

CHOSEN CRITERIA OF INDEPENDENT IC ENGINE VALVES STEERAGE PROCEDURES

Stefan Postrzednik, Zbigniew Żmudka

Silesian University of Technology
Institute of Thermal Engineering
Konarskiego 18, 44-100 Gliwice, Poland
tel.: +48 32 2371332, fax: +48 32 2372872
e-mails: zmudka@itc.polsl.pl, postrzed@itc.polsl.pl

Abstract

Work of internal combustion engines, which are used as the driving source of cars, occurs not only at the full load, but also mostly at the part load, when the energy efficiency η_e is significant lower than in the optimal (nominal field) range of the performance parameters. One of the numerous reasons of this state is regular growing of the relative load exchange work of the IC engine. Using the worked out formulas it has been calculated that the relative load exchange work can achieve value up to 40 % at the part load (e.g. idle run) of the IC engine, whereby the engine speed influences the results too. As consequence of the growing of the relative load exchange work is the significant drop of the engine efficiency; from ca. 55 % down to ca. 25 %. The solutions of this problem are based on the fully electronic control of the motion of inlet and outlet valves, whereby the optimal internal recirculation ratio of flue gases should be taken into account. New reference cycles can be applied too.

Keywords: engine efficiency, combustion engine, engine valves, steerage procedures

DOBÓR PROCEDUR NIEZALEŻNEGO STEROWANIA ZAWORAMI SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie

W pracy przedstawiono główne problemy związane z eksploatacją silnika spalinowego przy obciążeniach niższych od nominalnych. W polu pracy silnika spalinowego występuje podobszar jego optymalnej eksploatacji (najniższe jednostkowe zużycie paliwa g_e , kg/kWh, najwyższa efektywna sprawność η_e). Silnik pracuje najczęściej pod obciążeniem częściowym, a wtedy jego efektywna sprawność η_e jest znacznie niższa aniżeli w obszarze nominalnym. Jedną z głównych przyczyn jest względny wzrost pracy wymiany ładunku. W celu ograniczenia tych strat proponuje się różne możliwości np. elektroniczne sterowanie ruchem zaworów dolotowych i wylotowych, lepszą organizację obiegu termodynamicznego. Przegląd kryteriów, proponowanych rozwiązań w tym zakresie oraz możliwości poprawy pracy silników są przedmiotem zainteresowań.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, kryteria eksploatacji, efektywność pracy, sterowanie zaworami

1. Wprowadzenie: ogólna charakterystyka zagadnienia

1.1. Analiza możliwości ograniczenia strat w procesie wymiany ładunku

Sprawa znaczącego obniżenia zużycia paliwa przez silniki spalinowe wykorzystywane do napędu samochodów osobowych jest dzisiaj szczególnie poważnie traktowana [3], [4]. Aktualne stało się hasło: „samochód zużywający 3 litry paliwa na 100 km przebytej drogi”. Problem ten ma bezpośredni związek z wielkością ponoszonych kosztów eksploatacji pojazdu, a następnie także z wielkością emisji substancji szkodliwych (zarówno składniki

gazowe: tlenek węgla CO, tlenki azotu NO_x, węglowodory C_mH_n, tlenki siarki SO_y, jak i cząstki stałe: sadza, skondensowane węglowodory). Niebagatelną sprawą jest ponadto potrzeba ograniczenia wielkości emisji gazów przyczyniających się bezpośrednio do intensyfikacji efektu cieplarnianego [7], w tym przede wszystkim dwutlenku węgla CO₂.

Cechą charakterystyczną eksploatacji pojazdów jest fakt występowania częstych zmian parametrów obciążenia (prędkości obrotowej \dot{n}_o , obr/min, przenieszonego momentu obrotowego M_o, Nm/rad, przekazywanej efektywnej mocy N_e, kW) silnika spalinowego napędzającego samochód. W konsekwencji tego praca silnika pod obciążeniem dokładnie nominalnym (optymalnym) występuje stosunkowo rzadko, natomiast najczęściej ma miejsce jego częściowe obciążenie [2], [5], [7], o różnym odchyleniu parametrów od punktu nominalnej pracy silnika.

W obszarach pracy znacznie oddalonych od stanów nominalnych (optymalnych) efektywna sprawność η_e silnika spalinowego jest znacznie niższa aniżeli w obszarze optymalnym. Ilustracją tego jest rys. 1, [7], gdzie oprócz charakterystyk zewnętrznych (lewa strona) zaznaczono izolinie jednostkowego zużycia paliwa $b_e = \text{idem}$ w całym polu pracy (prawa strona) silnika spalinowego.

Proces konwersji energii zachodzący w układzie tłokowego silnika spalinowego scharakteryzować można za pomocą jego efektywnej sprawności energetycznej η_e , zdefiniowanej jako:

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_p W_d}, \quad (1)$$

gdzie: N_e , kW – moc efektywna silnika spalinowego,

\dot{m}_p , kg/s – strumień masy spalane go paliwa, o wartości opałowej W_d , kJ/kg.

Standardowym odniesieniem dla rzeczywistego obiegu silnika jest teoretyczny obieg porównawczy, zawierający główne wyidealizowane etapy [4] działania układu.

Dzięki odpowiednim zmianom obiegu porównawczego można osiągnąć wyższe wartości sprawności energetycznej η_o , tym samym wyższe wartości efektywnej sprawności energetycznej η_e . Efektywną sprawność energetyczną η_e silnika (wzór (1)), można wyrazić jako iloczyn:

$$\eta_e = \eta_o \xi_i \xi_m = \eta_i \xi_m \quad \text{oraz} \quad \eta_i = \eta_o \xi_i, \quad (2)$$

gdzie: ξ_i – stopień doskonałości wewnętrznej,

ξ_m – stopień doskonałości mechanicznej silnika, przy czym:

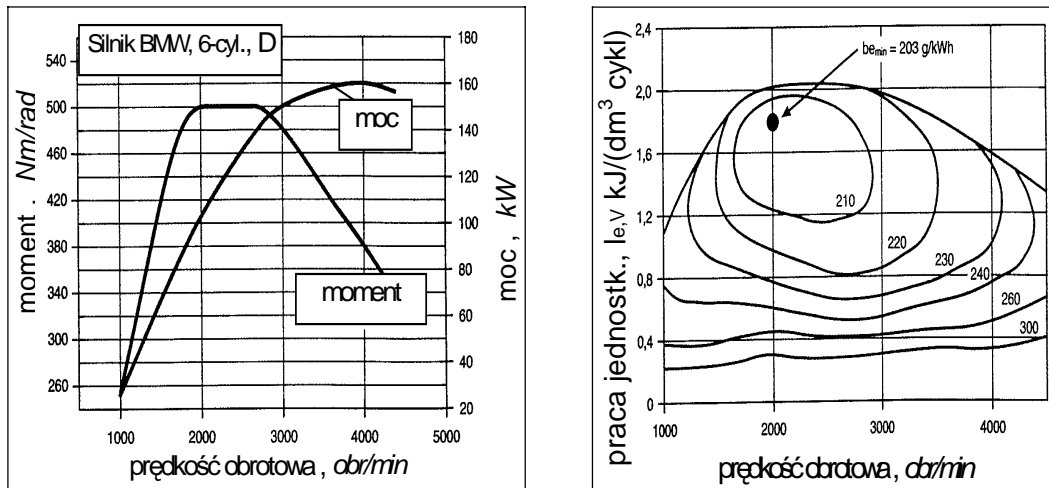
$$\eta_o = \frac{N_o}{\dot{m}_p W_d}, \quad \eta_i = \frac{N_i}{\dot{m}_p W_d}, \quad \xi_i = \frac{N_i}{N_o}, \quad \xi_m = \frac{N_e}{N_i}, \quad (3)$$

gdzie: η_o – sprawność obiegu porównawczego, η_i – sprawność wewnętrzna silnika.

W miejsce efektywnej sprawności energetycznej η_e stosuje się zamiennie wskaźnik względnego jednostkowego zużycia paliwa:

$$b_e = \frac{\dot{m}_p}{N_e}, \quad \text{kg/kWs}, \quad \text{przy czym: } \eta_e b_e W_d = 1. \quad (4)$$

Fakt znaczącego zmniejszania się efektywnej sprawności η_e silnika w obszarze pozaoptymalnym objawia się wzrostem jednostkowego zużycia paliwa b_e (rys. 1).



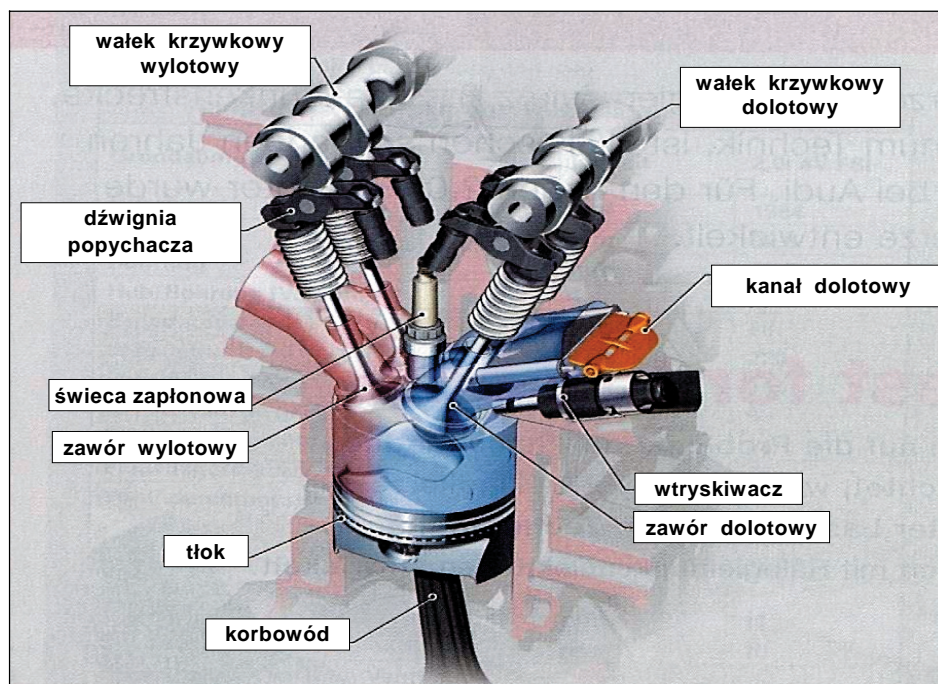
Rys. 1. Charakterystyki eksploatacyjne silnika spalinowego [5]
 Fig. 1. Operating characteristics of internal combustion engine [5]

Spośród wielu przyczyn tego stanu rzeczy jako istotne wymienić należy:

- wzrost pracy wymiany ładunku** (co w efekcie skutkuje znacznym zmniejszeniem stopnia ξ_i doskonałości wewnętrznej),
- wzrost pracy tarcia** w układzie (prowadzi do obniżenia stopnia ξ_m doskonałości mechanicznej).

Większe potencjalne możliwości poprawy sytuacji można wiązać z ograniczeniem strat w procesie wymiany ładunku, co powinno następnie skutkować wzrostem stopnia ξ_i doskonałości wewnętrznej, szczególnie wyraźnie w obszarach znacznie oddalonych od stanów nominalnych pracy silnika.

Dzisiaj najczęściej stosowany jest klasyczny układ sterowania ruchem zaworów, oparty o wykorzystanie współpracującej pary krzywka – popychacz, z jednym lub dwoma wałkami rozrządu, napędzanymi od wału korbowego, a umieszczonymi najczęściej w głowicy silnika spalinowego – rys. 2.



Rys. 2. Układ rozrządu z wałkami umieszczonymi w głowicy silnika
 Fig. 2. ICE timing gear system with camshafts located in an engine head

W ramach konkretnych rozwiązań będących właśnie przedmiotem badań proponuje się przede wszystkim opracowanie kryteriów oraz algorytmów w pełni niezależnego elektronicznego sterowania ruchem zaworów dolotowych (co będzie skutkowało dopasowaniem masy świeżego ładunku doprowadzonego do cylindra), jak również ruchem zaworów wylotowych (kiedy głównie chodzi o zatrzymanie reszty spalin w cylindrze, czyli realizację recyrkulacji wewnętrznej spalin) – rys. 3.



Rys. 3. Schemat układu niezależnego sterowania ruchem zaworów
Fig. 3. Scheme of independent steering of engine valves motion

Także jedna z wcześniejszych propozycji autorów polega na opracowaniu lepszej organizacji samego obiegu silnika, poprzez zastosowanie tzw. eko – obiegu [4], [5]; co okazało się szczególnie przydatnego przy częściowym obciążeniu silnika spalinowego, kiedy to właśnie praca wymiany ładunku jest względnie największa.

1.2. Rola i znaczenie sposobu regulacji silnika spalinowego

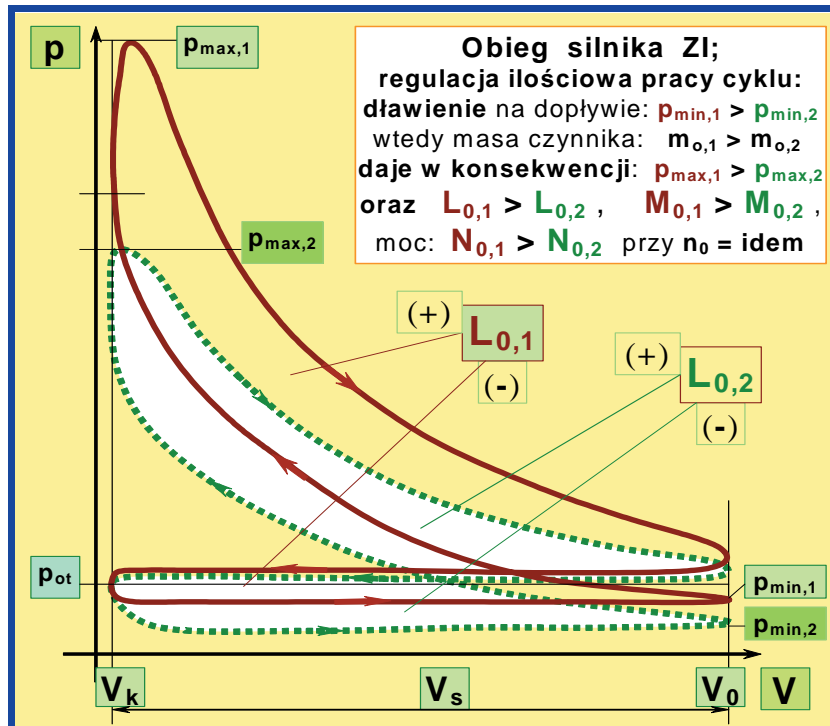
Zarówno praca wymiany ładunku, jak i praca tarcia w układzie przyczyniają się do pomnażania strat energii [6] towarzyszących procesowi konwersji energii w układzie, a które wynikają oraz są ściśle powiązane ze stosowanymi systemami regulacji obciążenia silników spalinowych.

Powszechnie stosowane są dwa systemy regulacji obciążenia silników, w tym:

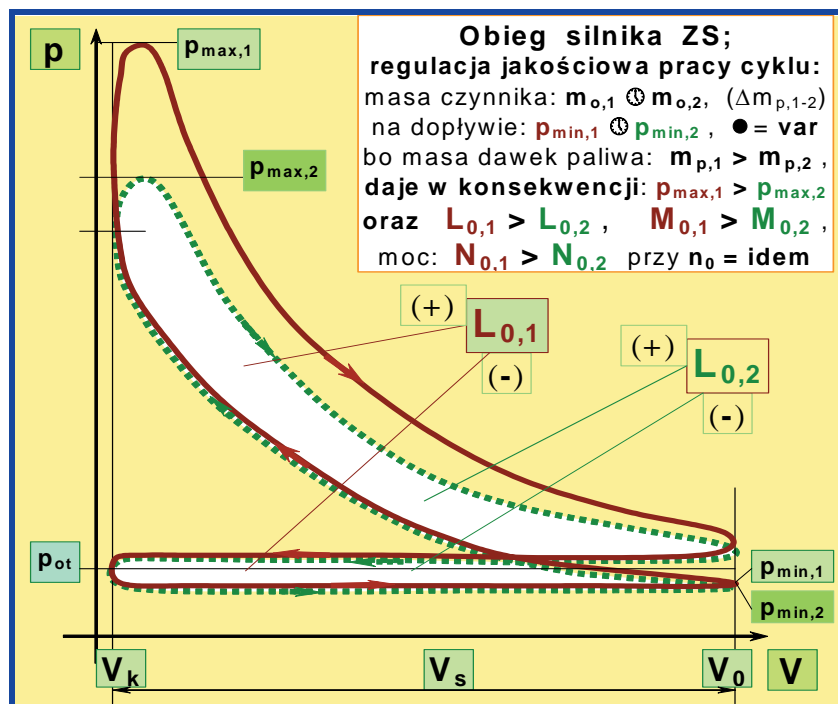
a) regulacja ilościowa, stosowana w silnikach z zapłonem iskrowym (ZI), kiedy następuje dopasowanie masy czynnika roboczego (suma masy doprowadzonego powietrza oraz masy dawki paliwa) do aktualnego zapotrzebowania, co skutkuje zazwyczaj odpowiednim poziomem ciśnienia p_1 w cylindrze po jego napełnieniu – ilustracją tego jest rys. 4.

b) regulacja jakościowa, stosowana w silnikach z zapłonem samoczynnym (ZS) – ilustruje ją schemat pokazany na rys. 5, a której cechą charakterystyczną jest to, że stosunek nadmiaru tlenu λ , a tym samym skład stechiometryczny (jakość) mieszanki palnej przygotowanej do procesu spalania, zmieniają się stosownie do aktualnego obciążenia silnika, a masa doprowadzonego powietrza pozostaje w przybliżeniu na niezmiennym poziomie. Natomiast wielkość masy dawki paliwa jest dostosowywana do aktualnego obciążenia silnika, co w

konsekwencji skutkuje zmianą stosunku nadmiaru powietrza (tlenu) λ oraz składu mieszanki palnej przygotowanej do procesu spalania, ponadto na skutek tego przy obciążeniach częściowych (aż do pracy na biegu jałowym) przez silnik w każdym cyklu przetłaczana jest znacznie nadmiarowa ilość powietrza (które nie uczestniczy aktywnie w procesie spalania), a jedynie przyczynia się do znacznego wzrostu względnej pracy wymiany ładunku, co tłumaczy schemat na rys. 5.



Rys. 4. Stosowanie regulacji ilościowej silników spalinowych (ZI)
 Fig. 4. Effects of quantitative control of internal combustion engine (SI)



Rys. 5. Stosowanie regulacji jakościowej silników spalinowych (ZS)
 Fig. 5. Effects of qualitative control of internal combustion engine (CI)

Niższa wartość osiąganego maksymalnego ciśnienia obiegu ($p_{\max,2} < p_{\max,1}$) wynika przede wszystkim (rys. 4) z niższej wartości startowej ($p_{\min,2} < p_{\min,1}$), co jest konsekwencją silnego dławienia strumienia gazu podczas przepływu przez przepustnicę.

W przypadku regulacji jakościowej (rys. 5) w układzie napełniania silnika brak jest przepustnicy, dlatego obowiązuje relacja ($p_{\min,2} \approx p_{\min,1}$), mimo tego wartość ciśnienia maksymalnego obiegu ($p_{\max,2} < p_{\max,1}$), gdyż stosunek nadmiaru tlenu $\lambda_2 > \lambda_1$.

Realizacja procesu wymiany ładunku silnika spalinowego wiąże się bezpośrednio z koniecznością pokonania napotykanego oporów przepływu, a więc z potrzebą wykonania odpowiedniej pracy wymiany ładunku L_w w ramach każdego cyklu.

2. Wpływ obciążenia silnika na straty wymiany ładunku

2.1. Czynniki wpływające na wielkość pracy wymiany ładunku

Wielkość pracy wymiany ładunku L_w wykonanej w ramach każdego cyklu wynosi:

$$L_w = L_{\text{nap}} + L_{\text{wyp}}, \quad L_{\text{nap}} < 0, \quad L_{\text{wyp}} < 0, \quad L_w < 0, \quad (5)$$

gdzie: L_{nap} – praca napełniania cylindra świeżym ładunkiem,

L_{wyp} – praca związana z wypływem produktów spalania (spalin) z cylindra silnika.

Składowe wielkości pracy wymiany ładunku można oszacować (rys. 6) jako:

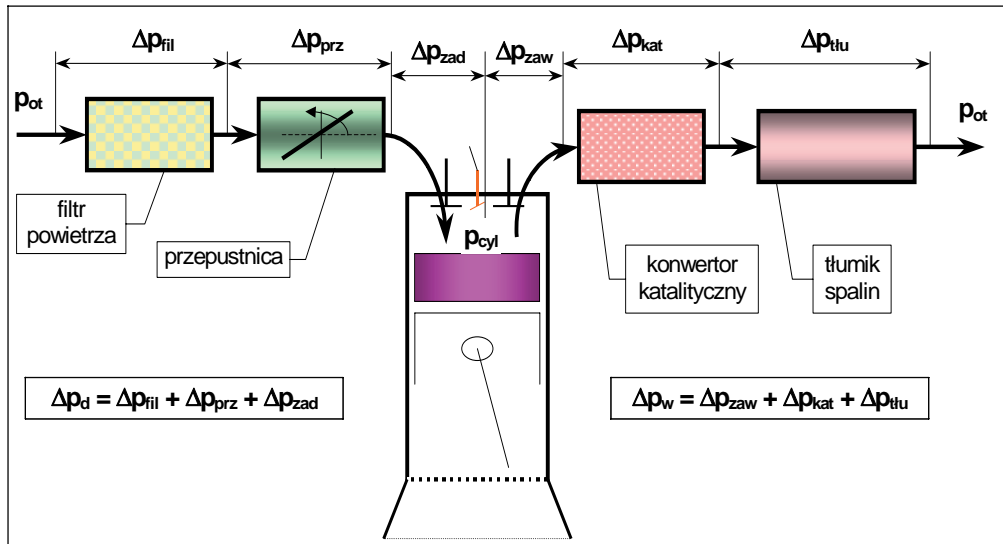
$$|L_{\text{nap}}| \approx \Delta p_d V_s, \quad |L_{\text{wyp}}| \approx \Delta p_w V_s, \quad \text{a wtedy: } |L_w| \approx (\Delta p_d + \Delta p_w) V_s, \quad (6)$$

gdzie: Δp_d – średni spadek ciśnienia po stronie dopływowej do cylindra,

Δp_w – średni spadek ciśnienia po stronie wypływowej z cylindra.

Praca wymiany ładunku przyjmuje wartości ujemne ($L_w < 0$) i przyczynia się do pomniejszenia wielkości pracy wewnętrznej L_i wykonywanej przez czynnik roboczy.

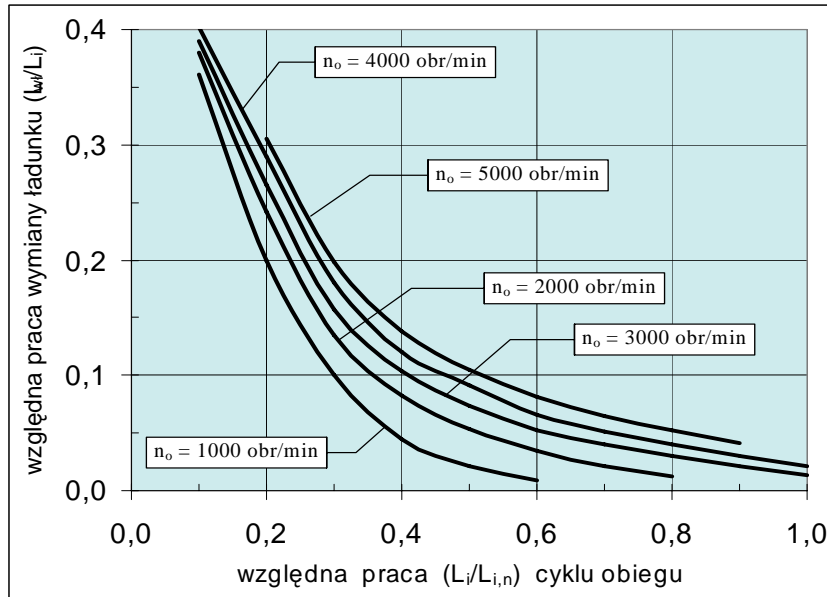
Usytuowanie oporów przepływu na drodze wymiany ładunku pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Zasadnicze elementy układu wymiany ładunku silnika spalinowego (ZI)

Fig. 6. Main resistance elements of IC engine charge exchange system (SI)

W oparciu o wyniki badań doświadczalnych opracowano ujęcie pokazane na rys. 7, z którego wynika, że wartości względnej pracy wymiany ładunku (L_w/L_i) zależą od względnego obciążenia silnika ($L_i/L_{i,n}$), a także od prędkości obrotowej \dot{n}_0 wału korbowego silnika spalinowego, co potwierdzono także w innych źródłach [7].

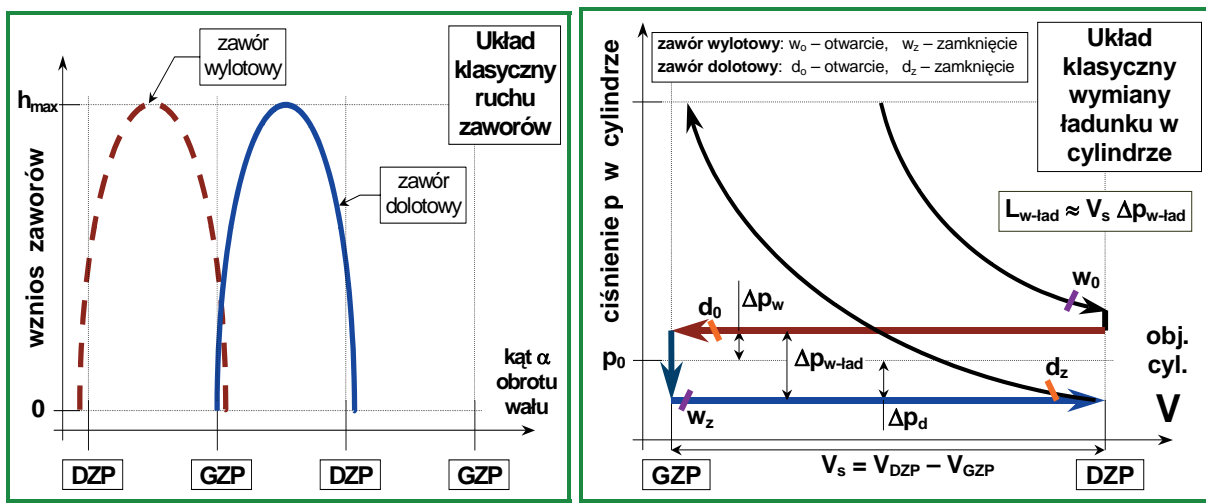


Rys. 7. Wpływ obciążenia silnika na względną pracę wymiany ładunku cyklu
 Fig. 7. Influence of combustion engine load on the charge exchange relative work

Zgodnie z oczekiwaniami z obliczeń wynika (rys. 7), że wraz ze zmniejszaniem obciążenia silnika względna praca wymiany ładunku (L_{wi}/L_i) znacząco wzrasta, aż do około 40 % przy najniższych obciążeniach, wzrost prędkości obrotowej n_o silnika powoduje wzrost pracy wymiany ładunku. W przypadku regulacji jakościowej (ZS) przy obciążeniach częściowych dławienie na dopływie wprawdzie nie występuje, lecz przez silnik przetłaczana jest znacznie nadmiarowa (w stosunku do minimalnego zapotrzebowania) ilość powietrza, która w efekcie przyczynia się także do znacznego wzrostu względnej pracy wymiany ładunku.

2.2. Wybrane możliwości w zakresie wykorzystania sterowania zaworami

W klasycznym rozwiązaniu systemu sterowania ruchem zaworów (rys. 2) zawór dolotowy zostaje otwarty jeszcze przed osiągnięciem przez tłok (GZP), a zamknięty już po minięciu (DZP), co zilustrowano za pomocą schematu pokazanego na rys. 8.



Rys. 8. Klasyczny ruch zaworów oraz wymiana ładunku silnika spalinowego
 Fig. 8. Classical motion of engine valves and shape of engine charge exchange

Stosując klasyczny system sterowania zaworami realizuje się tzw. klasyczny proces wymiany ładunku, pokazany schematycznie po prawej stronie rys. 8.

Zawór wylotowy zostaje otwarty jeszcze przed osiągnięciem przez tłok (DZP), a zamknięty już po minięciu (GZP), co w efekcie daje zauważalne współotwarcie obu zaworów (rys. 8). Sytuacja taka niewiele się zmienia wraz z obciążeniem silnika; za napełnienie cylindra odpowiedzialne jest głównie ustawienie przepustnicy (rys. 6).

Cechą charakterystyczną klasycznego rozwiązania systemu sterowania ruchem zaworów jest to, że pole pętli wymiany ładunku (rys. 8) jest znacznych rozmiarów (szczególnie przy niższych obciążeniach silnika, wzrost Δp_d), a tym samym wraz ze zmniejszaniem obciążenia silnika względna praca wymiany ładunku (L_{wl}/L_i) musi znacząco wzrastać. Skutkuje to w efekcie spadkiem sprawności energetycznej silnika.

Dla obniżenia wartości względnej pracy wymiany ładunku (L_{wl}/L_i) zaproponować można kilka rozwiązań wariantowych w odniesieniu do zagadnienia sterowania zaworami dolotowymi, w tym:

- a) układ z wcześniejszym zamknięciem zaworu dolotowego,
- b) układ z opóźnionym zamknięciem zaworu dolotowego,
- c) układ z opóźnionym otwarciem zaworu dolotowego,

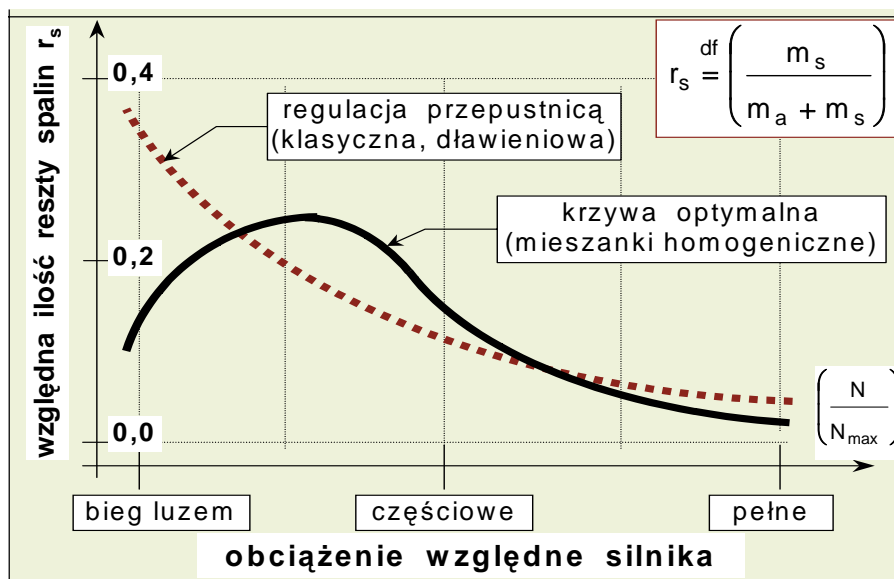
Istotne uwarunkowania wynikają także z potrzeby optymalnego doboru tzw. stopnia wewnętrznej recyrkulacji spalin.

Na tej podstawie można zaproponować także kilka rozwiązań wariantowych dotyczących zagadnienia sterowania zaworami wylotowymi, w tym:

- α) układ z wcześniejszym zamknięciem zaworu wylotowego,
- β) układ z opóźnionym zamknięciem zaworu wylotowego.

Bardzo interesujące będzie powiązanie rozwiązań wariantowych w odniesieniu do sterowania zaworami dolotowymi (a., b., c.) z rozwiązaniami wariantowymi dotyczącymi zagadnienia sterowania zaworami wylotowymi (α ., β .).

Zagadnienie programowania ilości reszty spalin pozostających w cylindrze z cyklu poprzedniego (tzw. recyrkulacja wewnętrzna spalin) zostało zilustrowane na rys. 9. Istotny wpływ wywiera tutaj wartość aktualnego obciążenia silnika oraz zastosowany system regulacji obciążenia.



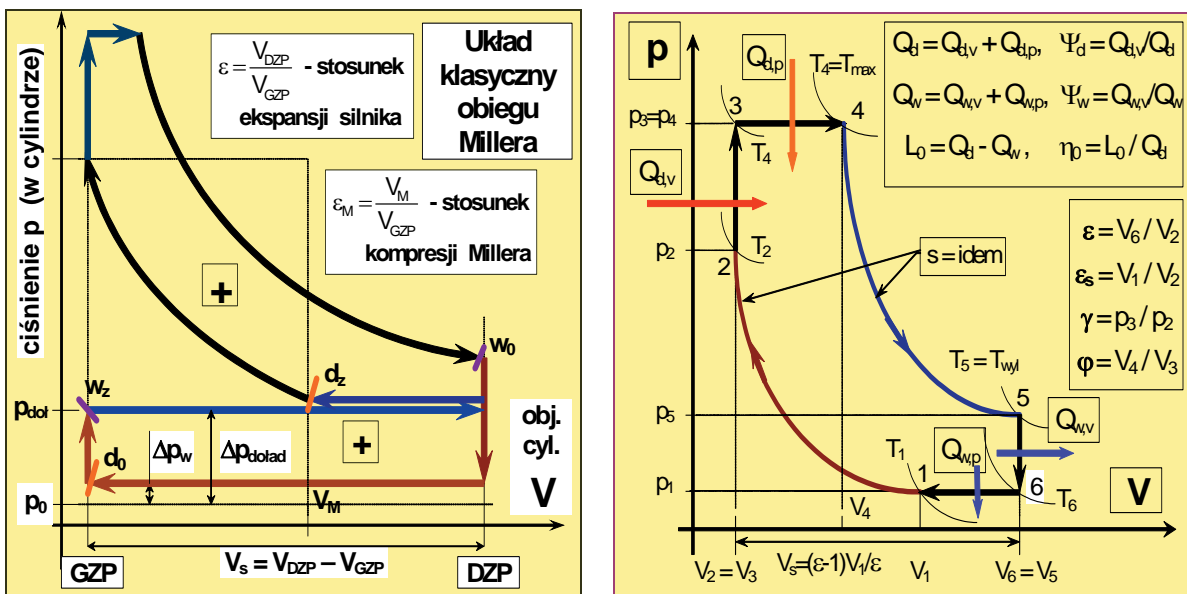
Rys. 9. Wpływ obciążenia silnika na ilość reszty spalin w cylindrze
Fig. 9. Influence of engine load on the mass of residual gases in a cylinder

W przypadku klasycznej regulacji dławieniowej można zaobserwować, że wraz ze zmniejszającym się obciążeniem silnika (a tym samym zwiększonym dławieniem na ssaniu) ciśnienie w cylindrze obniża się jeszcze w czasie współotwarcia zaworów, co powoduje, że spaliny zostają częściowo zawracane spoza jeszcze otwartego zaworu wylotowego do wnętrza cylindra, co skutkuje systematycznym wzrostem względnej ilości reszty spalin r_s . Jest to niekorzystne dla prawidłowej pracy silnika, gdyż dochodzi do zbyt częstego wypadania zapłonów. Optymalizacja w tym zakresie powinna polegać na zrealizowaniu (rys. 9) następujących opcji:

- w zakresie biegu luzem: wymagane są niższe wartości stosunku reszty spalin r_s , ze względu na potrzebę zagwarantowania pewności zapłonu oraz zapewnienie równomiernego (stabilnego) biegu silnika,
- w zakresie obciążeń częściowych: za sprawą stopniowo zmniejszanej dławienia na ssaniu następuje zwiększanie stopnia napełnienia cylindra, a tym samym spaliny reszkowe w cylindrze są lepiej tolerowane. Dzięki temu zniwelowaniu (obniżeniu) ulegają piki temperaturowe w czasie spalania, co pociąga za sobą ograniczenie emisji tlenków azotu NO_x , a ponadto zmniejszeniu ulega strumień ciepła (straty ciepła) do ścianek cylindra. Dalsze korzyści związane są ze zmniejszeniem pracy wymiany ładunku (wzrost sprawności silnika) oraz wzrostem stopnia napełnienia,
- w zakresie pełnych obciążeń: wymagane są możliwie niskie wartości względnej ilości r_s reszty spalin pozostałych w cylindrze, co wynika z wysokiego zapotrzebowania tlenu do spalania większej ilości dostarczanego paliwa.

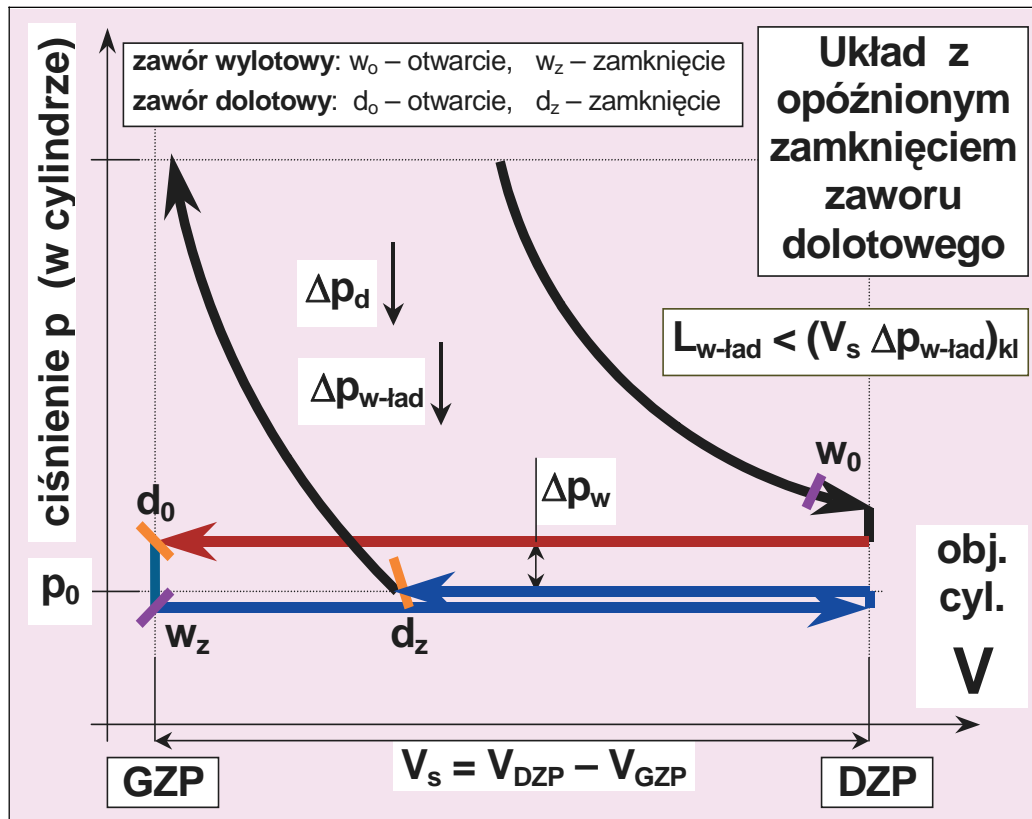
Algorytm sterowania ruchem zaworów dolotowych jak również wylotowych za pomocą rozwiązania pokazanego na rys. 3 należy dopracować, aby możliwie efektywnie przyczyniał się do ograniczenia dławienia świeżego ładunku na dopływie do silnika, a także optymalnego sterowania ilością reszty spalin (rys. 9), co ma szczególne znaczenie w obszarach pracy silnika spalinowego znacznie oddalonych od stanów nominalnych. Opracowane propozycje będą prezentowane na konferencji.

Jedną z wielu możliwości zmniejszenia pracy wymiany ładunku jest wykorzystanie obiegu Millera (Atkinsona), który pierwotnie [7] został zaproponowany do regulacji doładowanych silników lotniczych. Istotę propozycji zaprezentowano na rys. 10.



Rys. 10. Obieg Millera (Atkinsona) w pierwotnej oraz realizacyjnej odmianie
 Fig. 10. Primary and performance variant of the Miller (Atkinson) cycle

Efekt pokazany na rys. 10, a charakteryzujący się mniejszym stosunkiem kompresji izentropowej w stosunku do stosunku ekspansji produktów spalania (typowy zabieg w obiegu Atkinsona) uzyskać można stosując system z opóźnionym zamknięciem zaworu dolotowego, co zilustrowano na rys. 11.



Rys. 11. Realizacja obiegu Millera (Atkinsona) - sterowanie zaworem dolotowym
Fig. 11. Performance of the Miller (Atkinson) cycle using inlet valve steering

Realizacja tej koncepcji pokazanej na rys. 11 wymaga zastosowania niezależnego sterowania ruchem zaworów (rys. 3). Rozwiązanie to, chociaż na tym etapie obejmuje tylko sterowanie zaworem dolotowym [7] zostało już wdrożone do eksploatacji przez koncern japoński (model Prius).

3. Podsumowanie

Sprawa znaczącego obniżenia zużycia paliwa przez silniki spalinowe wykorzystywane do napędu samochodów osobowych jest dzisiaj szczególnie poważnie traktowana. Problem ten ma bezpośredni związek z wielkością ponoszonych kosztów eksploatacji pojazdu, a następnie także z wielkością emisji substancji szkodliwych (zarówno składniki gazowe, jak i cząstki stałe).

Większe potencjalne możliwości poprawy sytuacji wiązać można z ograniczeniem strat w procesie wymiany ładunku, co skutkuje wzrostem stopnia ξ_i doskonałości wewnętrznej szczególnie w obszarach znacznie oddalonych od stanów nominalnych pracy silnika spalinowego.

Praca wymiany ładunku i tarcie w układzie przyczyniają się do pomnażania strat energii towarzyszących procesowi konwersji energii w układzie. Z kolei wzrost wartości efektywnej sprawności energetycznej η_e silnika spalinowego bezpośrednio pociąga za sobą obniżenie

globalnej wielkości emisji substancji toksycznych głównie za sprawą wydatnego ograniczenia zużycia paliwa \dot{m}_p , a tym samym powoduje poprawę jakości procesów konwersji energii.

Jako rozwiązanie najbardziej efektywne proponuje się elektroniczne niezależne sterowanie ruchem zaworów dolotowych (masa świeżego ładunku doprowadzonego do cylindra), jak również ruchem zaworów wylotowych (chodzi o zatrzymanie reszty spalin w cylindrze, czyli realizację recyrkulacji wewnętrznej spalin).

Ustalenie kryteriów oraz opracowanie i dobór procedur niezależnego sterowania zaworami silnika spalinowego jest w tym przypadku sprawą zasadniczą i ważną, dlatego też stanowi istotny przedmiot prac badawczych. Opracowane dotąd koncepcje i propozycje będą szerzej prezentowane na konferencji.

Literatura

- [1] Ferguson, C. R., *Internal Combustion Engines. Applied Thermo - Sciences*. John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [2] Kowalewicz, A., *Tworzenie mieszanki i spalanie w silnikach z zapłonem iskrowym*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 1984.
- [3] Merkisz, J., *Ekologiczne aspekty stosowania silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
- [4] Postrzednik, S., Żmudka, Z., *Advanced Thermodynamic Cycle of Internal Eco-Engine*. 28th International Symposium on Combustion. Edinburgh, Scotland 2000.
- [5] Postrzednik, S., *Termodynamiczny obieg eko-silnika spalinowego*. PAN, Komitet Termodynamiki i Spalania. XVII. Zjazd Termodynamików. Kraków, 1999.
- [6] Szargut, J., Petela, R., *Egzergia*. WNT, Warszawa 1965.
- [7] *Shell Lexikon: Verbrennungsmotor*. Verlegerbeilage der ATZ, MTZ. Verlag Vieweg. Wiesbaden. 2000 – 2002.

