bioenergy Association of Ukraine. (2022). Dosvid efektyvnogo zamishhennja vikopnih paliv vidnovljuvanymi u evropejs'kih kraïnah (Experience of effective replacement of fossil fuels with renewable ones in European countries). URL: <https://uabio.org/materials/12780/>.
  6. Katalogi | Nacional'na biblioteka Ukraïni imeni V. I. Vernads'kogo (Catalogs | National Library of Ukraine named after V. I. Vernadskyi). (2011). URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/ecee\\_2011\\_11\\_7.pdf](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/ecee_2011_11_7.pdf).
  7. Zvorych I.Ya. (2015). Energetichne Majbutne Indii (India's Energy Future). DSpace at West Ukrainian National University, p. 15. URL: <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/12059/1/ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАЙБУТНЄ ІНДІЇ.pdf>.
  8. Dvigun Stirlinga (Stirling engine). Aqua-Term" magazine. No. 3 (67), 2012 URL: <https://td-bm.com.ua/blogs/dvigun/uk/vnesnij-dvigun-stirlinga/>.
  9. Internal site of AUES - aues.kz. (2020). Proekt mikro TJeC na osnovе tverdotoplivnogo kotla i dvigatelja Stirlinga (Micro CHP project based on solid fuel boiler and Stirling engine). URL: [https://info.aues.kz/diploms/2016/tef/pte/anorbaev\\_ka\\_AUES.pdf](https://info.aues.kz/diploms/2016/tef/pte/anorbaev_ka_AUES.pdf).
  10. "WISSMANN" LLC. (2023). Viktoristannja kogeneracii dlja decentralizovanogo virobnictva elektroenergi (Use of cogeneration for decentralized electricity production). URL: <https://www.viessmann.ua/uk/zhytlovi-budynky/jaka-opaliuvalna-systema/koheneracia.html>.
  11. Stirling Engine Assessment, EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 1007317. –URL: <http://www.engr.colostate.edu/~marchese/mech337-10/epri.pdf>.
  12. Paraschuk V.R. (2019). Energoefektivnist' zastosuvannja dviguniv Stirlinga z koncentratorom sonjachnogo viprominjuvannja (Energy efficiency of using Stirling engines with a solar radiation concentrator) : master's thesis by specialty „141 — eelectrical engineering, electrical engineering and electromechanics“. — Ternopil: TNTU, 2019. — p.104.
  13. Pirogov V.V., Yakusheva N.O. (2017). Perspektivi Rozvitku I Oblasti Zastosuvannja Dviguniv Stirlinga (Prospects for the Development and Applications of Stirling Engines). nternational scientific and practical conference. Uzhhorod city, 21-22 April, p. 38-41. URL: <http://molodyvcheny.in.ua/files/conf/tech/14april2017/122.pdf>.
  14. Leonov D. M., Buslova N. V. (2020). Rozvitok Al'ternativnoï Energetiki V Ukraïni: Perspektivi Ta Problemi (Development of Alternative Energy in Ukraine: Prospects and Problems). International scientific e-journal: ΛΟΓΟΣ. ONLINE. No. 16. DOI: <https://doi.org/10.36074/2663-4139.16.14>.