

Jarosław KOBRYŃ, Krystian WILK

PODOBIEŃSTWA BILANSÓW ENERGII CZTEROSUWOWYCH SILNIKÓW Z ZAPŁONEM ISKROWYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę bilansu energii czterosuwowego silnika o zapłonie iskrowym pod względem podobieństw parametrów różnych silników tego typu. Straty składowe pozwalają określić wpływ poszczególnych czynników na pracę silników w różnych warunkach i ustalić środki prowadzące do poprawienia wyników. Celem tej analizy było zmniejszenie ilości zmiennych parametrów, co wpływa nie tylko na koszt planowanych badań, ale i na uproszczenie obliczeń.

SIMILARITIES BETWEEN ENERGY BALANCE OF FOUR-STROKE ENGINES WITH SPARK IGNITION

Summary. The work presents the energy balance analysis of a four-stroke engine with spark ignition taking into consideration some similarities of variables of different car engines of this type. The constituent loss allows to recognise the influence of individual factors on the engines' work in different conditions and establish some means leading to the improvement of results. The aim of the analysis was to decrease the number of changeable variables which influences not only the cost of planned research but also of the calculations and their simplifying.

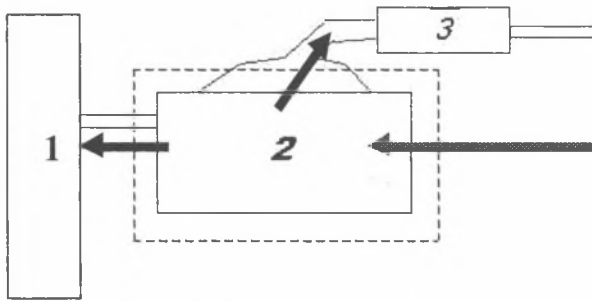
1. WPROWADZENIE

Ocenę wykorzystania energii dostarczonej do silnika dokonujemy na podstawie bilansu energii silnika. Obejmuje on energię zamienioną na pracę użyteczną oraz energię przypadającą na straty. Straty składowe pozwalają określić wpływ poszczególnych czynników na pracę silników w różnych warunkach i ustalić środki prowadzące do poprawienia wyników.

Bilans energii całego silnika sporządza się w warunkach ustalonej równowagi cieplnej na podstawie pomiarów energii mechanicznej oraz energii cieplnej oddawanej przez silnik na zewnątrz [1].

Ośłona bilansowa zastosowana w rozważaniach jest pokazana na rys.1. Zawiera ona oprócz silnika układ wydechowy i układ chłodzenia zewnętrznego.

Ostona bilansowa

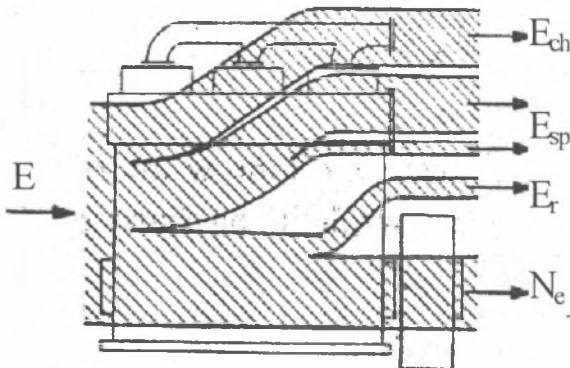


1 - zewnętrzny układ chłodzenia 2 - badany silnik
3 - układ wydechowy

Rys.1. Ostona bilansowa badanego silnika
Fig.1. The shield of the tested engine

2. GRAFICZNE PRZEDSTAWIENIE BILANSU ENERGII

W postaci graficznej bilans energii jest najczęściej przedstawiany na wykresie Sankeya (rys.2). Wykres pokazuje drogi, którymi energia dostarczona w paliwie jest przekazywana na zewnątrz silnika [1].



Rys.2. Wykres Sankeya bilansu energii silnika spalinowego [1]
Fig.2. The Sankey's graph of car engine energy balance [1]

3. OGÓLNE RÓWNANIE BILANSU ENERGII

Ogólne równanie bilansu energii określono wzorując się na równaniu zewnętrznego bilansu cieplnego silnika będącego sumą ciepła użytecznego oraz strat ciepła silnika [1]:

$$Q = Q_e + Q_{ch} + Q_w + Q_n + Q_r \quad (1)$$

gdzie:

Q – ciepło dostarczone do silnika w J/s,

Q_e – ciepło użyteczne w J/s,

Q_{ch} – straty chłodzenia w J/s,

Q_w – straty wylotu w J/s,
 Q_n – straty niezupełnego spalania w J/s,
 Q_r – reszta bilansu w J/s,

W termodynamice pojęcie „ciepła” ma trochę inne znaczenie. Przepływ ciepła jest oprócz wykonania pracy sposobem przekazywania energii pomiędzy układami [4]. Postać bilansu energii silnika określono jako sumę energii użytecznej oraz strat energii silnika:

$$E = N_e + E_{ch} + E_{sp} + E_r \quad (2)$$

gdzie:

E – energia dostarczona do silnika w kW,
 N_e – moc użyteczna w kW,
 E_{ch} – straty chłodzenia w kW,
 E_{sp} – straty wylotu w kW [3],
 E_r – reszta bilansu w kW.

3.1. Energia dostarczona do silnika

Jest ona określona jako iloczyn godzinowego zużycia paliwa i wartości opałowej [1]:

$$E = G_e W_d \quad (3)$$

gdzie:

G_e – godzinowe zużycie paliwa w kg/s,
 W_d – wartość opałowa paliwa w kJ/kg, można przyjąć $W_d = 43100$ kJ/kg [4].

Godzinowe zużycie paliwa jest wielkością mierzoną jako ilość paliwa zużywanego przez silnik w ciągu czasu t . Przy pomiarze metodą ciężarową [1]:

$$G_e = \frac{G_p}{t} \quad (4)$$

gdzie:

t – czas pomiaru w s,
 G_p – ilość w kg paliwa zużytego w czasie t .

Wartość opałową dla określonego paliwa, niezmiennego w czasie badań, możemy traktować jako stałą wartość. Wyraża ona entalpię znormalizowanej reakcji spalania w przypadku, gdy w stanie odniesienia woda występuje w postaci pary [4]. Do wyznaczenia wartości opałowej lekkich paliw ciekłych (stosowanych w silnikach z zapłonem iskrowym) używa się najczęściej kalorymetru Junkersa [1].

3.2. Moc użyteczna

Moc użyteczną silnik przekazuje przekładni w dowolnych warunkach pracy. Jest ona uzyskiwana na wale korbowym i jest równa mocy indykowanej pomniejszonej o moc oporów ruchu silnika [1]:

$$N_e = N_i - N_m \quad (5)$$

gdzie:

N_i – moc indykowana w kW,
 N_m – moc oporów ruchu w kW.

Moc użyteczną można też określić podczas badania silnika na stacji prób. Oblicza się ją na podstawie wyników pomiarów momentu obrotowego i prędkości obrotowej [3]:

$$N_e = 2\pi n M_o \quad (6)$$

gdzie:

M_o – moment obrotowy silnika w N*m,
 n – prędkość obrotowa silnika w s⁻¹.

Znając ciśnienie użyteczne p_e (dla silnika czterosuwowego) [6]:

$$p_e = 4\pi \frac{M_o}{V_{ss}} \quad (7)$$

moc użyteczną obliczamy ze wzoru [3]:

$$N_e = \frac{V_{ss} p_e n}{\tau} \quad (8)$$

gdzie:

V_{ss} – objętość skokowa silnika w m^3 ,

p_e – średnie ciśnienie użyteczne w N/m^2 ,

n – prędkość obrotowa silnika w s^{-1} ,

τ – współczynnik uwzględniający liczbę suwów na jeden obieg silnika – dla czterosuwowego silnika $\tau = 2$.

3.3. Straty chłodzenia

Elementy komory spalania, a więc dolna płyta głowicy i denko tłoka oraz górne partie tulei cylindrowej narażone są na wysokie temperatury rzędu $1900 \div 2800$ K. Chłodzenie chroni te elementy przed zmianami ich wytrzymałości i kształtów geometrycznych prowadzących do zniszczenia silnika.

Ilość ciepła unoszona przez czynnik chłodzący sięga 1/3 całej ilości energii wywiązanej w silniku [3].

Straty chłodzenia obliczamy uwzględniając masowe natężenie przepływu (strumień masy) czynnika chłodzącego oraz spadek jego temperatury w czasie chłodzenia [1]. W silnikach chłodzonych tylko cieczą, przyjmując za czynnik wodę, możemy założyć, że zachowuje się ona jak gaz doskonały, czyli ma stałe ciepło właściwe [4], wtedy:

$$E_{ch} = Gc_w(T_2 - T_1) \quad (9)$$

gdzie:

G – wydatek cieczy chłodzącej (masowe natężenie przepływu cieczy chłodzącej) w kg/s ,

c_w – ciepło właściwe cieczy chłodzącej, dla wody $c_w \approx 4,1868$ $kJ/kg \cdot K$,

T_1 oraz T_2 – średnie (podczas pomiaru) temperatury cieczy chłodzącej w miejscach dopływu i odpływu z silnika.

3.4. Straty wylotu

Straty te wynoszą ok. 1/3 części energii, jaka wywiązuje się w silniku podczas spalania paliwa doprowadzonego do cylindrów, prawie tyle, ile silnik zamienia na pracę użyteczną [3].

Straty wylotu są sumą energii odprowadzanej przez spaliny, które traktujemy jako gazy półdoskonałe oraz strat związanych z niezupełnym spalaniem:

$$E_{sp} = E_w + E_n \quad (10)$$

Energia odprowadzona przez spaliny:

$$E_w = M_2 G_e c_p^* \int_{T_0}^{T_s} (T_s - T_0) \quad (11)$$

gdzie:

M_2 – jednostkowa ilość spalin wilgotnych w $kmol/kg$ paliwa,

G_e – zużycie paliwa w kg/s ,

$c_p^* \int_{T_0}^{T_s}$ – średnie molowe ciepło właściwe spalin wilgotnych przy $p=const$ w zakresie temperatur od T_0 do T_s w $kJ/kmol \cdot K$,

T_s – średnia temperatura spalin odpływających z silnika w K ,

T_0 – temperatura otoczenia w K .

Ilość spalin wilgotnych uzyskiwanych w wyniku spalania 1 kg paliwa jest określona jako suma ilości n''_{ss} spalin suchych oraz pary wodnej n''_{H_2O} [1]:

$$M_2 = n''_{ss} + n''_{H_2O} \quad (12)$$

W badaniu silników z zapłonem iskrowym zakłada się, że spalanie jest całkowite $x = 0$, wówczas ilość spalin suchych można wyznaczyć z wzoru [4]:

$$n''_{ss} = \frac{n'_c}{[CO_2] + [CO]} \quad (13)$$

gdzie:

x – stopień niespalenia węgla zawartego w paliwie,

n'_c – zawartość węgla w paliwie, $n'_c = 1/12 c$ kmol/kg,

c – masowy udział węgla elementarnego w paliwie, można przyjąć $c = 0,855$ [4],

$[CO_2]$ – udział molowy dwutlenku węgla w suchych spalinach,

$[CO]$ – udział molowy tlenku węgla w suchych spalinach.

Ilość pary wodnej zawartej w spalinach wilgotnych określa się jako sumę wilgoci pochodzącej ze spalania wodoru i wilgoci z powietrza. Zazwyczaj wilgoć pochodząca z powietrza pomija się [4]:

$$n''_{H_2O} = n'_{H_2} + X_{za} n'_a \approx n'_{H_2} \quad (14)$$

gdzie:

n'_{H_2} – zawartość wodoru w paliwie, $n'_{H_2} = h/2$ kmol/kg,

h – udział masowy wodoru w paliwie, można przyjąć $h = 0,145$ [4],

$X_{za} + n'_a$ – wilgoć pochodząca z powietrza.

Ciepło właściwe spalin w zakresie temperatur od T_0 do T jest w przybliżeniu (błąd nie przekracza 1%) równe ciepłu właściwemu obliczonemu z zakresu temperatur od 273,15 K do T_S [1]:

$$c_p^* |_{T_0}^{T_i} \approx c_p^* |_{T_0}^{T_i} = \sum u_i c_{pi} \quad (15)$$

gdzie:

u_i – udziały objętościowe poszczególnych składników spalin wilgotnych,

a c_{pi} – ich ciepła właściwe przy stałym ciśnieniu w temperaturze T_S .

Udziały u_i określa się przeliczając wyniki analizy spalin suchych, a więc odniesione do n''_{ss} na ilość zwiększoną o n''_{H_2O} , czyli na ilość spalin wilgotnych M_2 [1].

$$u_{CO_2} = \frac{[CO_2]}{100} * \frac{n''_{ss}}{M_2} \quad (16)$$

$$u_{CO} = \frac{[CO]}{100} * \frac{n''_{ss}}{M_2} \quad (17)$$

$$u_{N_2} = \frac{[N_2]}{100} * \frac{n''_{ss}}{M_2} \quad (18)$$

$$u_{O_2} = \frac{[O_2]}{100} * \frac{n''_{ss}}{M_2} \quad (19)$$

$$u_{H_2O} = \frac{n''_{H_2O}}{M_2} \quad (20)$$

Na straty niezupełnego spalania składają się straty powstałe w wyniku odpływu do otoczenia niespalonych składników gazowych w postaci tlenku węgla. W badaniu silników

z zapłonem iskrowym zakłada się, że istniejący ogólny niedomiar tlenu może powodować jedynie niezupełne spalanie $x = 0$ [1].

$$Q_m = G_e W_{co} \frac{[CO]}{[CO] + [CO_2]} n_c' \quad (21)$$

gdzie (poza wprowadzonymi już oznaczeniami):

W_{co} – wartość opałowa tlenku węgla (przyjmuje się $W_{co} = 12644,14$ kJ/Nm³ [1]),

$\frac{[CO]}{[CO] + [CO_2]} n_c'$ – część węgla elementarnego spalona na CO.

Podany sposób wyznaczenia straty wydechu obarczony jest błędem związanym z pomiarem średniej temperatury spalin. Przepływ spalin ma charakter pulsujący, a termoelement wskazuje średnią w czasie temperaturę własną, a nie średnią temperaturę spalin uwzględniającą zmiany natężenia przepływu przez przewód wydechowy. Dokładniejsze wyniki uzyskujemy stosując kalorymetr, jednak włączenie go w układ wydechowy może spowodować zmianę warunków pracy silnika [1].

3.5. Reszta bilansu

Obejmuje ona straty trudne do opisanie:

- część energii powstającej w wyniku tarcia która przenika do otoczenia,
- energia tracona przez promieniowanie wynikające z nagrzania elementów silnika do spalin lub wody chłodzącej,
- energia równoważna energii kinetycznej spalin i sumie błędów i strat cieplnych nie uwzględnionych w innych pozycjach bilansu [1].

Resztę bilansu wyznacza się sumarycznie:

$$E_r = E - N_e - E_{ch} - E_{sp} \quad (22)$$

4. BILANS CIEPLNY SILNIKA WYRAŻONY W %

Dzieląc obie strony równania bilansu energii (1) przez energię dostarczoną do silnika E i mnożąc przez 100 otrzymany bilans energii, którego składniki wyrażone są w procentach [2]:

$$q_e + q_{ch} + q_{sp} + q_r = 100\% \quad (23)$$

gdzie:

q_e – moc użyteczna w %,

q_{ch} – straty chłodzenia w %,

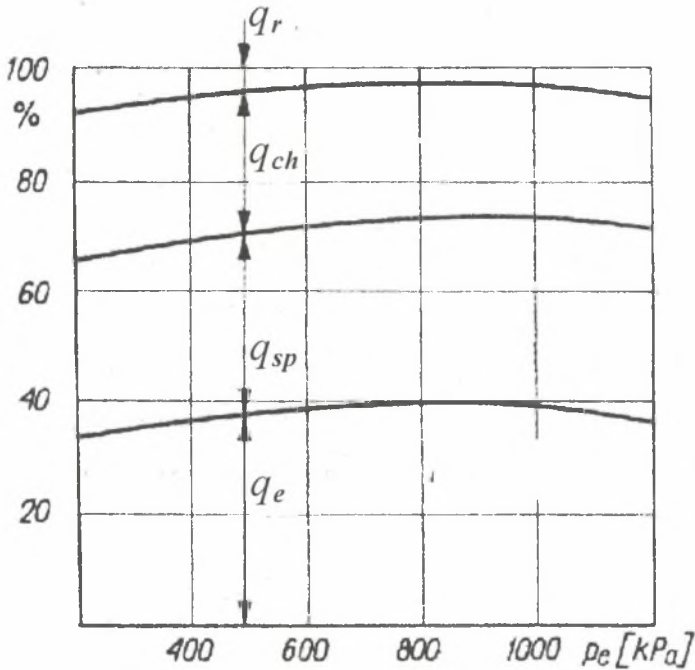
q_{sp} – straty wylotu w %,

q_r – reszta bilansu w %,

Tabela 1

Przykładowe wielkości poszczególnych składników zewnętrznego bilansu cieplnego silnika

Literatura	q [%]	q _e [%]	q _{ch} [%]	q _{sp} [%]	q _r [%]
[1]	100	24 – 28	32 - 30	36 – 40	ok. 8
[3]	100	18 - 42	22 - 35	26 – 38	8 – 12
[5]	100	30	35	30	5



Rys.3. Przykładowe graficzne przedstawienie bilansu energii silnika wyrażonego w % [3]
 Fig.3. An exemplary graphic presentation of engine energy balance in percentage [3]

5. OKREŚLENIE DANYCH BADAWCZYCH (PORÓWNAWCZYCH)

W badaniach silnika dąży się do minimalizacji parametrów zmiennych. Jest to uwarunkowane nie tylko kosztem badań, ale i dokładnością pozostałych parametrów.

Artykuł ten stanowi analizę badań silnika czterosuwowego z zapłonem iskrowym, w którym założono identyczny rodzaj benzyny dla wszystkich badanych silników. Tak więc parametrami niezmiennymi są: wartość opałowa paliwa i gęstość paliwa. Dodatkowo można założyć wspólny dla wszystkich badań silników czas pomiaru, w którym badamy zmienną podczas badań ilość paliwa (w kg).

Parametry związane z rodzajem benzyny powtarzają się w dwóch elementach bilansu energii, czyli w energii dostarczonej do silnika i w stratach wylotu.

Analizując parametry związane z konstrukcją silnika i jego pracą wywnioskowano, że jedynym niezmiennym parametrem jest współczynnik określający liczbę suwów na jeden obieg silnika. Dodatkowo można założyć jako parametr niezmienny prędkość obrotową. Badania każdego z silników można przeprowadzić dla tej samej prędkości obrotowej. Oczywiście, prędkość obrotowa ulegałaby zmianom, jednakże wspólnym dla wszystkich silników. Zmiany tego parametru są niezbędne do określenia momentu obrotowego traktowanego jako zmienny. Oba wymienione parametry są parametrami eksploatacyjnymi, jednak jest jeszcze jeden parametr – konstrukcyjny, czyli objętość skokowa silnika. Jest ona

parametrem zmiennym, ale porównując silniki o prawie takiej samej pojemności skokowej możemy traktować ją jako parametr niezmienny.

Tabela 2

Parametry bilansu silnika

Parametr	Element bilansu	Charakter
W_d	E	niezmienny
t	E, E_{sp}	niezmienny
G_p	E, E_{sp}	zmienny
M_o	N_e	zmienny
n	N_e	niezmienny
V_{ss}	N_e	zmienny, lub niezmienny
τ	N_e	niezmienny
G	E_{ch}	zmienny
c_w	E_{ch}	niezmienny
T_1	E_{ch}	zmienny
T_2	E_{ch}	zmienny
T_s	E_{sp}	zmienny
T_0	E_{sp}	niezmienny
c	E_{sp}	niezmienny
[CO]	E_{sp}	zmienny
[CO ₂]	E_{sp}	zmienny
h	E_{sp}	niezmienny
[N ₂]	E_{sp}	zmienny
[O ₂]	E_{sp}	zmienny
c_{pCO}	E_{sp}	zmienny
c_{pCO_2}	E_{sp}	zmienny
c_{pN_2}	E_{sp}	zmienny
c_{pO_2}	E_{sp}	zmienny
c_{pH_2O}	E_{sp}	zmienny
W_{co}	E_{sp}	zmienny

Z parametrów związanych z cieczą chłodzącą silnik jedynie tylko ciepło właściwe cieczy chłodzącej możemy założyć jako wielkość niezmienną. Masowe natężenie przepływu cieczy chłodzącej i średnie jej temperatury w miejscach dopływu i odpływu z silnika mają już charakter zmienny.

W procesie spalania w silniku ustalono jako niezmiennie parametry: temperaturę otoczenia (można to zrealizować w komorze klimatycznej), masowy udział wodoru oraz węgla elementarnego w paliwie i wartość opałową tlenku węgla. Parametrami zmiennymi zostały: średnia temperatura spalin odpływających z silnika, ciepła właściwe poszczególnych składników spalin wilgotnych oraz molowe udziały CO, CO₂, N₂, O₂ w suchych spalinach.

6. PODSUMOWANIE

Do celów badawczych wybrano parametry:

- G_p - ilość w kg paliwa zużytego w czasie t ,
- M_o - moment obrotowy silnika w $N \cdot m$,
- V_{ss} - objętość skokowa silnika w m^3 ,
- G - wydatek cieczy chłodzącej (masowe natężenie przepływu cieczy chłodzącej) w kg/s ,
- T_1 - średnia (podczas pomiaru) temperatura cieczy chłodzącej w miejscu dopływu do silnika,
- T_2 - średnia (podczas pomiaru) temperatura cieczy chłodzącej w miejscu odpływu z silnika,
- T_s - średnia temperatura spalin odpływających z silnika w K ,
- $[CO]$ - molowy udział tlenku węgla w suchych spalinach,
- $[CO_2]$ - molowy udział dwutlenku węgla w suchych spalinach,
- $[N_2]$ - molowy udział azotu w suchych spalinach,
- $[O_2]$ - molowy udział tlenu w suchych spalinach.

Równanie bilansu energii nie uwzględnia jako osobnego składnika strat mechanicznych silnika. Straty te są trudne do określenia, gdyż część strat mechanicznych (energia powstająca wskutek tarcia tłoka o gładź cylindrową) uwzględniona jest w stratach chłodzenia E_{ch} , pozostałą część strat zawiera reszta bilansu E_r [2].

Postać bilansu energii zależy głównie od warunków pracy silnika. Zmiany prędkości obrotowej, obciążenia i temperatury cieczy chłodzącej powodują zmiany rozdziału energii [1]. Ze wzrostem prędkości obrotowej silnika maleją straty chłodzenia wskutek skrócenia czasu zetknięcia gorących gazów ze ściankami cylindra, natomiast analogicznie wzrastają straty wylotu [2]. Wykorzystanie energii unoszonej przez spaliny i czynnik chłodzący jest ciągle udoskonalane. Energię pochodzącą od cieczy chłodzącej wykorzystujemy do celów ogrzewczych, natomiast energię zawartą od spalin wykorzystujemy do napędu turbiny zespołu doładowującego silnik [3].

W celu uzyskania pełnego obrazu rozkładu energii należy wyznaczyć bilanse energii dla różnych warunków pracy [2].

Literatura

1. Niewiarowski K.: Tłokowe silniki spalinowe, t. 1. WkiŁ, Warszawa 1983.
2. Kijewski J.: Silniki spalinowe. WSiP, Warszawa 1978.
3. Werner J., Wajand J.: Silniki spalinowe małej i średniej mocy. WNT, Warszawa 1983.
4. Szargut J.: Termodynamika techniczna. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1991.
5. Darkwa K., O'Callaghan.: Green transport technology (GTT): Analytical studies of a thermochemical store for minimising energy consumption and air pollution from automobile engines. Applied Thermal Engineering Vol. 17, No. 7. Elsevier Science Ltd. 1997.

6. Ubysz A.: Współczesne silniki samochodowe. Część 1 – Wybrane zagadnienia z konstrukcji i technologii produkcji. Skrypt nr 2118. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stefan Postrzednik