

PIELECHA Ireneusz, CIEŚLIK Wojciech, BOROWSKI Przemysław

TERMODYNAMICZNA ANALIZA PRACY SILNIKA Z CYKLU NA CYKL Z OBIEGIEM ATKINSONA

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę indykatorową z cyklu na cykl silnika o zapłonie iskrowym pracującego w obiegu Atkinsona. Charakterystyka pracy z cyklu na cykl opisywana jest najczęściej przy pomocy współczynnika zmienności (CoV) średniego ciśnienia indykowanego oraz przez wielkości charakteryzujące wywiązywanie ciepła. Parametry te pozwalają na charakterystykę jednostki napędowej i są jednym z głównych kierunków tematów badawczych dotyczących cyklicznych zmian pracy silnika spalinowego.

WSTĘP

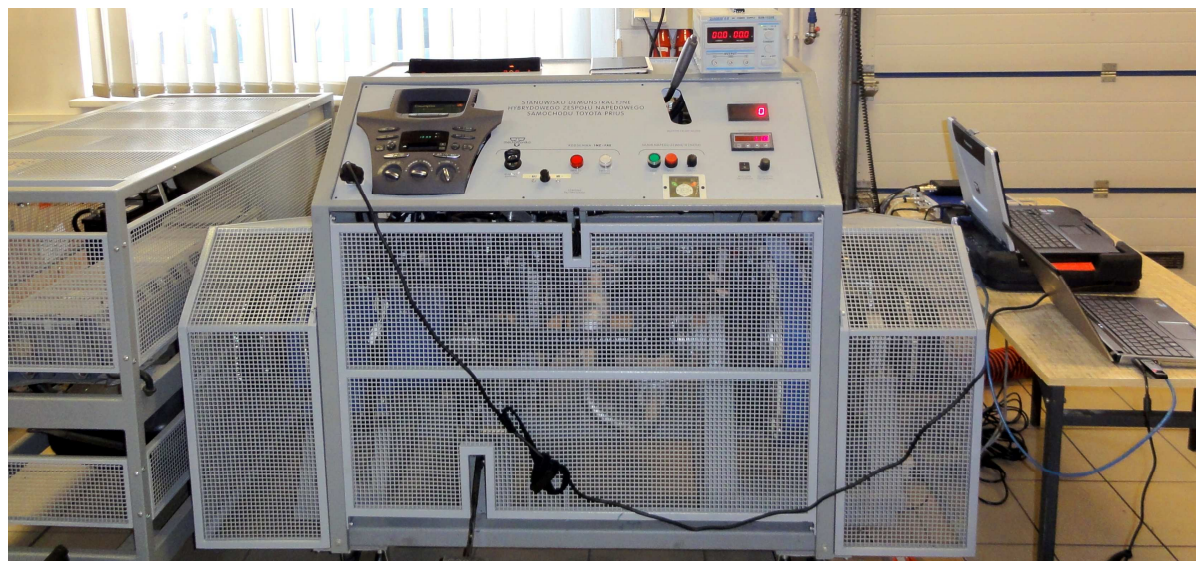
Współczesny rozwój silników spalinowych jest wymuszony przez spełnienie wymagań dotyczących – z jednej strony – ochrony środowiska przez minimalizację emisji związków toksycznych zawartych w spalinach oraz zmniejszenia zużycia paliwa, a z drugiej – uzyskiwania coraz wyższych, maksymalnych wskaźników pracy silnika spalinowego. Aby sprostać tak trudnym wymaganiom silnik poddawany jest nieustannej optymalizacji procesów spalania. Strategia podziału dawki paliwa oraz określenie optymalnej zmiennej geometrii układu dolotowego w określonych warunkach pracy silnika pozwala na poprawę osiągnięć oraz zwiększa sprawność jednostki napędowej. Dotychczasowa diagnostyka procesów spalania w silnikach tłokowych bazuje przede wszystkim na analizie wartości ciśnień szybkozmiennych w komorze spalania oraz ocenie szybkości wywiązywania się ciepła w warunkach ustalonych pracy silnika. Jednakże charakterystycznymi warunkami pracy silników spalinowych przeznaczonych do napędu pojazdów samochodowych jest ich losowa zmienność prędkości obrotowej oraz obciążenia. Rozkład zmian tych wielkości jest uzależniony od warunków użytkowania pojazdu i jego przeznaczenia. Analiza zapisu warunków pracy silników trakcyjnych wykazała, że podstawowymi stanami w eksploatacji jest rozbieg (około 54% czasu pracy) i hamowanie (około 30%) [1, 4]. Również podczas ruchu pojazdu w warunkach pracy silnika zbliżonych do statycznych występują fluktuacje zmian tych wielkości. Efektem dotychczasowej diagnostyki jest brak pełnej analizy termodynamicznej przez niedostateczne rozpoznanie procesów spalania podczas nieustalonych warunków pracy jednostek napędowych.

Poniższy artykuł dotyczy badań silnika spalinowego 1NZ-FXE pracującego w obiegu Atkinsona przy zastosowaniu zmiennych faz rozrządu, wpływających na zmienność rzeczywistego stopnia sprężania i napełnienia cylindrów. Odpowiedni dobór parametrów pracy silnika z obiegiem Atkinsona zasadniczo wpływa na wzrost sprawności z równoczesnym zmniejszeniem emisji składników toksycznych spalin oraz zmniejszeniem zużycia paliwa.

W artykule omówiono wybrane punkty pracy silnika z cyklu na cykl w czasie dwóch zróżnicowanych wielkości przyspejszania. Analiza sygnałów szybkozmiennych w aspekcie wielkości termodynamicznych przyczyniła się do określenia zmian wybranych wskaźników pracy silnika z cyklu na cykl jego pracy.

1. METODYKA BADAŃ

Badania przebiegów ciśnienia indykowanego w warunkach nieustalonych zostały wykonane na mobilnym stanowisku badawczym silnika spalinowego 1NZ-FXE [2] stanowiącym element hybrydowego układu napędowego Toyoty Prius (rys. 1), którego parametry techniczne zostały przedstawione w tabeli 1.



Rys. 1. Mobilne stanowisko demonstracyjnego szeregowo-równoległego hybrydowego zespołu napędowego Toyoty Prius

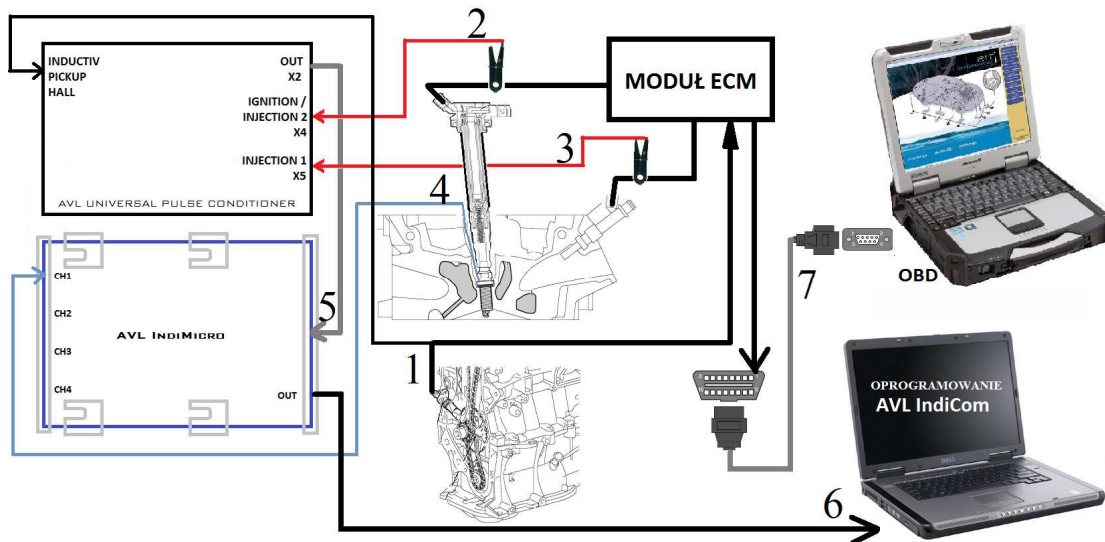
Tab. 1. Parametry techniczne silnika 1NZ-FXE Toyoty Prius

Wielkość	Jednostka	Wartość	Szkic
Liczba cyl/układ	–	4/rzędowy	
Objętość skokowa	cm ³	1497	
Skok x średnica S×D	mm × mm	75,0 × 84,7	
Stopień sprężania ϵ_{sA}	–	10	
Stopień rozprężania ϵ_{rA}	–	13	
Moc maksymalna Ne	kW @ obr/min	57 @ 4500	
Moment obrotowy Mo	N·m @ obr/min	115 @ 4200	

Zródło: [3]

Stanowisko do badań zostało przygotowane według schematu przedstawiono na rys. 2. W celu wyznaczenia termodynamicznych wielkości pracy silnika w analizie z cyklu na cykl przeprowadzono badania w zakresie analizy sygnałów szybkozmiennych z rejestracją danych względem kąta obrotu wału korbowego. W tym celu sygnał z czujnika indukcyjnego obrotu wału korbowego jest rozdzielony równoległe na potrzeby modułu ECM oraz kondycjonera AVL (1). Programowa rozdzielczość kątowa obrotu wału korbowego wynosi $\Delta\alpha = 1^\circ$ OWK. Sygnał napięciowy z cewki zapłonowej jest mierzony na przewodzie (2) przy pomocy cęg napięciowych, a sygnał z wtryskiwacza przy pomocy cęg prądowych umieszczonych na przewodzie (3) zasilającym wtryskiwacz. Powyższe trzy sygnały dostarczano do kondycjonera impulsów AVL, z którego dalej przekazywano do układu sygnałów szybkozmiennych AVL IndiMicro. Sygnał (4) z adaptera świecy zapłonowej (przebieg

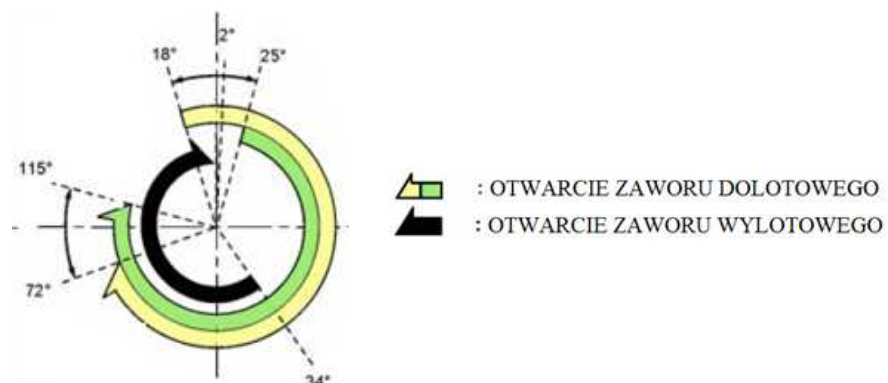
ciśnienia w komorze spalania) wyposażonej w czujnik ciśnienia AVL GH13Z31 (zakres pomiarowy 0–25 MPa, czułość 15,83 pC/bar) podłączono do pierwszego kanału systemu akwizycji danych. Zapis i późniejszą analizę wyników badań umożliwia połączenie przewodem (6) z komputerem rejestrującym wyposażonym w oprogramowanie AVL IndiCom 2011. W celu rejestracji pozostałych parametrów pojazdu (takich jak: prędkość pojazdu, temperatura płynu chłodzącego, obliczone obciążenie) wykorzystano komputer z dedykowanym oprogramowaniem podłączony przez złącze diagnostyczne OBD (7).



Rys. 2. Schemat połączeń stanowiska pomiarowego

2. CHARAKTERYSTYKA PRACY OBIEGU ATKINSONA

Obieg opracowany przez Jamesa Atkinsona realizowany jest w silniku 1NZ-FXE przez późne zamknięcie zaworu dolotowego i wykorzystanie zmiennych faz rozrządu (rys. 3). Możliwe jest uzyskanie zmiany fazy otwarcia zaworu dolotowego w granicach 72-115° OWK po DMP (zakres różni się w zależności od roku produkcji silnika). W zależności od trybu pracy hybrydowego układu napędowego jednostka sterująca (ECM) koryguje wartość otwarcia zaworów dolotowych przez system VVT (układ zmiennych faz rozrządu) w celu optymalnego dopasowania faz rozrządu do warunków pracy silnika.



Rys. 3. Fazy rozrządu silnika Toyota Prius na stanowisku demonstracyjnym
 Źródło: [3]

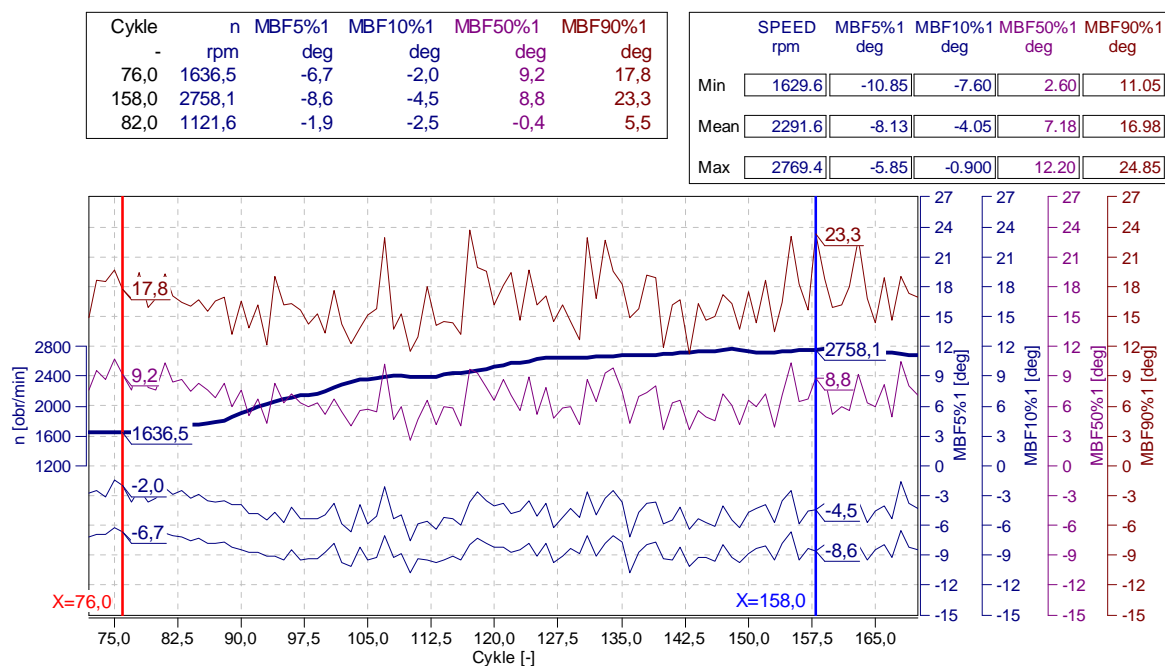
3. ANALIZA WARUNKÓW PRZEJŚCIOWYCH PRACY SILNIKA Z CYKLU NA CYKL

3.1. Wybór warunków przejściowych

Do analizy wywiązywania ciepła zostały wybrane dwa zakresy cykli pracy, w których wystąpił przyrost prędkości obrotowej. Łagodny przyrost prędkości obrotowej silnika został wybrany dla akceleracji od prędkości obrotowej $n = 1636$ obr/min do prędkości $n = 2758$ obr/min, która została osiągnięta w ciągu 82 cykli. Drugi zakres analizy obejmuje gwałtowny przyrost prędkości od $n = 1236$ obr/min do $n = 4316$ obr/min osiągnięty w ciągu 24 cykli, w którym moduł ECM w celu spełnienia zapotrzebowania na obliczone obciążenie zmienił fazy rozrządu w kierunku szybszego zamknięcia zaworu dolotowego.

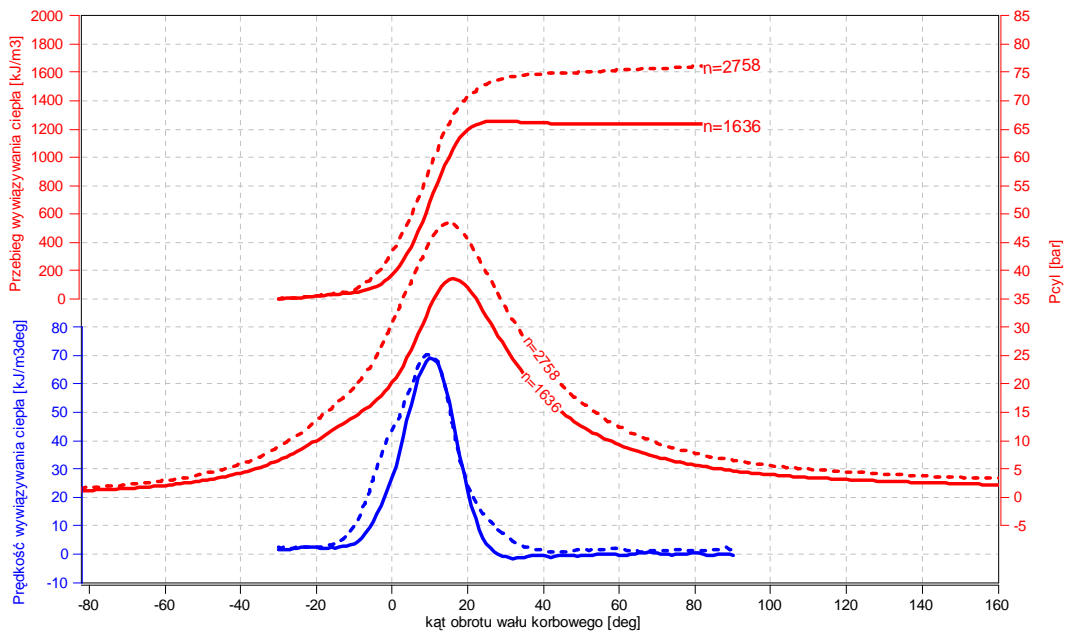
3.2. Analiza parametrów dla łagodnej akceleracji

Przebieg prędkości i wywiązywania ciepła oraz ciśnienia w cylindrze względem kąta obrotu wału korbowego dla wybranego zakresu cykli wraz z zaznaczonymi punktami początku i końca zwiększania prędkości obrotowej wału korbowego silnika przedstawiono na rys. 4. Wartości wywiązywania ciepła są scharakteryzowane przez wielkości MBF5%, MBF10%, MBF50% oraz MBF90% które oznaczają procentowy udział masy spalonego paliwa. Rysunek 5 ukazuje wartości kąta przy których została spalona określona część paliwa. Analiza wartości z dwóch wybranych cykli (cykl 76 oraz 158 na osi cykli – rys. 4) wskazuje na charakter wypalenia mieszanki. Wartość MFB5%, MFB10% oraz MFB50% podczas akceleracji osiągnęła kąt obrotu wału korbowego wcześniejszy, niż cykl przed rozpoczęciem rozpędzania. Natomiast kąt MFB90% osiągnął wartość większą o ponad 5° OWK. Powyższe zależności wskazują na szybsze wypalenie części mieszanki w pierwszej fazie spalania oraz jej późniejsze (dłuższe) spalanie w 90%. Spowodowane jest to wtrysnięciem większej dawki paliwa wymaganej do osiągnięcia aktualnego zapotrzebowania na moc przez silnik spalinowy i jednocześnie większe wyprzedzenie kąta zapłonu. Widoczne są natomiast pojawiające się niepowtarzalności spalania w kolejnych cyklach pracy silnika podczas przyspieszania.



Rys. 4. Wykres przebiegu prędkości i wartości kątów procentowego wypalenia mieszanki podczas łagodnego rozpędzania

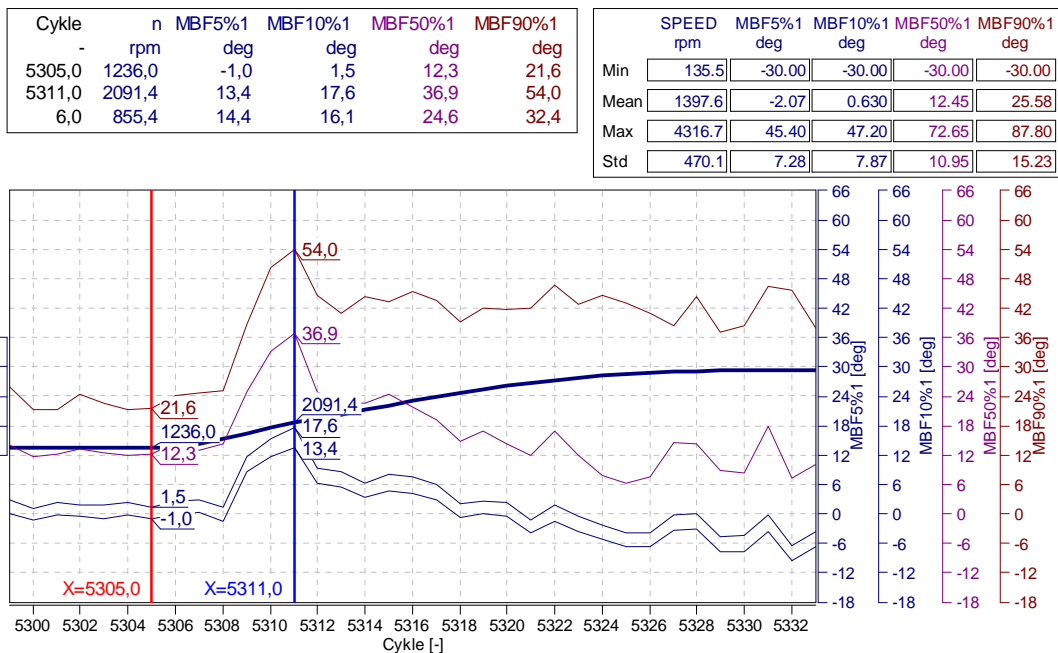
Wynikiem końcowym tych przeregulowań jest zmiana przebiegu wywiązywania ciepła (rys. 5). Szybkość wywiązywania ciepła ma gwałtowniejszy przebieg przy większej prędkości obrotowej w pierwszej fazie spalania (ze względu na szybszy przyrost ciśnienia w cylindrze).



Rys. 5. Analiza procesu akceleracji na wykresie prędkości i przebiegu wywiązywania ciepła oraz ciśnienia w cylindrze w funkcji obrotu wału korbowego

3.3. Analiza parametrów dla gwałtownej akceleracji

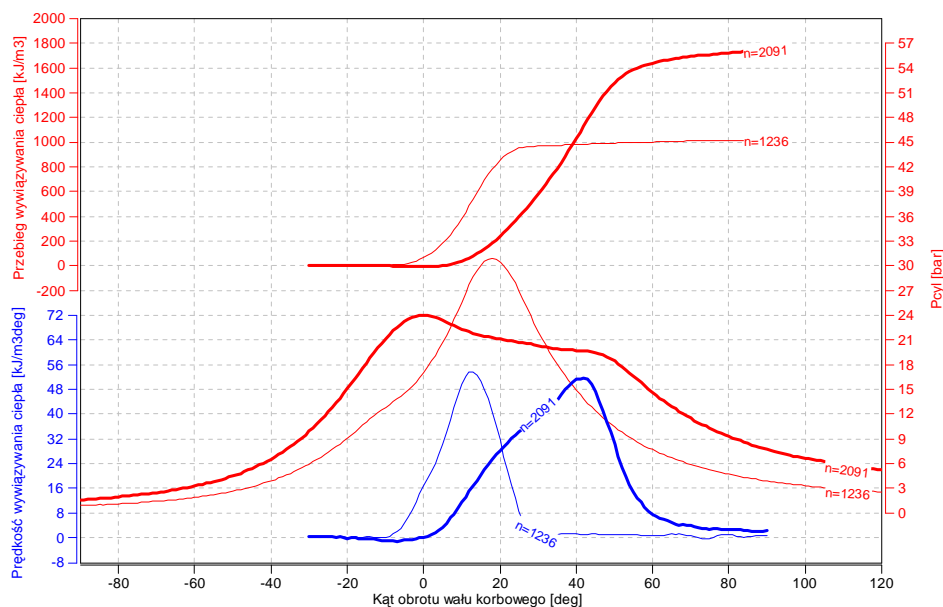
Wybrany cykl przyspieszania z przejazdu na stanowisku demonstracyjnym został zrealizowany od około $n = 1236$ obr/min do około $n = 4316$ obr/min jednakże proces gwałtownego narastania prędkości obrotowej miał miejsce przez pierwsze 6 cykli osiągając prędkość obrotową na poziomie $n = 2091$ obr/min (rys. 6).



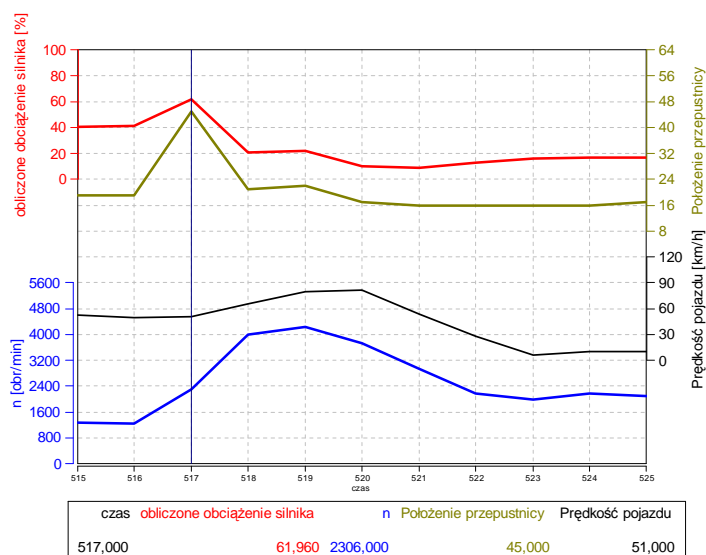
Rys. 6. Przebieg prędkości i wartości kątów procentowego wypalenia paliwa podczas gwałtownego przyspieszania

Dużo większe zmiany w udziałach wypalania paliwa (rys. 6) skutkują również zmianą tendencji przebiegu szybkości i całkowitej wartości wywiązywania ciepła (rys. 7). Podczas gwałtownego przyspieszenia uzyskano odmienny obraz tych wielkości.

Taki przebieg powyższych wykresów (rys. 7) jest spowodowany charakterem wymuszenia przyspieszenia pojazdu. W przypadku badań na stanowisku demonstracyjnym zostało zadane gwałtowne przyspieszenie pojazdu, sterownik silnika odczytał wartość obliczonego obciążenia na poziomie 62% (rys. 8).

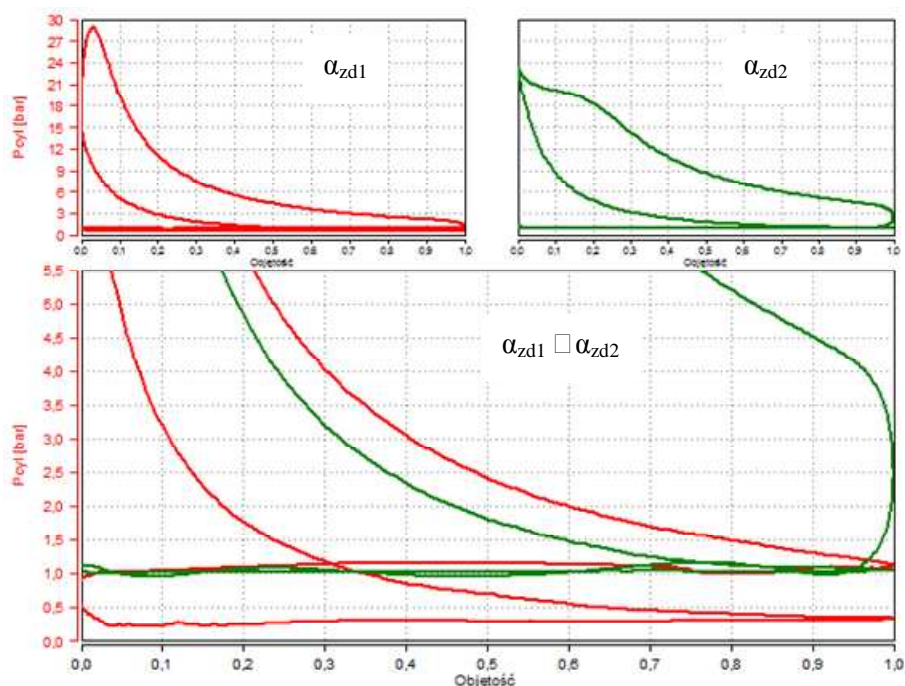


Rys. 7. Analiza procesu akceleracji na wykresie prędkości i przebiegu wywiązywania ciepła oraz ciśnienia w cylindrze w funkcji obrotu wału korbowego



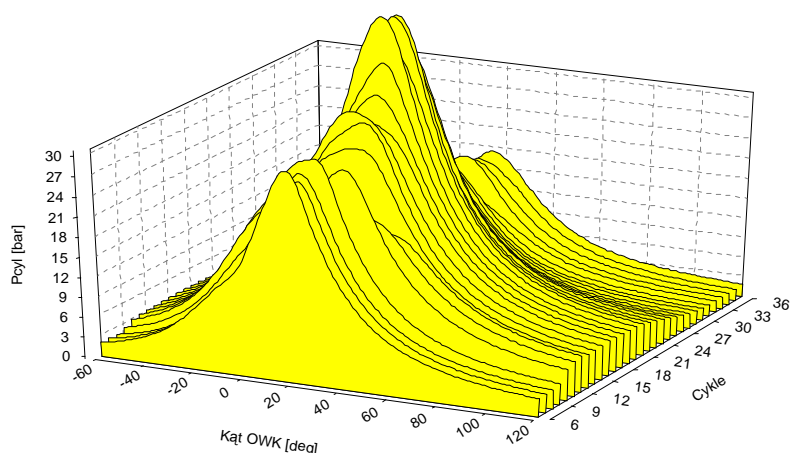
Rys. 8. Parametry rejestrowane przez moduł ECM – analiza sterowania procesem akceleracji

W takiej sytuacji sterownik ECM wykorzystując system zmiennych faz rozrządu odczytał bieżące warunki pracy silnika jako zakres małych prędkości obrotowych przy dużym obciążeniu. Układ ECM przyspieszył zamknięcie zaworu dolotowego w celu zwiększenia współczynnika napełnienia. Dzięki temu obciążenie silnika uległo zwiększeniu (czas 517 s na rys. 8), spełniając zapotrzebowanie mocy silnika podczas akceleracji, następnie układ zmiany faz rozrządu ponownie opóźnił zamknięcie zaworu dolotowego.

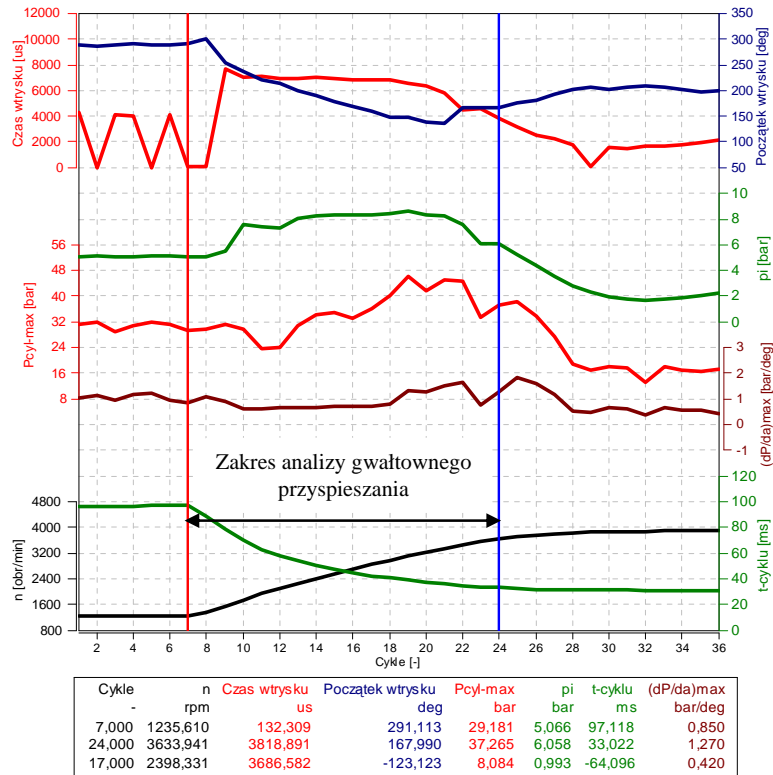


Rys. 9. Zamknięty wykres indykatorowy przy zmiennym zamknięciu zaworu dolotowego

Przebieg zmienności ciśnienia w cylindrze przedstawiony na rysunku 9 w zestawieniu ze zmianą prędkości obrotowej w każdym cyklu pracy (rys. 10) prowadzi do uzyskania dużych wartości przyrostów prędkości obrotowej silnika w kolejnych cyklach pracy. Należy użyć terminologii na jeden cykl pracy cylindra, a nie na cykl pracy silnika ze względu na badanie jedynie (w tym przypadku) pierwszego cylindra, bez uwzględnienia cykli roboczych z pozostałych cylindrów. Analiza wykresu z rysunku 11 wskazuje na znaczne skracanie czasu cyklu podczas przyspieszania stanowiąc odwrotność prędkości obrotowej. Odnosić należy gwałtowny przyrost wartości średniego ciśnienia indykowanego (p_i) w początkowych cyklach przyspieszania jako skutek uzyskiwania dużych przyrostów ciśnienia w cylindrze. Niestety niewielka zmiana szybkości przyrostu ciśnienia $(dp/d\alpha)_{max}$ wskazująca na utrzymanie stałego poziomu opisywanej wartości oznacza, że jej wykorzystanie jako wskaźnika nie jest dobrym wyborem do określania niestabilnych warunków pracy silnika spalinowego.

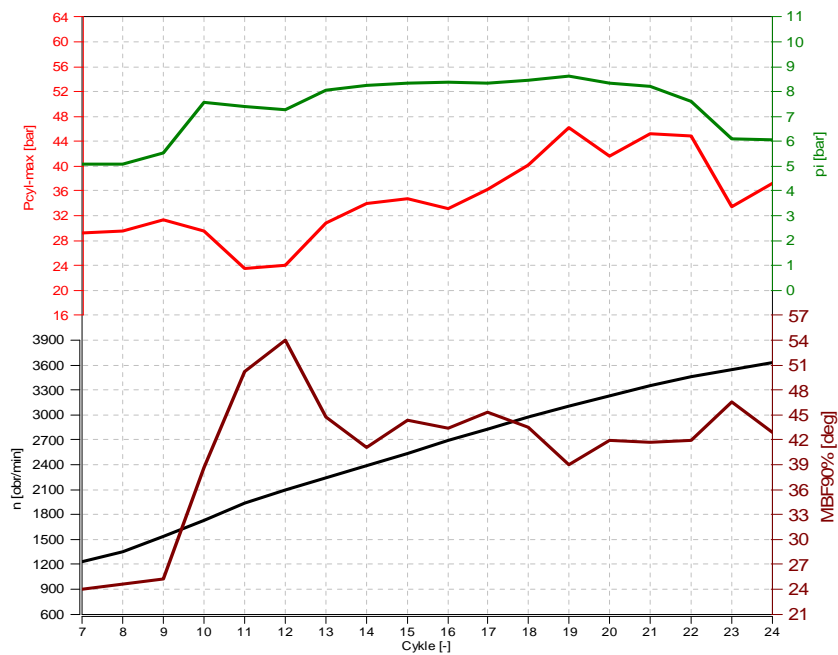


Rys. 10. Kolejne cykle pracy silnika do uzyskania maksymalnego ciśnienia indykowanego podczas gwałtownego przyspieszania



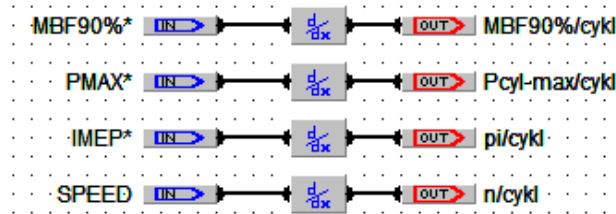
Rys. 11. Wskaźniki pracy silnika podczas gwałtownego przyspieszenia

Należy odnotować jednak wzrost średniego ciśnienia indykowanego w czasie przyspieszenia. Wzrost wartości p_i nie jest ściśle powiązany z wartościami maksymalnego ciśnienia w cylindrze. Natomiast kąt wystąpienia MBF90% zmniejsza się wraz z osiągnięciem maksymalnych wartości p_i i $P_{cyl-max}$ dla analizowanych przebiegów (rys. 12).

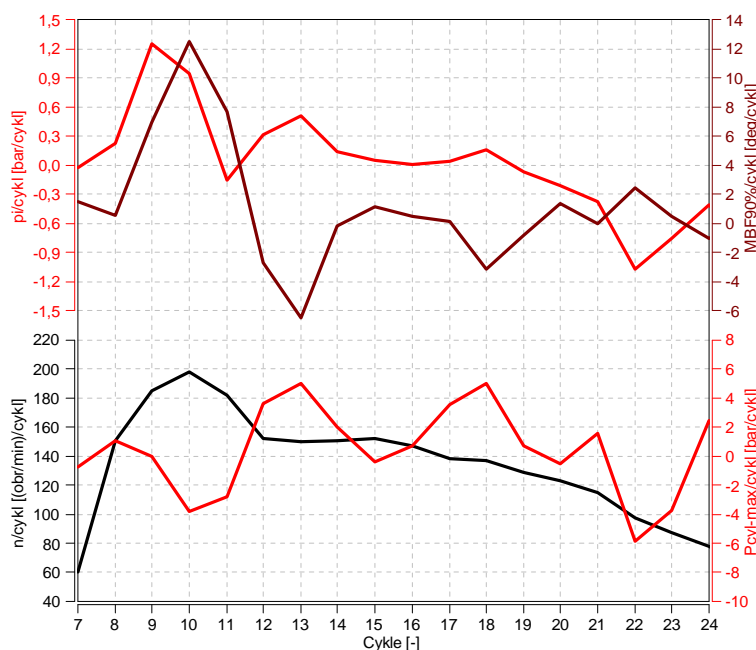


Rys. 12. Zakres analizowanych zmian wskaźników termodynamicznych silnika w kolejnych cyklach pracy podczas gwałtownego przyspieszenia

Przy użyciu pochodnej funkcji: przebiegu prędkości obrotowej silnika, średniego i maksymalnego ciśnienia indykowanego oraz wartość kąta dla 90% wywiązanego ciepła, zaimplementowanej w funkcjach podstawowych obliczeń matematycznych programu CalcGraf (rys. 13) uzyskano miary szybkości zmian tych wielkości względem cykli pracy silnika. Na tej podstawie wyznaczono wskaźniki pracy z cyklu na cykl przedstawione na rysunku 14.



Rys. 13. Procesu obliczeniowy programu CalcGraf pochodnej wybranych funkcji



Rys. 14. Zmiany wskaźników termodynamicznych silnika na cykl pracy w kolejnych obrotach wału korbowego podczas gwałtownego przyspieszenia

W wyniku analizy powyższego wykresu można odnotować następujące wartości:

- nieustalone warunki pracy charakteryzowały się przyrostem prędkości obrotowej z cyklu na cykl (zmienna $n/cykl$ na rys. 14) od 60 do 200 obr/min,
- zmiana maksymalnego ciśnienia w cylindrze (zmienna $P_{cyl-max}/cykl$ na rys. 14) wyniosła około 0,5 MPa i została odnotowana dla 13 i 18 cyklu z wybranego zakresu analizy,
- zmiana średniego ciśnienia indykowanego (zmienna $p_i/cykl$) wyniosła około 0,12 MPa/cykl dla początku okresu akceleracji trwającego 3 cykle,
- zmiana wartości 90% wywiązania ciepła (zmienna $MBF90%/cykl$) miała miejsce dla łącznej wartości około 20 stopni w ciągu 3 cykli.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania udowodniły przydatność analizy procesów termodynamicznych z cyklu na cykl silnika spalinowego w stanach nieustalonych jako właściwą metodę analizy

wartości przebiegów szybkozmiennych. Poprawne przeprowadzenie analizy wskaźników operacyjnych pracy silnika w warunkach nieustalonych w dużym stopniu prawidłowo charakteryzuje zmienne stany pracy silnika spalinowego. Ocena zmiennych warunków pracy została scharakteryzowana przez:

- zmianę wskaźników termodynamicznych:
 - maksymalnego ciśnienia w cylindrze,
 - średniego ciśnienia indykowanego,
 - kąta wywiązania ciepła dla ustalonego spalonego udziału masowego paliwa,
 - prędkości obrotowej silnika z cyklu na cykl.
- zmiana ciśnienia indykowanego o wartość do 0,12 MPa/cykl wskazuje na dużą zmienność cykli pracy podczas gwałtownego przyspieszania. Potwierdzeniem tego są duże wartości zmiany kąta 90% wypalenia udziału masowego paliwa,
- zmiana prędkości obrotowej o 200 (obr/min)/cykl świadczy o szybkim procesie akceleracji przyczyniającym się do krótkiego czasu przyspieszania.

BIBLIOGRAFIA

1. Longwic R.: Analiza procesu ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach nieustalonych, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.
2. Pielecha I., Czajka J., Borowski P., Wisłocki K.: Thermodynamic indexes of Atkinson cycle combustion engine operation under transient conditions. Combustion Engines. 2013, 154(3), 517-524. ISSN 0138-0346..
3. Smak A., Szalek A.: TP01 – Starszy Mechanik Toyoty – Silnik, Materiały szkoleniowe, Warszawa, Akademia Toyoty i Lexusa „Toyota Motor Poland Company Limited”, 2013.
4. Wituszyński K.: Prędkość kątowna i moment obrotowy jako nośniki informacji o stanie silnika spalinowego: studium teoretyczno-eksperymentalne, LTN, Lublin, 1996.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ENGINE OPERATION FROM CYCLE-TO-CYCLE WITH ATKINSON CYCLE

Abstract

This paper presents an analysis of indicators from cycle to cycle in spark ignition engine operating in the Atkinson cycle. Operating characteristics from cycle to cycle is described by a coefficient of variation (CoV) mean indicated pressure and the heat release parameters. These parameters allow the operating characteristics of the engine, is one of the main directions of research.

Autorzy:

dr hab. inż. **Ireneusz Pielecha** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Ireneusz.Pielecha@put.poznan.pl

mgr inż. **Wojciech Cieślak** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Wojciech.Cieslik@doctorate.put.poznan.pl

mgr inż. **Przemysław Borowski** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Przemyslaw.T.Borowski@doctorate.put.poznan.pl