

CARNOTIZATION OF THE POWER CYCLE OF INTERNAL COMBUSTION RECIPROCATING ENGINE

Krzysztof Z. Mendera

Politechnika Częstochowska
Instytut Maszyn Tłokowych i Teorii Sterowania
Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa, Poland
tel.: +48 34 3250515, mendera@imc.pcz.czyst.pl

Abstract

There are two ways to increase the thermodynamic efficiency of the engine cycle known as the carnotization of the power cycle. The first is to ensure the highest possible maximum parameters and the second is to allow the working medium to expand further than in the standard cycle. This is known generally as the over-expansion or extended expansion cycle. This paper presents theoretical and numerical investigations into the effect of extended expansion on the thermal efficiency and mean effective pressure.

The performance of an air standard Atkinson cycle was considered and compared to that of the Sabathe cycle. The Miller version of extended expansion air standard cycle was analysed for both naturally aspirated and supercharged engine. Additionally, the numerical simulation of supercharged engine was also carried out. In both cases, two inlet valve closing strategies were evaluated (Early Intake Valve Closure-EIVC and Late Intake Valve Closure - LIVC). From the present investigation it is concluded that the extended expansion concept is an effective way of the carnotization of the power cycle of internal combustion reciprocating engine. The main conclusion resultant from presented paper deals controls of closing angle of inlet valve which is to be an effective way of influence on the course of temperature changes of the working charge and what should be useful for the level emission decreasing of nitrous oxides.

Keywords: Air Standard Cycle, Extended expansion cycle, Miller cycle, Atkinson cycle, Early Intake Valve Closure, Late Intake Valve Closure

KARNOTYZACJA OBIEGU TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie

Karnotyzacja obiegu silnika spalinowego tj. poszukiwanie sposobu podwyższenia jego sprawności może dotyczyć zarówno źródła górnego (sposobu doprowadzania ciepła) jak i dolnej przemiany odprowadzania ciepła Karnotyzacja źródła dolnego to wszelkie próby zmierzające do przedłużenia ekspansji czynnika roboczego. W pracy przedstawiono teoretyczną i numeryczną analizę wpływu przedłużenia ekspansji na sprawność i ciśnienie średnie obiegu silnikowego. Przeprowadzono analizę teoretyczną obiegu Atkinsona, a jej wyniki porównano z klasycznym obiegiem Sabathe. Dokonano także analizy obiegu Millera zarówno dla silnika niedoładowanego jak i doładowanego oraz zrealizowano badania symulacyjne obiegu doładowanego silnika z przedłużoną ekspansją. W obu przypadkach analizę przeprowadzono zarówno dla wczesnego zamknięcia zaworu dolotowego jak i późnego zamknięcia zaworu dolotowego. Przeprowadzone badania usprawiedliwiają tezę, iż koncepcja przedłużonej ekspansji może być skutecznym sposobem karnotyzacji obiegu tłokowego silnika spalinowego. Główny wniosek wynikający z prezentowanego artykułu dotyczy sterowania kątem zamknięcia zaworu dolotowego, może być efektywnym sposobem oddziaływania na przebieg zmian temperatury czynnika roboczego i co powinno być przydatne dla ograniczania poziomu emisji tlenków azotu.

Słowa kluczowe: obieg teoretyczny, obieg z przedłużoną ekspansją, obieg Atkinsona, obieg Millera, wczesne zamknięcie zaworu dolotowego, późne zamknięcie zaworu dolotowego.

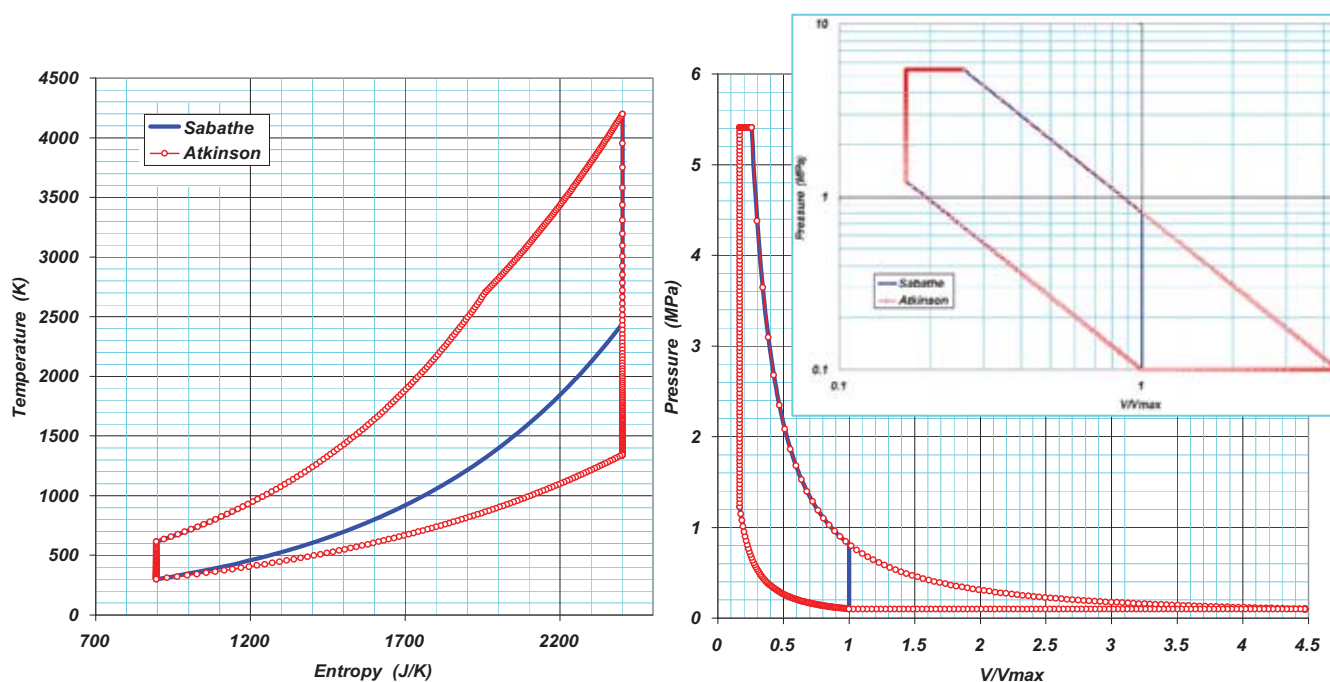
1. Wprowadzenie

Obiegi teoretyczne, zwane także obiegami cieplnymi wzorcowymi lub porównawczymi, służą do przedstawienia istoty działania silnika cieplnego tj. cyklu przemian energii doprowadzanej w

postaci ciepła w pracę mechaniczną. Są one obiegami złożonymi wyłącznie z odwracalnych przemian termodynamicznych, którym jest poddawana niezmienna ilość czynnika roboczego, traktowanego jako gaz doskonały o właściwościach powietrza (stąd ich angielska nazwa – Air Standard Cycle). Najbardziej znane teoretyczne obiegi tłokowego silnika spalinowego to oczywiście obiegi Otto, Diesla oraz ich swoista kombinacja zwana obiegiem mieszanym (z mieszanym doprowadzeniem ciepła) lub obiegiem Sabathe. Wzorem dla wszystkich obiegów cieplnych jest obieg Carnota, a wszelkie próby podwyższenia sprawności są kolejną próbą karnotyżacji obiegu silnika spalinowego tj. poszukiwania sposobów przybliżających obieg silnika do obiegu izentropowo-izotermicznego. Ten proces może dotyczyć zarówno karnotyżacji źródła górnego (sposobu doprowadzania ciepła) jak dolnej przemiany odprowadzania ciepła (karnotyżacja źródła dolnego). Jako przykład karnotyżacji źródła górnego może służyć koncepcja silnika z ładunkiem homogenicznym i zapłonem samoczynnym (CAI, HCCI, PCCI) zmierzająca do intensyfikacji procesu spalania, a więc do izochoryzacji procesu doprowadzenia ciepła tj. „przyspieszeniu” procesu osiągania parametrów maksymalnych, a tym samym umożliwiającym wcześniejsze rozpoczęcie ekspansji. Karnotyżacja źródła dolnego to wszelkie próby zmierzające do substytucji izochorycznego odprowadzania ciepła procesem izobarycznym, co w konsekwencji umożliwia przedłużenie ekspansji czynnika roboczego. Do tej kategorii należy zaliczyć popularne ostatnio próby zastosowania obiegów Atkinsona i Millera w zaawansowanych hybrydowych układach napędowych i silnikach gazowych.

2. Obiegi Atkinsona i Millera

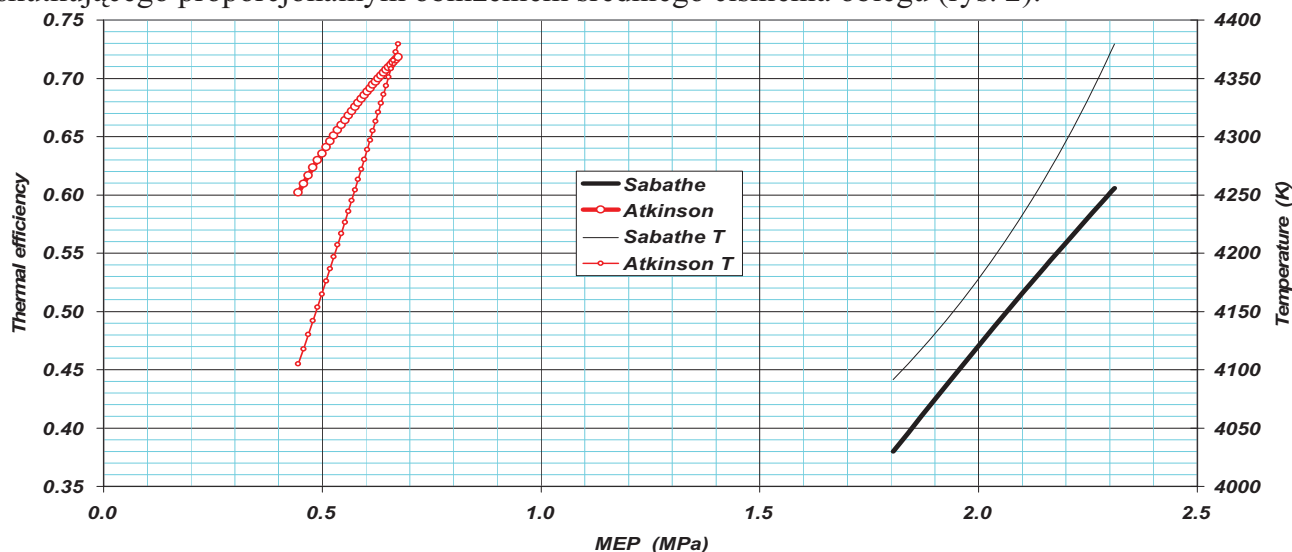
Obieg Atkinsona [1, 4] charakteryzuje się całkowitą (aż do osiągnięcia ciśnienia otoczenia) ekspansją czynnika roboczego i - w konsekwencji - izobarycznym odprowadzaniem ciepła. Ten rodzaj karnotyżacji obiegu, prowadzący do maksymalizacji ekspansji czynnika roboczego (rys. 1, wykres T-s), umożliwia lepsze (niż w obiegach z izochorycznym odprowadzaniem ciepła) zagospodarowanie ciepła doprowadzonego, ale jest obciążony koniecznością znaczącego powiększenia objętości roboczej cylindra (rys. 1, wykres p-V).



Rys.1. Porównanie cykli Atkinsona i Sabathe
Fig.1. Comparison of Atkinson and Sabathe cycle

W konsekwencji, dla takich samych parametrów dolnego i górnego źródła, pełna realizacja obiegu Atkinsona prowadzić musi do wzrostu sprawności termodynamicznej sięgającej

teoretycznie kilkunastu procent za cenę kilkukrotnego powiększenia objętości skokowej silnika skutkującego proporcjonalnym obniżeniem średniego ciśnienia obiegu (rys. 2).



Rys. 2. Sprawność i temperatura maksymalna obiegu w funkcji ciśnienia średniego
Fig. 2. Thermal efficiency and maximum temperature of the cycle vs. mean effective pressure

Oryginalna koncepcja R. Millera [3] polega na przyspieszeniu zamknięcia zaworu dolotowego tak, aby możliwe było obniżenie początkowej temperatury oraz zmniejszenie pracy kompresji czynnika w cylindrze silnika turbodoładowanego (miało to zapewnić „wewnętrzne chłodzenie”). Koncepcja Millera (a raczej jej rozumienie) została znacząco rozszerzona i obecnie pojęcie „obiegu Millera”¹ odnosi się praktycznie do wszelkich prób realizacji obiegu cieplnego silnika spalinowego (doładowanego), wyróżniającego się przewagą ekspansji nad kompresją czynnika roboczego. Silniki realizujące tę koncepcję charakteryzują się różnymi wartościami rzeczywistego stopnia sprężania (determinującego maksymalne parametry obiegu) i geometrycznego stopnia sprężania (określającego potencjalne możliwości ekspansji czynnika) i w tym sensie pojęcie obiegu Millera (a także Atkinsona) można uznać za swego rodzaju szczególne przypadki obiegu o przedłużonej ekspansji [2], w którym karnotyzacja dolnego źródła, polegająca na częściowej izobaryzacji procesu odprowadzania ciepła, może odnosić się zarówno do silnika wolnossącego jak doładowanego.

3. Obiegi z przedłużoną ekspansją

3.1. Obiegi silnika wolnossącego

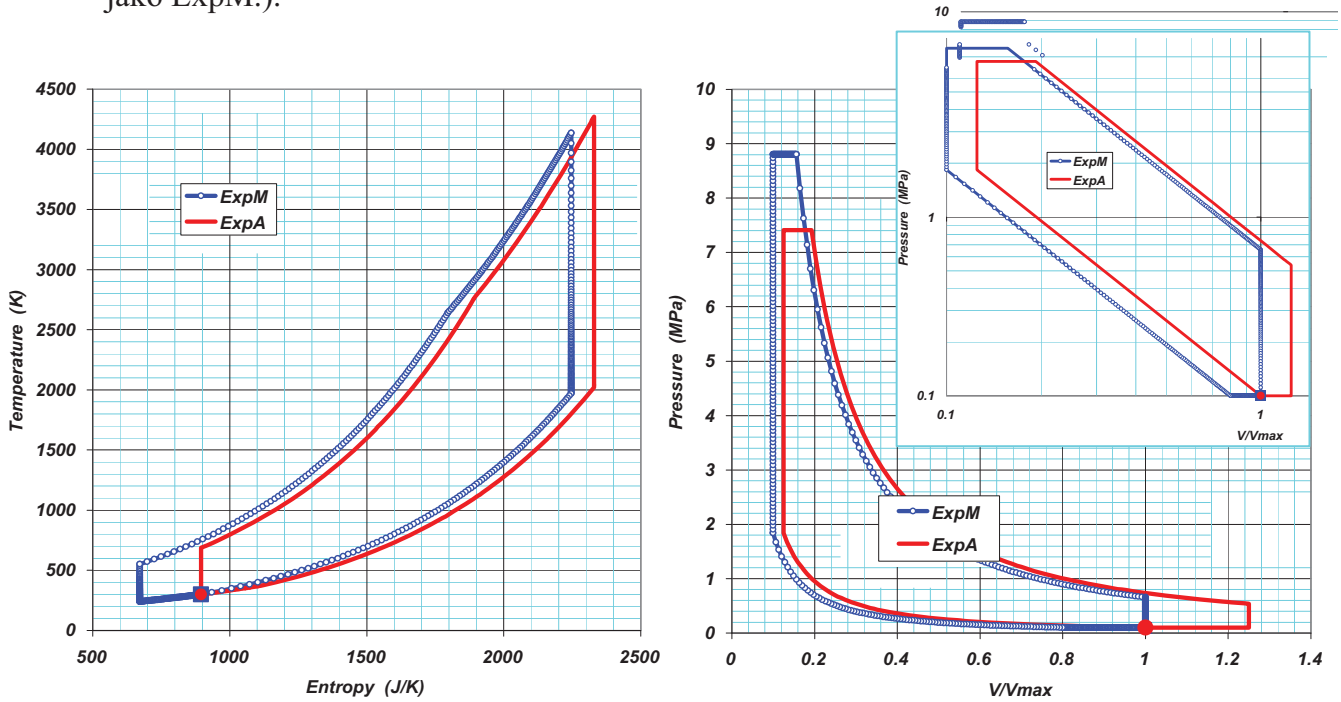
Dla potrzeb tego opracowania obiegi z przedłużoną ekspansją zostały podzielone z punktu widzenia doładowania i początku kompresji czynnika roboczego w cylindrze silnika (odpowiadającego w silniku pracującym zamknięciu zaworu dolotowego i determinującego rzeczywisty stopień sprężania).

Obiegi silnika wolnossącego możemy sklasyfikować wg punktu początku kompresji wyróżniając:

- obiegi, w których proces kompresji rozpoczyna się od warunków otoczenia, zaś izobaryczne odprowadzenie ciepła zamyka cykl przemian. W ogólnym przypadku nie mamy rygoru całkowitej ekspansji, a izobaryczne odprowadzenie ciepła może stanowić dowolną część całego procesu oddawania ciepła. Jest to obieg o przedłużonej ekspansji, który w granicy przechodzi w obieg Atkinsona (ciepło w całości odprowadzane jest izobarycznie). (Na rys. 3 oznaczony jako ExpA.),
- obiegi, w których proces kompresji zostaje poprzedzony izobarycznym odprowadzeniem ciepła (od czynnika w stanie początkowym), co zapewnia mu wewnętrzne chłodzenie,

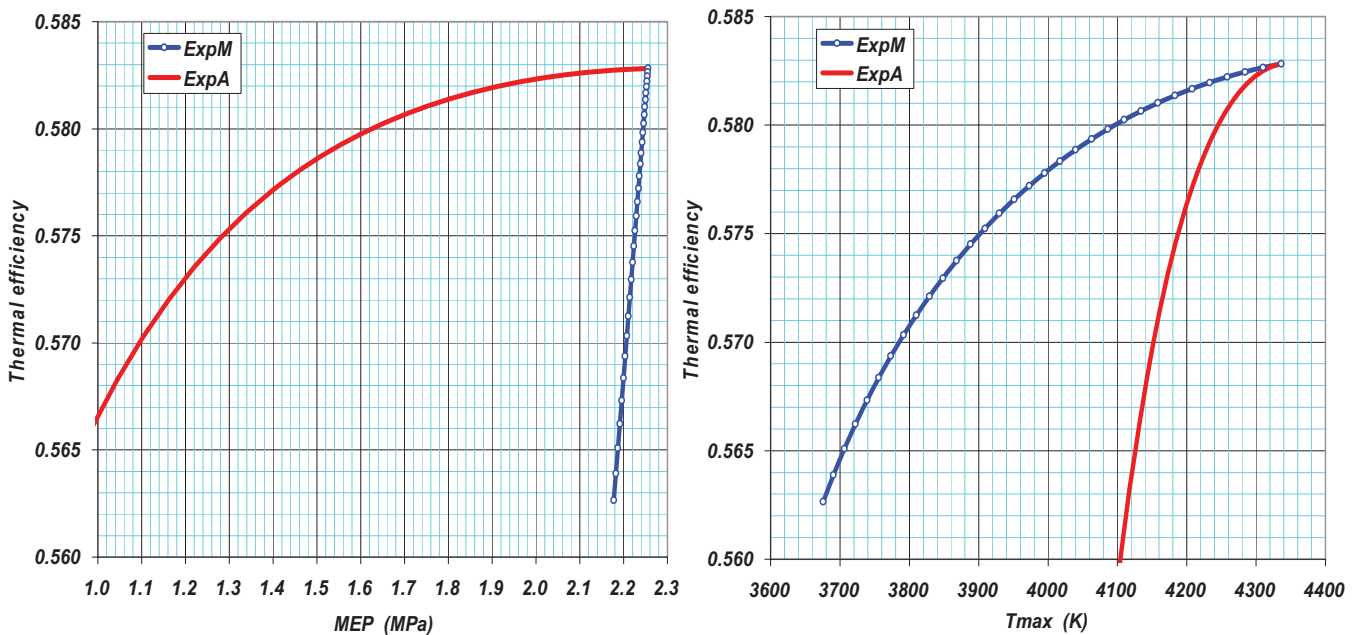
¹ Wprowadzenie do wyszukiwarki frazy „Miller Cycle” powoduje znalezienie 38200 rekordów (fraz „Atkinson cycle” - 24700).

a sam obieg czyni podobnym do obiegu Millera bez doładowania. (Na rys. 3 oznaczony jako ExpM.).



Rys. 3. Obiegi z przedłużoną ekspansją silnika wolnossącego
Fig. 3. Extended expansion cycles of NA engine

Porównanie osiągnięć tych obiegów (dla różnych proporcji pomiędzy ekspansją i kompresją), pokazane na rys. 4, dowodzi, że obieg z przedłużoną ekspansją i częściowo izobarycznym odprowadzeniem ciepła (będący mniej rygorystyczną realizacją cyklu Atkinsona) winien zapewnić wyższą sprawność przy tej samej wartości ciśnienia średniego, zaś milleryzacja obiegu, polegająca na izobarycznym odprowadzaniu ciepła przed rozpoczęciem ekspansji, pozwala na uzyskanie określonej sprawności przy niższym poziomie temperatury maksymalnej obiegu (wewnętrzne chłodzenie!).



Rys. 4. Zależność sprawności rozważanych wersji obiegu z przedłużoną ekspansją od ciśnienia średniego i maksymalnej temperatury obiegu

Fig. 4. Thermal efficiency of various strategies of extended expansion cycle as the function of mean effective pressure and maximum temperature

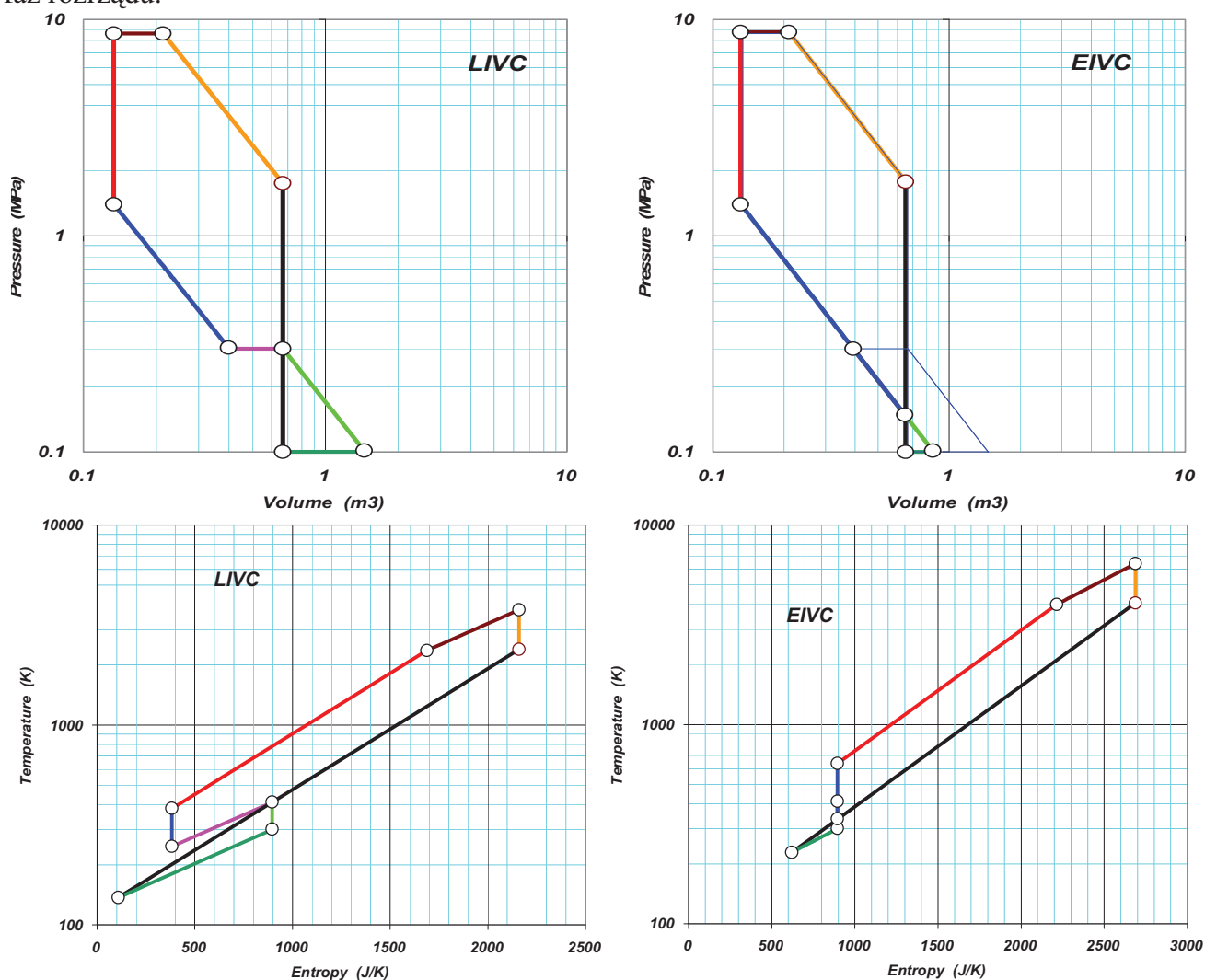
3.2. Obiegi silnika doładowanego

3.2.1 Obiegi teoretyczne silnika doładowanego

Obiegi teoretyczne silnika doładowanego mechanicznie (a ściślej – obiegi czynnika w zespole silnik tłokowy + sprężarka) pokazano na rys. 5 zarówno na wykresach p - V (rysunki górne) jak i T - s (rysunki dolne). W obu przypadkach dla przejrzystości skorzystano z logarytmicznej formy prezentacji. Obieg pokazany po lewej odnosi się do przypadku opóźnionego zamknięcia zaworu dolotowego (LIVC), co powoduje stosowne przesunięcie początku kompresji w silniku (zostaje ono poprzedzone izobarycznym odprowadzeniem ciepła).

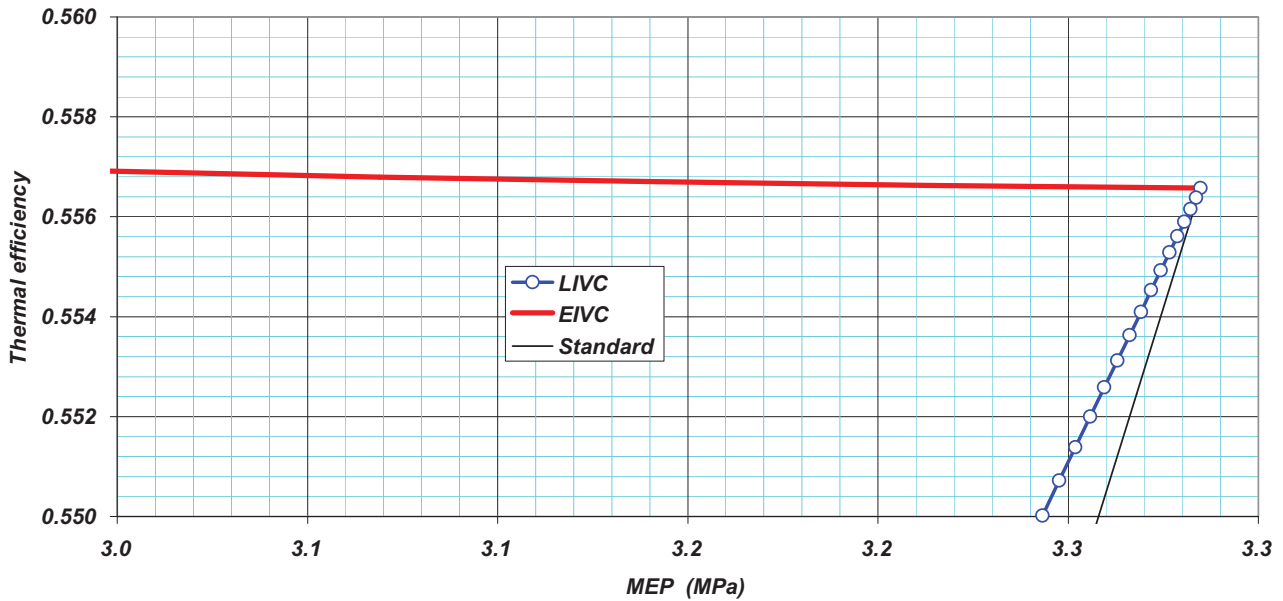
Prawa kolumna rysunku 5 ilustruje przypadek obiegu silnikowego z przyspieszonym zamknięciem zaworu dolotowego (EIVC), co w konsekwencji powoduje, że czynnik roboczy, wstępnie skompresyjowany w sprężarce, jest następnie najpierw ekspandowany, a potem ponownie kompresyjowany w silniku.

Wyniki obliczeń sprawności i ciśnienia średniego rozważanych obiegów, zilustrowane na rys.6, dowodzą wyższości obiegu z przedłużoną ekspansją nad standardowym obiegiem silnika doładowanego. Ponadto wskazują, że koncepcja przyspieszonego zamknięcia zaworu dolotowego (EIVC) zapewnia większą sprawność przy tej samej wartości ciśnienia średniego oraz stwarza możliwość regulacji obciążenia silnika praktycznie przy niezmiennej sprawności, co może być szczególnie użyteczne dla koncepcji silnika ZI o regulacji obciążenia poprzez odpowiednie zmiany faz rozrządu.



Rys. 5. Obiegi teoretyczne silnika doładowanego z opóźnionym i przyspieszonym zamknięciem zaworu dolotowego pokazane na wykresach p - V – T - s

Fig. 5. Power cycles of supercharged engine with , Late Intake Valve Closure and Early Intake Valve Closure presented in p - V and T - s diagrams

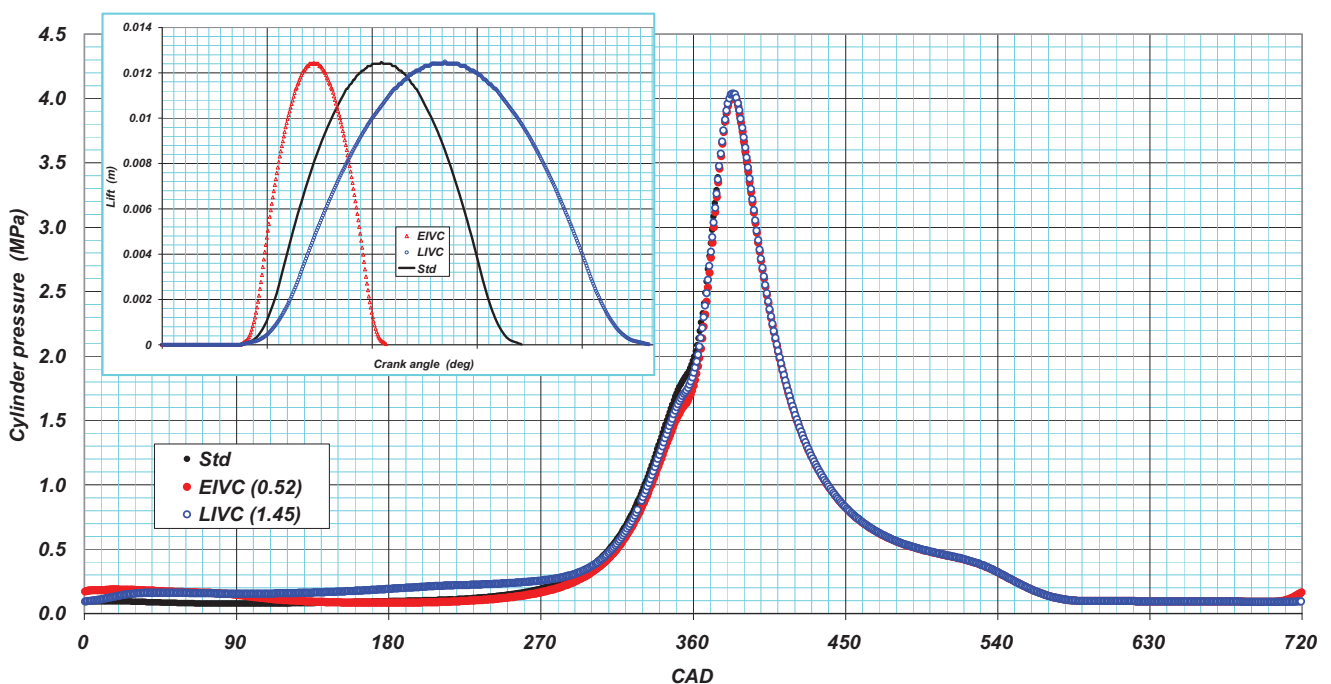


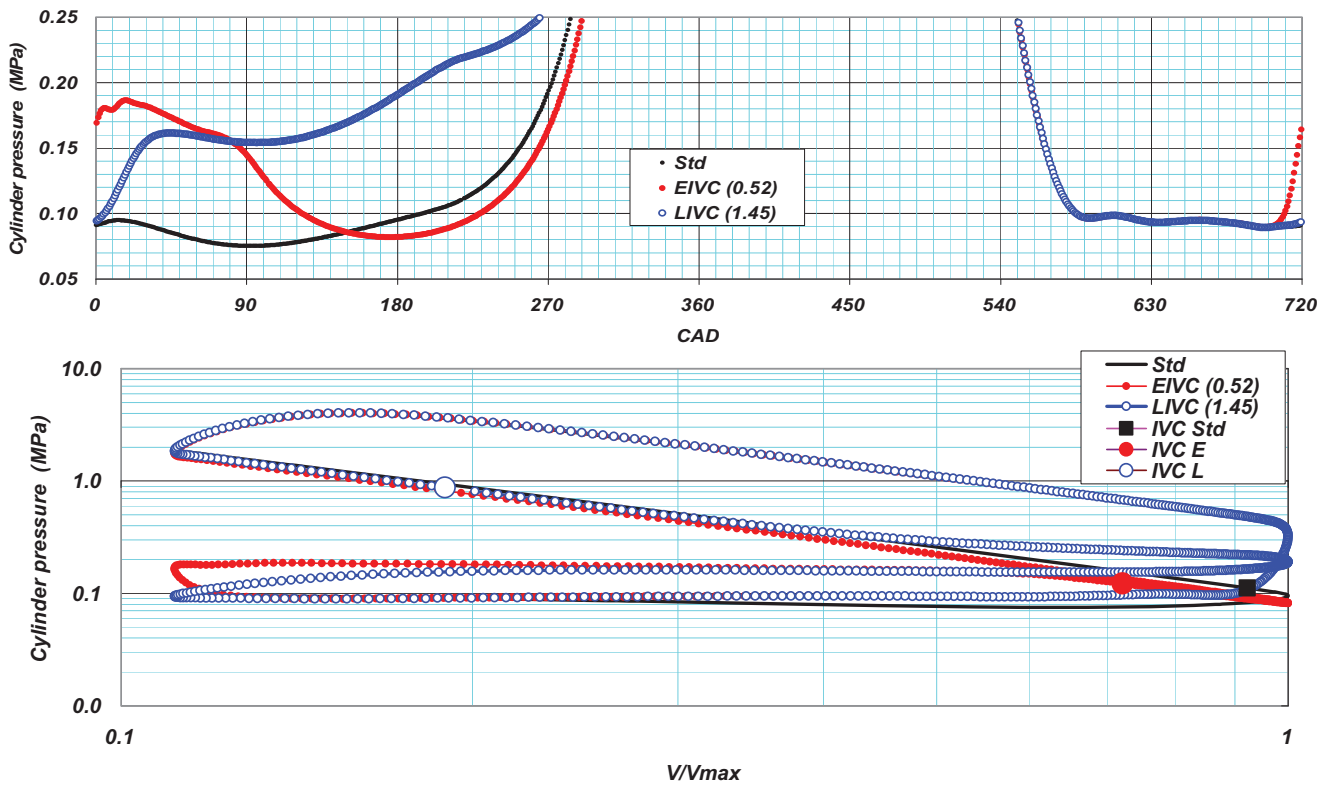
Rys. 6. Wpływ strategii zamykania dolotu na zależność sprawności od ciśnienia średniego
 Fig. 6. Influence of IVC strategy on the thermal efficiency – mep relation

4. Modelowanie obiegu rzeczywistego doładowanego silnika z przedłużoną ekspansją

Wyniki analizy obiegu teoretycznego postanowiono skonfrontować z wynikami modelowania obiegu silnika rzeczywistego za pomocą programu Ricardo Wave [5] umożliwiającego dowolne kształtowanie profilu wzniosu zaworu dolotowego (pokazane w „okienku”, na rys. 7 dla trzech wartości współczynnika duration multiplier 1, 1.45, 0.52).

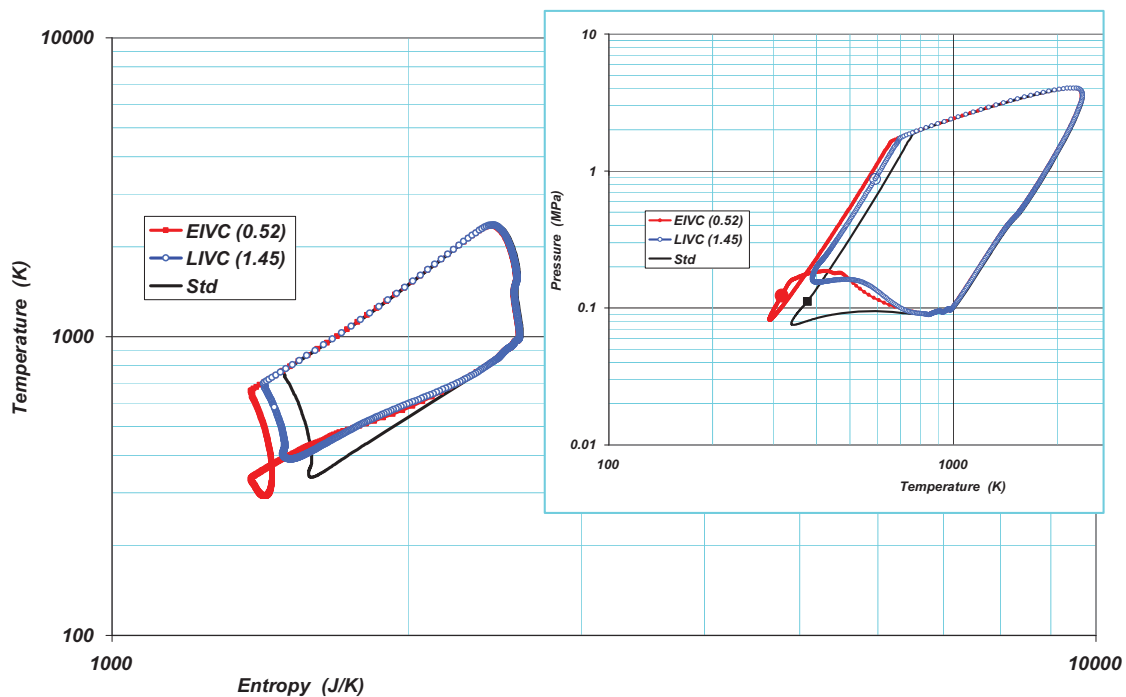
Obliczenia prowadzono dla stałej wartości ciśnienia doładowania, a do porównań (rys. 7) wybrano te przebiegi, które charakteryzują się tą samą (co silnik standardowy) wartością parametrów maksymalnych obiegu, co winno zapewnić zbliżoną odporność na spalanie stukowe. (Na rysunku środkowym zilustrowano wpływ zamknięcia zaworu dolotowego na proces wymiany ładunku, a rysunek dolny prezentuje wykres indykatorowy).





Rys. 7. Porównanie wyników modelowania dla różnych kątów zamknięcia dolotu
 Fig. 7. Comparison of simulation results for various intake valve closures

Na rys. 8 przedstawiono wykresy T-s (dotyczące tylko przemian w cylindrze) oraz pętle ciśnienie – temperatura czynnika roboczego (zaznaczono punkty zamknięcia zaworów dla kolejnych realizacji) dowodzące, że, mimo podwyższenia ciśnienia dolotu, dzięki odpowiedniemu doborowi faz rozrządu można obniżyć temperaturę kompresji i utrzymać maksymalne parametry obiegu silnika doładowanego na poziomie charakterystycznym dla standardowego silnika wolnossącego.



Rys. 8. Porównanie obiegów na wykresach T-s oraz p-T
 Fig. 8. Comparison of T-s and p-T diagrams

Syntetyczne zestawienie rezultatów modelowania obiegu silnika z przedłużoną ekspansją przedstawiono w tablicy 1 zawierającej zarówno wyniki obliczeń jak i ich porównanie w postaci ilorazu osiągnięć silnika doładowanego o odpowiednio wydłużonym lub skróconym procesie dolotu i wartości standardowej tj. odnoszącej się do silnika wolnossącego o „normalnych” fazach rozrządu.

Tab. 1. Porównanie wyników modelowania
Tab. 1. Comparison of simulation results

	Standard	EIVC	LIVC	Std/Std	EIVC/Std	LIVC/Std
Indicated efficiency.	0.3605	0.3788	0.37	1	1.051	1.026
IMEP [MPa]	0.988	1.101	1.039	1	1.114	1.052
pmax [MPa]	4.01	4.02	4.03	1	1.002	1.005

Tablica 1 dowodzi, że silnik, w którym karnotyżacji obiegu dokonuje się poprzez wcześniejsze zamknięcie zaworu dolotowego, a dzięki doładowaniu uzyskuje się stosowną kompensację ciśnienia średniego, zapewnia wyższy przyrost sprawności indykowanej.

5. Podsumowanie

Teoretyczno-numeryczna analiza karnotyżacji obiegu silnika spalinowego na drodze przedłużenia ekspansji wykazała, że:

- realizacja obiegu o przedłużonej ekspansji w silniku wolnossącym może być sposobem podwyższenia sprawności, ale kosztem znaczącego obniżenia ciśnienia średniego,
- spadek ciśnienia średniego należy skompensować przez odpowiednie doładowanie i w efekcie możliwe jest podwyższenie sprawności bez utraty mocy i zmian maksymalnych parametrów obiegu,
- efekt ten może być osiągnięty zarówno przez odpowiednie przyspieszenie jak i opóźnienie zamknięcia zaworu dolotowego,
- z tych dwóch strategii zmian kąta końca dolotu, wcześniejsze zamykanie dolotu wydaje się być bardziej efektywne z punktu widzenia osiągnięć silnika, choć niewątpliwie jest bardziej kłopotliwe technicznie i dlatego praktycznie niestosowane (rozrząd elektromechaniczny może być bardzo użyteczny pod tym względem),
- sterowanie kątem zamknięcia zaworu dolotowego może być także efektywnym sposobem oddziaływania na przebieg zmian temperatury czynnika roboczego, co winno być przydatne dla ograniczania poziomu emisji tlenków azotu.

Literatura

- [1] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill series in mechanical engineering*, McGraw-Hill, 1988.
- [2] Mendera, K. Z., *Próba optymalizacji pracy silnika spalinowego poprzez wykorzystanie efektów przedłużonej ekspansji*, W: Podstawy budowy silników spalinowych (pod red. S. Starucha). WKiŁ, Warszawa, str. 305-310, 1978.
- [3] Miller, R., *Supercharging and internally cooling for high output*, ASME Transactions 69 (1947) pp. 453–464.
- [4] Moran, M. J., Shapiro, H. N., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, Inc. 2004 5th ed., 2004.
- [5] WAVE v5 Engine. Reference Manual. Ricardo 2002.