

ДВИГУНИ SCB STIRLING: ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ

Мазін В.О., Сухонос Р.Ф.

Запорізький національний технічний університет (Україна)

Вступ. В умовах сучасного стану ринку енергоресурсів зростає роль перспективних та альтернативних джерел механічної енергії, зокрема двигунів із зовнішнім підведенням теплоти, серед яких виділяється клас машин, що узагальнено названі «двигуни Стірлінга» (ДС), які працюють за замкнутим термодинамічним циклом, близьким до циклу Стірлінга. Широке використання теплових двигунів такого типу спроможне зробити значний внесок до забезпечення енергонезалежності України, що наразі є актуальним питанням.

Актуальність досліджень. Річна потреба України в електродвигунах і двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ) потужністю від 500 Вт до 3000 Вт оцінена близько 300 тисяч штук. Третя частина з них – ті, які використовуються стаціонарно, може бути замінено на ДС. Виглядає перспективним використання ДС зазначеної потужності у фермерських та приватних господарствах для приводу компресорів, електрогенераторів, крупорушок, циркулярних пилок тощо. У цій сфері застосування ДС здатне цілком замінити стаціонарні електродвигуни та ДВЗ, з огляду на ряд переваг ДС. Умовою успішного застосування ДС є широкий вибір джерел теплоти, простота конструкції, низька шумність, можливість реалізації найбільш вигідного закону згорання палива, що знижує витрату палива і покращує екологічні показники.

Таким чином, очевидні перспективи застосування ДС на ринках, що розвиваються. Актуальними питаннями є практична розробка ДС, що має високі характеристики за низьку ціну, а також дослідження особливостей перебігу його робочих процесів.

Постановка задачі. Використання ДС в якості стаціонарного силового двигуна замість ДВЗ і електромоторів в фермерських та приватних господарствах виглядає привабливим, що й формує попит на них. Забезпечення тепловою енергією відбувається за рахунок спалювання промислових, сільськогосподарських і побутових відходів, деревного вугілля, торфу. Тверде паливо дробиться, пресується в пелети або брикети.

Використання ДС дозволяє економити ліквідні нафтові і газові палива, утилізувати різного роду відходи.

У світі існують моделі ДС потужності від 500 Вт до 3000 Вт від наступних виробників: Philips (Голландія), Whisper Tech Limited (Нова Зеландія), ve // ingenieure GmbH (Німеччина), Genoastirling S.r.l. (Італія), BG Group plc (Велика Британія), SOLO Kleinmotoren (Німеччина), Stirling Technology Company, Sunpower, Inc. (США), BG Group plc (Велика Британія), Uwe Moch (Німеччина) та ін. [1]. Але популярності у покупців більшість з цих двигунів не отримали. Основною причиною є висока вартість внаслідок малої програми випуску (від 200 до 2900 \$/кВт для серійного двигуна).

В Україні на даний час ДС не виготовляються, відомі лише окремі демонстраційні зразки, наприклад, двигун УДС-1 [2] максимальною потужністю $N_{e\max} = 7,7$ Вт при 4000 хв^{-1} . Проте, приймаючи до уваги сучасні тенденції до економії енергоресурсів та покращення умов довкілля, прийнято рішення щодо створення спеціального конструкторського бюро SCB STIRLING, що займається проектуванням, випробуванням та дослідженням сучасних двигунів Стірлінга потужністю до 3 кВт.

Відомо, що основними перевагами двигунів Стірлінга перед існуючими ДВЗ є:

- можливість легкої зміни палива;
- висока термодинамічна ефективність;
- контрольовані викиди відпрацьованих газів.

Якщо ці якості ДС покращити, напередусім завдяки вдосконаленню існуючих систем проектування на основі інформації, отриманої з реальної експлуатації, то ДС можуть мати значний вплив на ринку та скласти конкуренцію дизель-генераторам.

За головні недоліки ДС прийнято вважати (порівняно з ДВЗ) більшу металоємність (питому масу); необхідність тривалого використання стисненого газу (водень, гелій чи повітря) при високому тиску (до 15 МПа), що вимагає застосування якісних ущільнень; високі вимоги до ефективності теплообмінників; велика теплова інерційність системи.

Якісна конструкція ДС, що сприяє реалізації термодинамічного циклу Стірлінга, дозволяє досягти значення ефективного ККД $\eta_e = 60\%$, – це більше, ніж у існуючих бензинових і дизельних ДВЗ (35 % і 42 % відповідно).

Саме ці міркування і стали причиною до проектування ДС нової конструкції та дослідження перебігу робочих процесів.

Результати досліджень. Розроблено конструкцію ДС розмірністю $S/D = 40/72$ мм з використанням деталей серійного двигуна внутрішнього згорання з міркувань отримання достатньо низької вартості серійного агрегату (рисунок 1).

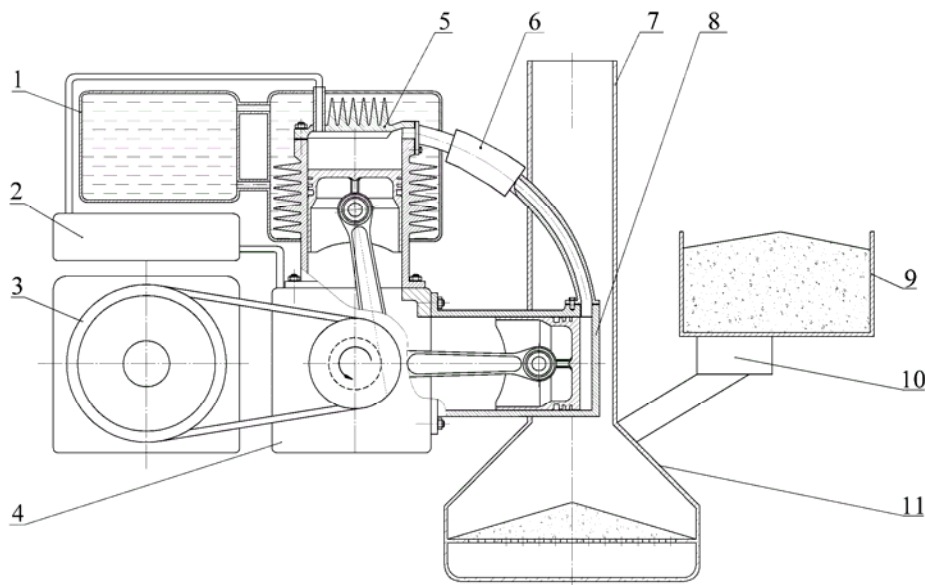


Рисунок 1. Принципова схема установки: 1 – радіатор; 2 – компресор повітряний; 3 – приводний механізм; 4 – двигун Стірлінга; 5 – холодний циліндр; 6 – регенератор; 7 – димова труба; 8 – гарячий циліндр; 9 – бак з паливом; 10 – пристрій дозування і подачі палива; 11 – топка

З відомих [3-5] варіантів компонування ДС обрана схема альфа-типу: двигун з двома поршнями в «гарячому» (ГЦ) і «холодному» (ХЦ) циліндрах, розміщених під кутом і з'єднаних трубою з регенератором. Існують також схеми «бета» та «гамма». Такий вибір обумовлюється найменшими труднощами в умовах виробництва ДС на існуючому моторобудівному підприємстві, в тому числі з метою уніфікації.

ГЦ і ХЦ в ДС альфа-типу рознесені в просторі, що спрощує організацію підведення і відведення теплоти, для них характерна менша кількість деталей, ніж в бета- і гамма-типах. Це істотно важливо для забезпечення умов простоти і стаціонарності готової установки.

Як робоче тіло в спроектованому ДС застосовується повітря. Цей газ значно менш ефективний, ніж водень або гелій, але набагато дешевший, простіший та безпечніший в експлуатації. За допомогою повітряного компресора 2 (див. рис. 1) робоче тіло підкачуються до мінімального необхідного тиску $P_{\min}$. Заданий початковий тиск і далі в підтримується протягом роботи ДС автоматично.

Максимальні значення тиску робочого тіла обмежені внаслідок обмеженості умов надійної роботи ущільнення.

Сконструйований перспективний зразок ДС має просту конструкцію, тривалий термін експлуатації і універсальність. Використання уніфікованих деталей (поршень,

шатун, поршневий палець, підшипники, втулки) дозволяє виробляти модель на діючому моторобудівному підприємстві України.

Для спроектованого ДС зроблено розрахунок ідеальної термодинамічної циклу і реального циклу за ізотермічним методом Шмідта [3, 6]. Метод Шмідта побудований на ряді припущень [6]:

- процеси розширення і стиснення ізотермічні;
- миттєвий тиск прийнято рівним по всьому внутрішньому об'єму ДС;
- робоче тіло має властивості ідеального газу;
- регенерація відбувається ідеально;
- температура в регенераторі дорівнює середньому арифметичному температур в ГЦ і ХЦ;
- об'єми циліндрів змінюються за синусоїдальним законом.

Для розрахунку приймаємо, що тиск надлишковий, початок циклу при куті повороту колінчастого валу $\varphi = 0^\circ$ ПКВ в момент, коли ГЦ знаходиться в верхній мертвій точці. Визначено закони зміни об'ємів порожнин ДС (рис. 2), побудовані індикаторні діаграми тиску (рис. 3, 4).

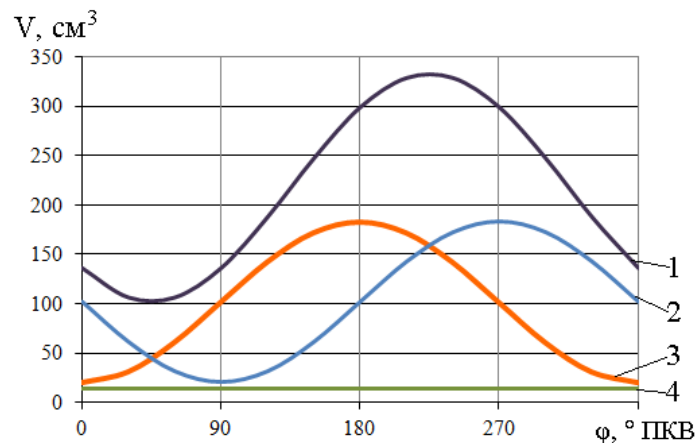


Рисунок 2. Закон зміни об'ємів, що займає робоче тіло у порожнинах ДС: 1 – сумарний об'єм $V_{\text{сум}}$; 2 – об'єм холодного циліндра $V_{\text{ХЦ}}$; 3 – об'єм гарячого циліндра $V_{\text{ГЦ}}$; 4 – мертвий об'єм $V_{\text{м}}$

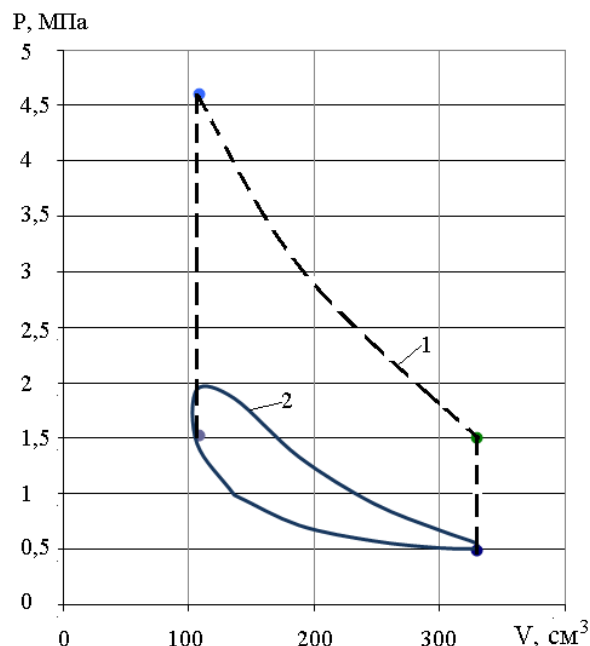


Рисунок 3. Індикаторна діаграма циклу ДС розмірністю $S/D = 40/72$ мм: 1 – ідеальний цикл Стірлінга; 2 – розрахована за методом Шмідта

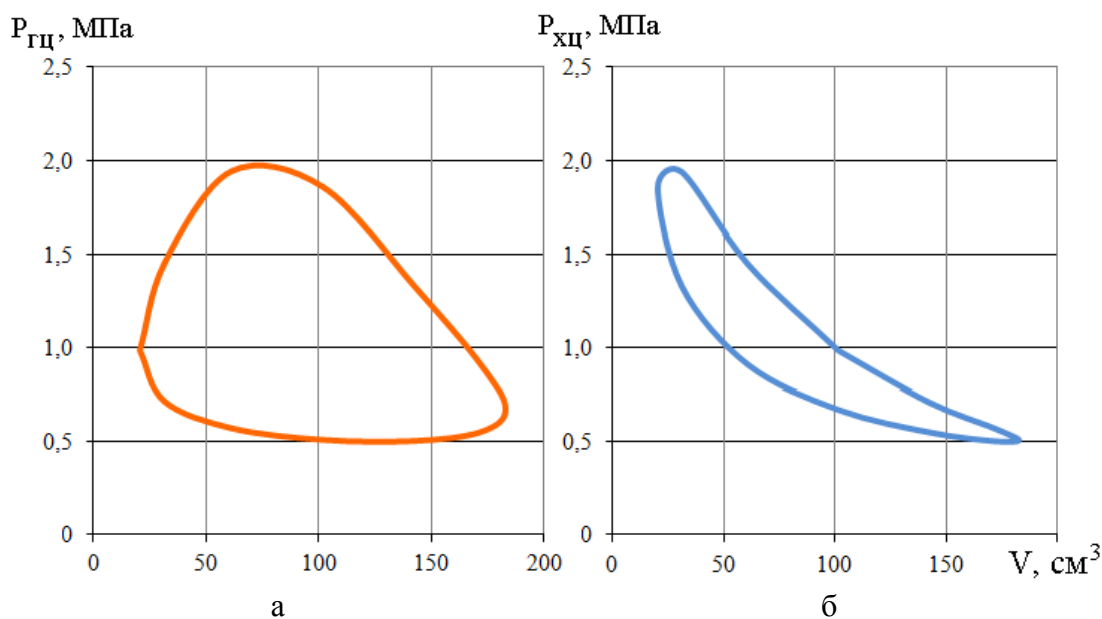


Рисунок 4. Індикаторні діаграми циклу ДС розмірністю $S/D = 40/72$ мм при $P_{\text{сер}} = 1,0$ МПа:
а – для ГЦ; б – для ХЦ

Визначаємо індикаторну роботу за цикл:

$$L_i = L_{\text{ГЦ}} + L_{\text{ХЦ}}, \quad (1)$$

де $L_{\text{ГЦ}} = \oint P dV_{\text{ГЦ}}$ і $L_{\text{ХЦ}} = \oint P dV_{\text{ХЦ}}$ – індикаторні роботи відповідних циліндрів, Дж;

P – тиск у робочому об'ємі при певному куті повороту колінчастого валу φ , Па;

$V_{\text{ГЦ}}, V_{\text{ХЦ}}$ – об'єм гарячого та холодного циліндрів відповідно, м^3 .

Індикаторна потужність двигуна, Вт:

$$N_i = \frac{L_i \cdot n}{60}, \quad (2)$$

де n – частота обертання колінчастого валу, хв^{-1} .

Відомо, що з ростом тиску P_{min} в газовій порожнини індикаторна робота L_i та індикаторна потужність N_i має збільшуватися [3-5]. Зі збільшенням P_{min} потужність дійсно збільшується лінійно (див. рисунок 5, таблицю 1). При $P_{\text{min}} = 0,5$ МПа отримано $N_i = 2705,2$ Вт.

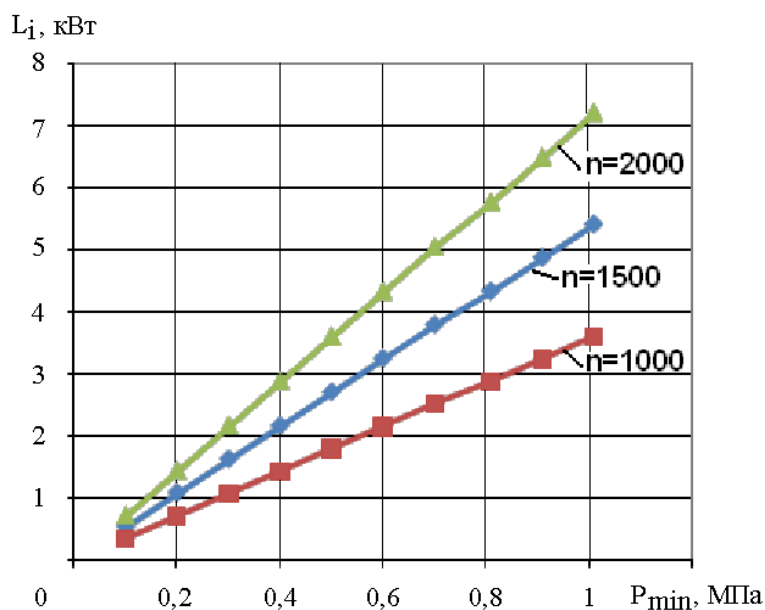


Рисунок 5. Зміна індикаторної потужності ДС від мінімального тиску робочого тіла P_{min} при різних обертах n

Таблиця 1. Індикаторні показники циклу ДС: індикаторна робота L_i і індикаторна потужність N_i

$P_{\min}$, МПа	$P_{\text{сер}}$, МПа	$P_{\max}$, МПа	L_i , Дж	N_i , Вт,		
				1000 хв ⁻¹	1500 хв ⁻¹	2000 хв ⁻¹
0,10	0,2	0,39	21,6	360,7	541,0	721,4
0,20	0,4	0,78	43,3	721,4	1082,1	1442,8
0,30	0,6	1,17	64,9	1082,1	1623,1	2164,2
0,40	0,8	1,55	86,6	1442,8	2164,2	2885,6
0,50	1,0	1,94	108,2	1803,5	2705,2	3607,0
0,60	1,2	2,33	129,9	2164,2	3246,3	4328,4
0,70	1,4	2,72	151,5	2524,9	3787,3	5049,8
0,81	1,6	3,10	173,1	2885,6	4328,4	5771,2
0,91	1,8	3,50	194,8	3246,3	4869,4	6492,6
1,01	2,0	3,89	216,4	3607,0	5410,5	7214,0

Для ДС розмірністю $S/D = 40/72$ мм при $P_{\text{сер}} = 1,0$ МПа реальна (ефективна) потужність із врахуванням ККД складає $N_e = 730$ Вт.

Висновки:

1. Потужність від 0,5 кВт до 3 кВт і частота обертання 1500 хв⁻¹ згідно технічного завдання на проектування двигуна Стірлінга є найбільш затребуваними на ринку України.

Виконано попередній розрахунок ДС за ізотермічним методом Шмідта. Отримані результати підтверджують обґрунтованість вибору компоновки і розмірності двигуна під проектну потужність 500 ... 1200 Вт.

2. Показники ДС в значній мірі залежать від величини мертвого об'єму і початкового тиску: зі збільшенням мертвого об'єму потужність зменшується, а зі збільшенням початкового тиску – збільшується. Раціональне співвідношення цих факторів необхідно встановлювати спеціально.

3. Роль природи робочого тіла (повітря, гелій, водень) і температури, при якій підводиться теплота $T_{\text{гп}}$, та їх вплив на показники ДС вимагають спеціального вивчення.

4. З метою більш точного визначення параметрів і характеристик сконструйованого ДС необхідні подальші розрахунки термодинамічного циклу за адіабатичним та Simple методами.

5. В роботі підтверджено відомі положення з літератури про залежність потужності ДС від початкового тиску робочого тіла та частоти обертання. Встановлено, що недостатньо вивчений вплив на робочий процес регенератора і немає універсальної методики його проектування, – цей напрямок претендує на наукову новизну.

Уточнення розрахункової методики і постановка коректного експерименту дозволять уточнити існуючі уявлення про процеси ДС і істотно підвищити ефективність їх циклів. Є підстави вважати, що ДС замінять значну частину стаціонарних теплових двигунів і в недалекому майбутньому почнуться розробки агрегатів різної потужності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Stirling Engine Assessment [Текст] : звіт про НДР (закл.) / EPRI; керівн. D. Thimsen ; викон.: J. Majeski [та ін.]. – Palo Alto, CA, 2002. – 170 с. – Інв. № 1007317.
2. Долганов К. Е. Характеристики миниатюрного двигателя Стирлинга модели УДС-1 [Текст] / К. Е. Долганов, Ю. А. Постол. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. Двигуни та енергоустановки: Зб. наук. пр. – 2002. – №30. – С. 28–30.
3. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга [Текст] : Пер. с англ. / Г. Уокер. – М.: Энергия, 1978. – 152 с.
4. Ридер Г. Двигатели Стирлинга [Текст] : Пер. с англ. / Г. Ридер, Ч. Хупер. – М.: Мир, 1986. – 464 с.
5. Двигатели Стирлинга [Текст] / Под ред. М. Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1977. – 150 с.
6. Hirata K. Schmidt Theory for Stirling Engines [Електронний ресурс] / Koichi Hirata. – 1997. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.nmri.go.jp/oldpages/eng/khirata/list/general/schmidt.pdf>.