

Pomiar jonizacji w komorze spalania silnika samochodowego jako nowoczesna metoda nadzorowania procesu spalania

TOMASZ KAMIŃSKI, MIROSŁAW WENDEKER,
KRZYSZTOF WITUSZYŃSKI

Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Silników Spalinowych
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Niniejszy referat porusza sposoby pozyskiwania informacji o przebiegu procesu roboczego zachodzącego w komorze spalania poprzez pomiar jonizacji. Pokróćce omówione zostały przyczyny oraz bardziej zaawansowanej kontroli procesu spalania oraz główne wady i zalety zastosowania do tego celu czujnika jonizacji w porównaniu do montowanej seryjnie w samochodach sondy lambda. Zaprezentowana została również idea działania układu pomiarowego, a także przykładowe wyniki pomiarów jonizacji w dwóch silnikach.

1. Wprowadzenie

Współczesne, samochodowe silniki spalinowe sterowane są przy użyciu elektronicznego sterownika. Istnieje wiele przyczyn, które wymusiły na producentach samochodów zastosowanie komputerowego systemu sterowania procesem spalania [1]. Dwie najważniejsze z nich to konieczność spełnienia coraz bardziej wymagających norm ekologicznych oraz poprawa ekonomiki jazdy samochodu, czyli minimalizacja zużycia paliwa. Ważnymi celami sterowania procesem spalania w silniku samochodowym są:

- maksymalizacja jego osiągnięć, czyli uzyskanie jak największej mocy i momentu obrotowego oraz jak najkorzystniejszych ich charakterystyk,
- poprawienie równomierności pracy silnika,
- minimalizacja emitowanego hałasu,
- podwyższenie trwałości.

Celem efektywnego, działania sterownika silnika musi posiadać zestaw niezbędnych informacji. Obecnie kontrolowanych jest coraz więcej parametrów związanych z pracą silnika samochodowego. Najważniejsze z nich to:

- prędkość obrotowa wału korbowego oraz jego położenie,
- położenie przepustnicy lub pedału przyśpiesznika,

- obciążenie silnika (ciśnienie w kanale dolotowym lub moment obrotowy silnika),
- temperatura zasysanego powietrza,
- masa zasysanego powietrza (mierzona przepływomierzem),
- dane dotyczące gazów wylotowych, otrzymywane z sondy λ ,
- temperatura cieczy chłodzącej,
- napięcie w instalacji elektrycznej,
- przełożenie skrzyni przekładniowej, na którym aktualnie odbywa się jazda (także w przypadku skrzyni automatycznej),
 - prędkość jazdy samochodu.

Bez informacji tych sterownik nie byłby w stanie racjonalnie sterować procesami roboczymi zachodzącymi w silniku. Należy pamiętać, że dokładniejsze sterowanie wiąże się z minimalizacją zużycia paliwa a zatem ograniczeniem emisji produktów spalania oraz poprawą sprawności ogólnej silnika.

Na podstawie informacji podstawowej, jaką jest dla sterownika zawartość tlenu w spalinach (według której szacowana jest wartość współczynnika nadmiaru powietrza — λ), dobiera on dokładnie ilość wtryskiwanego paliwa oraz kąt wyprzedzenia zapłonu [3]. Jest to konieczne ze względu na utrzymanie pożądanego składu mieszanki, poprawną pracę i żywotność katalizatora. Utrzymanie niskiej emisji szkodliwych składników spalin, zwłaszcza w przypadku silników o zapłonie iskrowym z zewnętrznym tworzeniem mieszanki (silniki SPI i MPI) bez pomocy katalizatora nie jest praktycznie możliwe, zatem sterowanie składem spalanej mieszanki jest podstawowym zadaniem sterownika. W silnikach GDI obowiązują nieco inne reguły.

Ważnymi informacjami są prędkość obrotowa i obciążenie silnika, bowiem od nich zależy kąt wyprzedzenia zapłonu. Musi on być zwiększany wraz z prędkością obrotową silnika i zmniejszany ze wzrostem obciążenia. Inne mierzone parametry stosowane są jako zmienne korekcyjne do ustalania dawki paliwa i kąta wyprzedzenia zapłonu.

2. Sposoby uzyskiwania informacji o procesie spalania

Powszechnie stosowaną metodą uzyskiwania informacji o zawartości tlenu w spalinach jest zastosowanie sondy lambda. Jest to czujnik umieszczony w układzie wylotowym silnika w niedużej odległości od silnika. Ma on kilka istotnych wad. Jego wskazania mogą być wykorzystywane dopiero po uzyskaniu przez niego odpowiedniej temperatury a umieszczenie go w układzie wylotowym silnika w pewnej odległości od silnika, powoduje wprowadzenie opóźnień w sterowaniu.

Szczególnie korzystnym rozwiązaniem, jest uzyskiwanie informacji na temat przebiegu procesu spalania w czasie rzeczywistym (bez opóźnień).

Istnieją trzy podstawowe możliwości pozyskiwania tego typu danych:

- **pomiar ciśnienia w komorze spalania**,
- **metody optoelektroniczne** (pomiar natężenia światła emitowanego przez spalaną w cylindrze silnika mieszankę),
- **pomiar jonizacji w komorze spalania** (pomiar stopnia jonizacji spalanej mieszanki).

Znajomość przebiegu ciśnienia pozwala na detekcję wypadania zapłonów. Na rysunku 1 pokazane są przebiegi ciśnienia w cyklu z zapłonem i bez zapłonu. Znacznie mniejsza wartość ciśnienia maksymalnego w cylindrze jest łatwa do wykrycia i świadczy o braku procesu spalania.

Brak zapłonu mieszanki jest bardzo cenną informacją dla sterownika silnika, może bowiem świadczyć o tym, że trzeba zmienić skład spalanej mieszanki paliwowo – powietrznej tak, aby znajdowała się ona w zakresie palności (stosunek masy powietrza do paliwa ok. 0,75 do 1,25). Nie spalona mieszanka („wypadnięcie” zapłonu) przedostaje się do układu wylotowego, obniżając żywotność katalizatora i zanieczyszczając środowisko.

Istnieje również możliwość oceny niepowtarzalności kolejnych cykli pracy, do czego służą współczynniki niepowtarzalności średniego ciśnienia indykowanego oraz ciśnienia maksymalnego [4]. Zjawisko to występuje szczególnie przy spalaniu mieszank ubogich.

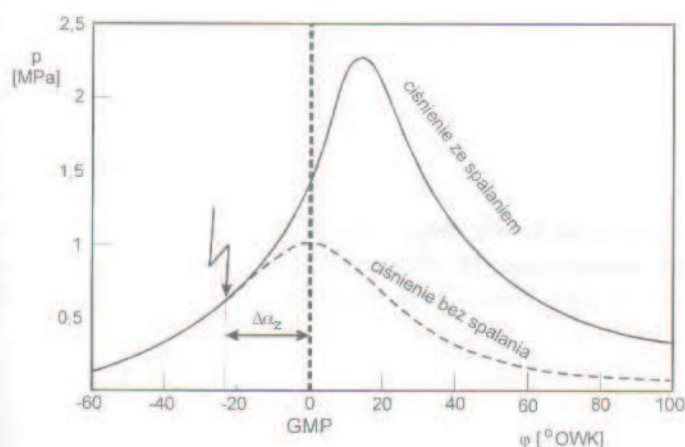


Fig. 1. Przebieg ciśnienia wewnątrz cylindra w cyklu sprężania (bez zapłonu) i cyklu spalania (z zapłonem).
Fig. 1. In cylinder pressure (with ignition and without ignition).

Kąt do dyspozycji przebieg ciśnienia można także sterować kątem wyprzedzenia zapłonu. Przyjmuje się, że utrzymanie maksimum ciśnienia ok. 16° obrotu wału korbowego po ZG pozwala na uzyskanie największego momentu obrotowego, czyli najmniejsza zużycie paliwa co oczywiście przekłada się na zmniejszenie ogólnej ilości składników spalin zanieczyszczających środowisko.

Oprócz kontroli pracy silnika na podstawie znajomości ciśnienia spalania istnieje wiele metod optycznego badania składu mieszanki spalanej w cylindrze, jak również badania jej właściwości chemicznych. Na uwagę zasługują metody optoelektroniczne, polegające na rejestracji emisji świetlnej z komory spalania i przetwarzaniu wielkości optycznych na elektryczne, w celu umożliwienia ich dalszej obróbki jak też gromadzenia danych. Czujniki i metody wykorzystujące elementy światłowodowe stanowią jeden z aktualnych kierunków rozwoju systemów sterowania silnikami samochodowymi.

Jednym z nich jest pomiar promieniowania widzialnego, emitowanego w trakcie spalania paliwa, jako bezpośrednia metoda pozwalająca na scharakteryzowanie procesu roboczego silnika. Informacje pozyskiwane w ten sposób, podobnie jak w przypadku pomiaru ciśnienia spalania, pozwalają na ograniczenie toksycznych składników spalin poprzez dokładniejszą i szybszą (mniejszy czas reakcji układu sterowania na zmianę warunków jazdy) regulację procesu roboczego silnika. Pojawia się także dodatkowa możliwość oceny procesu spalania jaką jest oszacowanie temperatury w cylindrze jako czynnika powodującego w głównej mierze wytwarzanie NO_x .

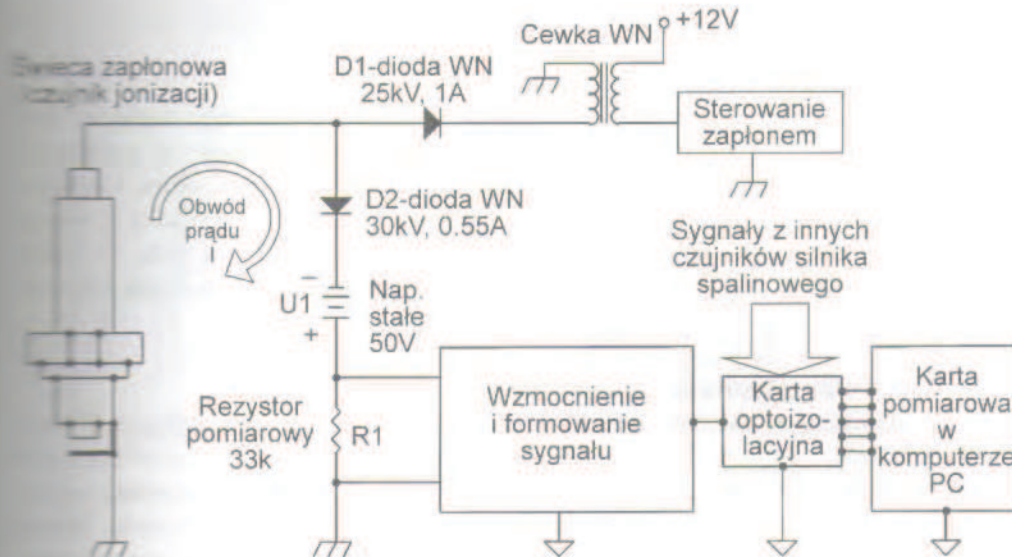
Najnowszym sposobem pozyskiwania informacji o procesach zachodzących w silniku podczas spalania jest pomiar prądu jonizacji gazu roboczego w cylindrze. Pomiar prądu jonizacji zdobywa coraz większą popularność ze względu na duże możliwości związane ze sterowaniem i diagnozowaniem przebiegu procesu spalania. Odpowiednia analiza sygnału jonizacji pozwala na uzyskanie dużej ilości informacji dotyczących przebiegu procesu roboczego, takich jak skład mieszaniny palnej, występowanie wypadania zapłonów, szybkość procesu spalania, występowanie spalania stukowego. Na podstawie danych dotyczących jonizacji nie można jednak oceniać zawartości w spalanej mieszance jej poszczególnych składników (NO_x , CO, CO_2 , HC), tak jak ma to miejsce w przypadku optoelektroniki. Możliwa jest jednak ocena współczynnika nadmiaru powietrza, co jest wystarczające do poprawnej regulacji procesu spalania a zatem minimalizacji emisji szkodliwych składników spalin do atmosfery. Dużym atutem pomiaru jonizacji jest relatywnie niski koszt i prosta budowa układu pomiarowego oraz możliwość kontroli spalania we wszystkich cylindrach bez znaczącego podniesienia kosztów takiego rozwiązania. W Politechnice Lubelskiej prowadzone są aktualnie badania jonizacji w cylindrze silnika zainicjowane przez prof. PL dra hab. inż. Mirosława Wendekera z Katedry Silników Spalinowych.

3. Idea działania układu pomiarowego

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2. Pomiar prądu jonizacji wymaga niewielkich zmian wysokonapięciowej części układu zapłonowego.

Obwód prądowy pomiaru jonizacji (oznaczony obrotową strzałką) składa się ze źródła napięcia stałego ($U_1 = 50\text{V}$), elementu pomiarowego (rezystora R1), diody WN (D2) oraz świecy zapłonowej. Prąd płynący przez element pomiarowy (R1) powoduje powstanie na nim spadku napięcia, który jest wejściowym sygnałem układu wzmacniająco-formującego zbudowanego w oparciu o wzmacniacz operacyjny. Sygnał jest wzmacniany 1000-krotnie i formowany w celu uzyskania określonej amplitudy tak, aby mógł zostać przesłany i poprawnie odczytany przez kartę pomiarową.

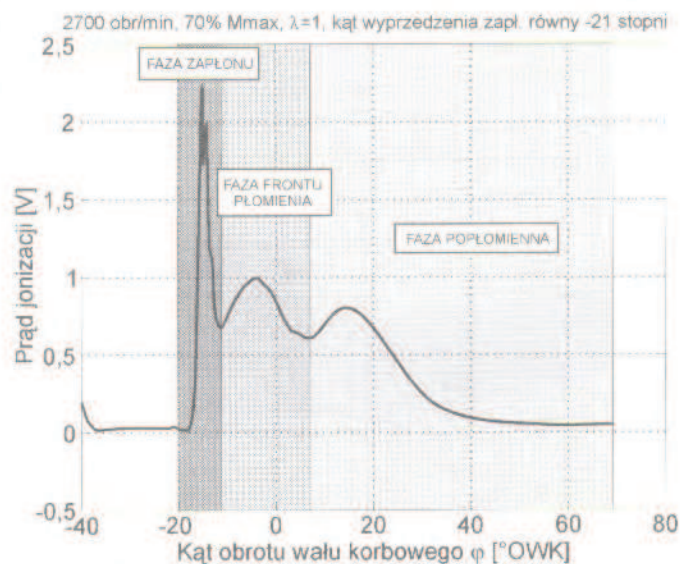
Spadek napięcia na rezystorze R1 jest proporcjonalny do wartości prądu jonizacji. W celu dokonania pomiaru, do elektrod świecy zapłonowej należy przyłożyć napięcie. Wartość prądu płynącego w obwodzie zależy od stopnia jonizacji gazów podczas spalania, zaś liczba jonów jest proporcjonalna do ilości spalonych węglowodorów.



Rys. 2. Schemat ideowy układu do pomiaru prądu jonizacji gazu roboczego w komorze spalania silnika.
Fig. 2. Work idea of ionization measurement memodule.

4. Typowy przebieg sygnału jonizacji

Przykładowy przebieg sygnału jonizacji w komorze spalania silnika obrazuje rys. 3 [2].



Rys. 3. Typowy przebieg sygnału czujnika jonizacji.
Fig. 3. Classical course of ionization signal.

Przebieg sygnału jonizacji można podzielić na trzy fazy:

- **Faza zapłonu**

rozpoczyna się tuż po przyłożeniu do elektrod świecy wysokiego napięcia. Jony zaczynają poruszać się w coraz silniejszym polu elektrycznym, zderzając się gwałtownie z innymi cząsteczkami. Powoduje to szybkie powiększanie się liczby jonów i wolnych elektronów (tzw. jonizacja lawinowa). Długość tej fazy (jak widać na rysunku 3) wynosi ok. 10° obrotu wału korbowego. Pod koniec tej fazy jonizacja jest tak duża, że maleje impedancja pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej, a tym samym wzrasta natężenie przepływu prądu.

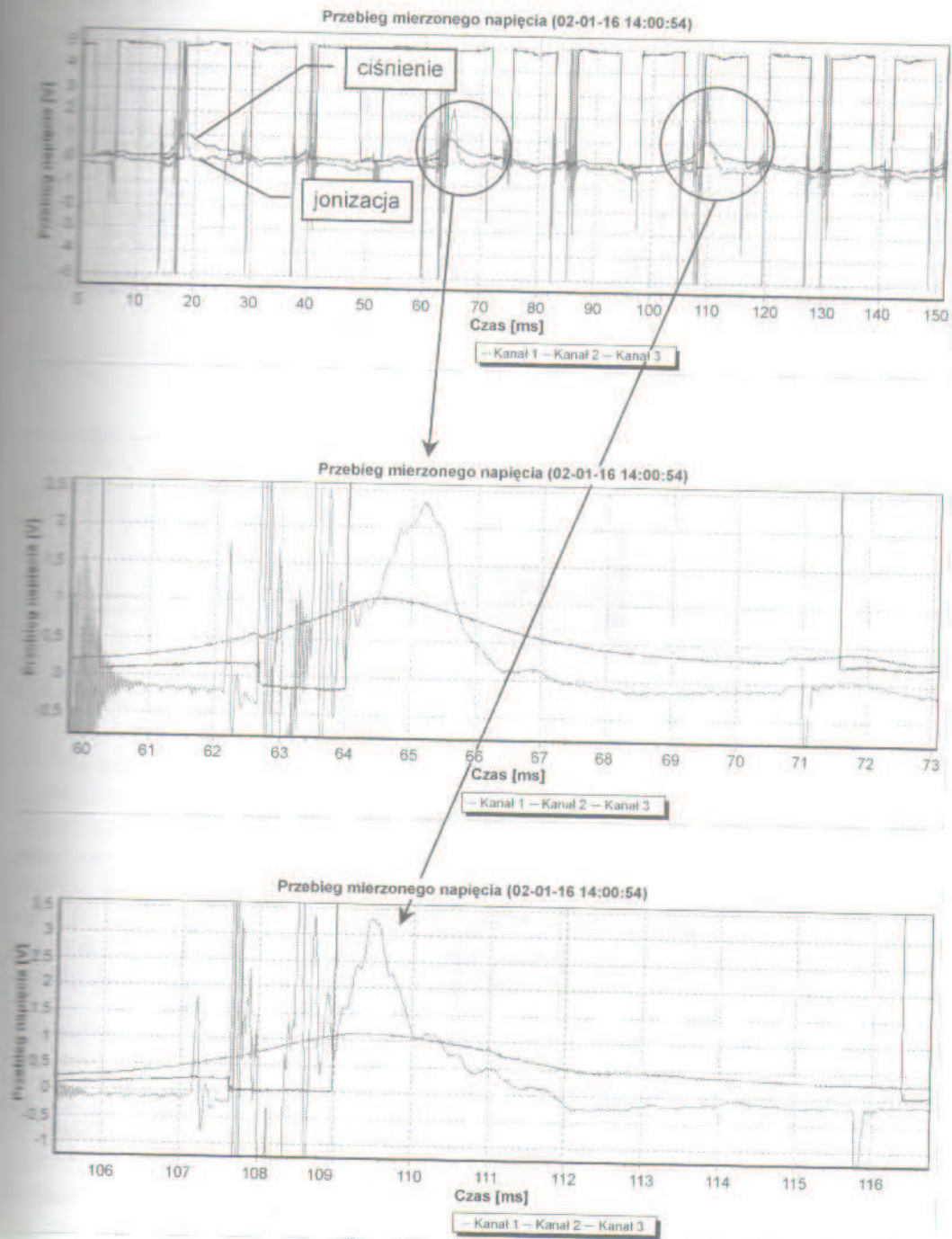
- **Faza frontu płomienia**

trwa zazwyczaj w zakresie $10^\circ+20^\circ$ obrotu wału korbowego po zapłonie. W fazie tej prąd jonizacji jest zależny głównie od reakcji chemicznych spalania mieszanki paliwowo-powietrznej zachodzących we froncie płomienia. Zatem jej przebieg najbardziej zależy od warunków spalania a w szczególności od składu mieszanki. Można przyjąć, że im uboższa mieszanka, tym wolniejsze tempo przyrostu jonów w płomieniu.

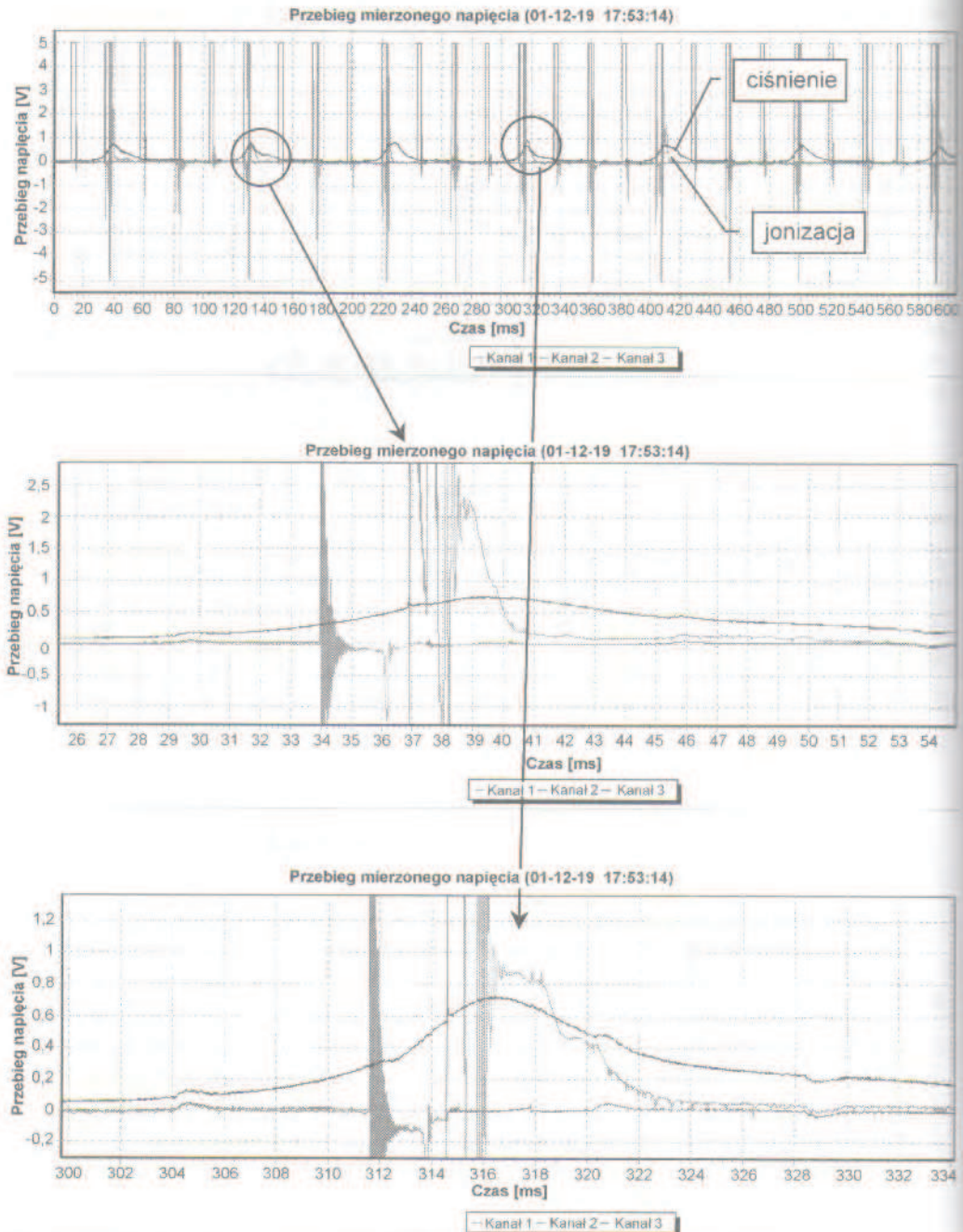
- **Faza popłomienna**

rozpoczyna się zwykle ok. 20 stopni OWK od zapłonu mieszanki. O ile w fazie frontu płomienia następuje chwilowy wzrost jonizacji uwarunkowany temperaturą, to w fazie popłomiennej występuje bardzo wyraźna korelacja z wartością ciśnienia. Następnie stopień jonizacji spada aż do całkowitego zaniku.

5. Wyniki badań doświadczalnych Silnik HOLDEN 2.0



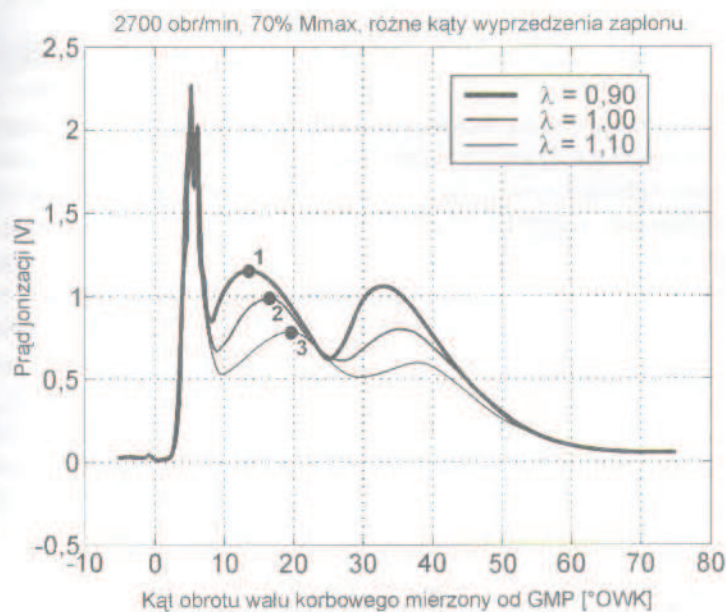
Silnik POLONEZ 1500



Rys. 4. Wyniki pomiarów jonizacji z wykorzystaniem silników Holden 2.0 i Polonez 1500.
 Fig. 4. Ionization signal obtain from Holden 2.0 and Polonez 1500 engines.

6. Przykładowe zastosowanie znajomości przebiegu sygnału jonizacji

Znajomość przebiegu jonizacji wykorzystać można na przykład do oceny współczynnika nadmiaru powietrza. Rysunek 5 obrazuje zmiany zachodzące w przebiegu procesu jonizacji w zależności od składu mieszaniny paliwowo-powietrznej.



Rys. 5. Zależność przebiegu sygnału jonizacji od współczynnika λ .
Fig. 5. Dependence course of ionization signal and course coefficient λ .

Na wykresie zaobserwować można zmianę położenia lokalnego maksimum wykresu sygnału jonizacji w zakresie fazy rozwoju płomienia. Wartość maksimum ulega zmniejszeniu, jak również samo maksimum przesuwa się o ok. 7° OWK w kierunku fazy popłomiennej. Skutkuje to przedłużeniem trwania fazy rozwoju płomienia. Odpowiednia obróbka danych dotyczących przebiegu jonizacji pozwala na bardzo dokładne ustalenie współczynnika nadmiaru powietrza natychmiast po zakończeniu cyklu spalania. Zastosowanie do tego celu sztucznych sieci neuronowych pozwala na oszacowanie współczynnika λ z dokładnością nawet do $\pm 1,2\%$.

7. Wnioski

Intensywny rozwój przemysłu motoryzacyjnego niesie ze sobą oprócz pozytywnych również skutki negatywne. Przemysł samochodowy oddziałuje intensywnie na środowisko naturalne powodując jego degradację, począwszy od fazy produkcyjnej, a skończywszy na wycofaniu pojazdu z eksploatacji. Coraz ostrzejsze normy ekologiczne stawiają

przed konstruktorami nowe wyzwania. Aby im sprostać muszą oni sięgać po coraz bardziej zaawansowane technologicznie i złożone rozwiązania techniczne. Powszechnie stosowane jest komputerowe sterowanie procesem spalania. Do poprawnego działania elektronicznego sterownika wymagany jest jednak zestaw niezbędnych informacji, na podstawie których potrafi on tak dobrać parametry pracy silnika, ażeby produkty zachodzącego w nim spalania spełniały normy dotyczące emisji toksycznych składników spalin.

Zastosowanie pomiaru jonizacji, jako podstawowego nośnika informacji o spalaniu, jest bardzo obiecujące. Pozwala ono na wykrywanie wypadania zapłonów (nie spalone węglowodory przedostają się do atmosfery), ocenę składu spalanej mieszanki w czasie rzeczywistym (bez opóźnień) co zmniejsza bezwładność procesu sterowania silnikiem. Zmniejszenie bezwładności powoduje, że skład spalanej mieszanki jest bardziej zbliżony do stechiometrycznego, co jest kolejnym krokiem umożliwiającym zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska. Pomiar przebiegu stopnia jonizacji pozwala na ocenę przebiegu ciśnienia, utrzymanie wspomnianego maksimum ciśnienia spalania ok. 16° po ZG, czyli maksymalizację momentu obrotowego, zatem minimalizację zużycia paliwa, poprawę efektywności katalizy spalin i związane z tym zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska.

Zastosowanie pomiaru jonizacji jest obecnie intensywnie badane w laboratoriach wielu firm samochodowych. Ze względu na liczne zalety ten rodzaj kontroli procesu spalania może być wkrótce zastosowany w seryjnie produkowanych samochodach.

Literatura

- [1] WENDEKER M.: *Sterowanie zapłonem w silniku samochodowym*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe 2000.
- [2] WENDEKER M.: *Adaptacyjne sterowanie wtryskiem benzyny w silniku samochodowym*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
- [3] KOWALEWICZ A.: *Wybrane zagadnienia samochodowych silników spalinowych*, Radom 1996, Wyd.1.
- [4] KOWALEWICZ A., RÓŻYCKI A.: *Cycle-to-Cycle variations of carburettor engine fuelled with lean mixture*. *Archive Combustions*, vol. **17**, 1-4, 1997.

Ionization measurement in a combustion chamber of a car engine as a modern method in the combustion process supervision

Summary

This paper describes problem of receiving information of combustion process by using ionization measurement in a combustion chamber. This report discusses also reason of advanced control working process in car engines and also advantage and disadvantage of use ionization sensor with comparison to lambda sensor.

It is also showed the operation idea of measurement system and an example of measurement results obtained from two car engines.