

THE CHARACTERISTIC OF IONIZATION SIGNAL IN CYLINDER OF COMBUSTION ENGINE THE SI

Przemysław Filipek

Lublin University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering
Nadbystrzycka Street 36, 20-614 Lublin, Poland
tel.: +48 81 5381499
e-mail: p.filipek@pollub.pl

Tomasz Kamiński

Motor Transport Institute
Jagiellońska Street 80, 03-301 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 8113231 ext. 129, fax: +48 22 8110906
e-mail: tomasz.kaminski@its.waw.pl, tk42@o2.pl

Abstract

During work, in cylinder of combustion engine the sparkle ignition get chemical and thermal processes. They initiate the production the ionized gas in combustion chamber. Ion sensing is one of the cheapest and most simple methods for monitoring the combustion event in a spark ignited engine.

The characteristic of ionization signal in cylinder of engine the SI contains many helpful information in controlling the work of engine. This contributes to reducing emission of fumes and lengthen the viability of catalyst.

For spark ignited engines the spark plug is used as sensor together with some measurement electronics added to the ignition system. It is a relatively cheap method for combustion monitoring and other sensors can be replaced. The use of ion sensing in modern EMS is restricted to knock and misfire detection but engine developers start to see a need for other combustion information, such as air-fuel ratio, torque, combustion stability and location of peak pressure.

The ionization current has a characteristic shape. One proposal divides the ion current in three parts, the ignition phase, the flame front phase and the post-flame phase. Despite the considerable uncertainty the ionization signal, characterizes very short time of reaction on change of parameters combustion in relation to traditional lambda probe.

Keywords: combustion engines, ionization current, fuel injection, spark plug, combustion processes

CHARAKTERYSTYKA SYGNAŁU JONIZACJI W CYLINDRZE SILNIKA SPALINOWEGO ZI

Streszczenie

Podczas pracy w cylindrze silnika spalinowego o zapłonie iskrowym zachodzą zarówno procesy chemiczne, jak i termiczne. Inicjują one wytwarzanie zjonizowanego gazu w komorze spalania. Pomiar jonizacji jest jednym z najprostszych i najtańszych metod monitorowania procesów zachodzących w silnikach o zapłonie iskrowym.

Przebieg charakterystyki sygnału jonizacji w cylindrze silnika ZI zawiera wiele informacji pomocnych w sterowaniu pracą silnika. Przyczynia się to między innymi do zmniejszania ilości emisji spalin oraz wydłużania żywotności katalizatora.

Dla silników ZI czujnikiem jonizacji jest świeca zapłonowa wraz z dodanym do systemu zapłonowego układem rejestrującym. Jest to stosunkowo tania metoda mogąca zastąpić inne czujniki. Użycie metody wykrywania jonów w nowoczesnych systemach EMS ogranicza wykrywanie braku zapłonu i spalania stukowego, ale producenci samochodów zwracają uwagę na inne informacje o spalaniu takie jak λ , moment obrotowy, stabilność spalania i lokalizacja szczytowej wartości ciśnienia w cylindrze.

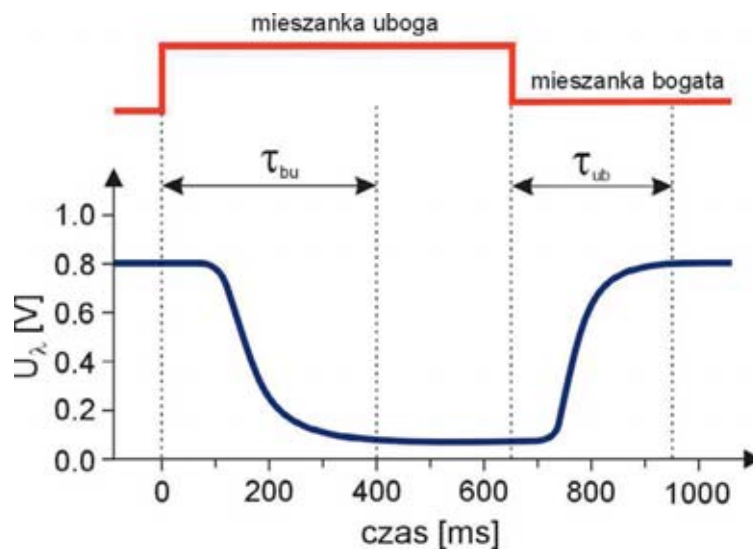
Prąd jonizacji ma charakterystyczną krzywą. Jedną z propozycji dzieli prąd na trzy części, fazę zapłonu, fazę frontu płomienia i fazę popłomienną. Sygnał jonizacji mimo znacznej niepewności, charakteryzuje się bardzo krótkim czasem reakcji na zmianę parametrów spalania w stosunku do tradycyjnej sondy lambda.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, prąd jonizacji, wtrysk benzyny, świeca zapłonowa, procesy spalania

1. Wstęp

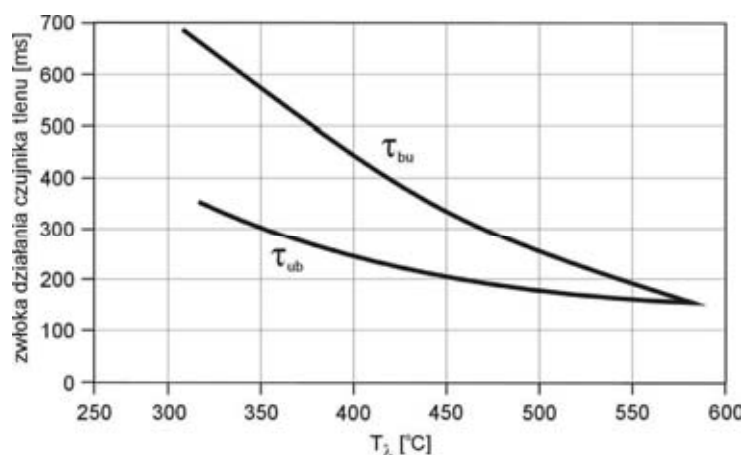
Współczesne pojazdy wyposażone są w zamontowany w układzie wydechowym czujnik tlenu w spalinach, który szacuje skład spalin na podstawie stężenia tlenu. Sygnał pomiarowy z czujnika tlenu charakteryzuje się dużym opóźnieniem czasowym w stosunku do sygnału wtrysku paliwa. Opóźnienie to może osiągać wartości nawet kilkudziesięciu kolejnych wtrysków benzyny. W przypadku niewłaściwej wartości dawki wtrysku benzyny (wskutek oddziaływania niemierzalnych zakłóceń, obecności błędów modelowania w sterowniku lub permanentnych zmian charakterystyki silnika) informacja korygująca wystąpi z dużym przesunięciem czasowym. Utrzymujący się stan niewłaściwych wartości stężenia tlenu w spalinach spowoduje zmniejszenie sprawności katalizy toksycznych składników spalin i pogorszenie ekologicznych właściwości pojazdu.

Wielkość czasu opóźnienia czujnika tlenu, pomiędzy zmianą składu mieszanki po wtrysku benzyny a reakcją czujnika na ten fakt, zależna jest od kierunku zmiany mieszanki z bogatej na ubogą (lub odwrotnie) oraz od temperatury czujnika, co przedstawiają Rys. 1-2 [2].



Rys. 1. Odpowiedź czujnika tlenu na zmianę składu mieszanki [3]

Fig. 1. The answer of oxygen sensor on change of mixture composition [3]



Rys. 2. Zależność opóźnienia działania czujnika tlenu od jego temperatury [3]

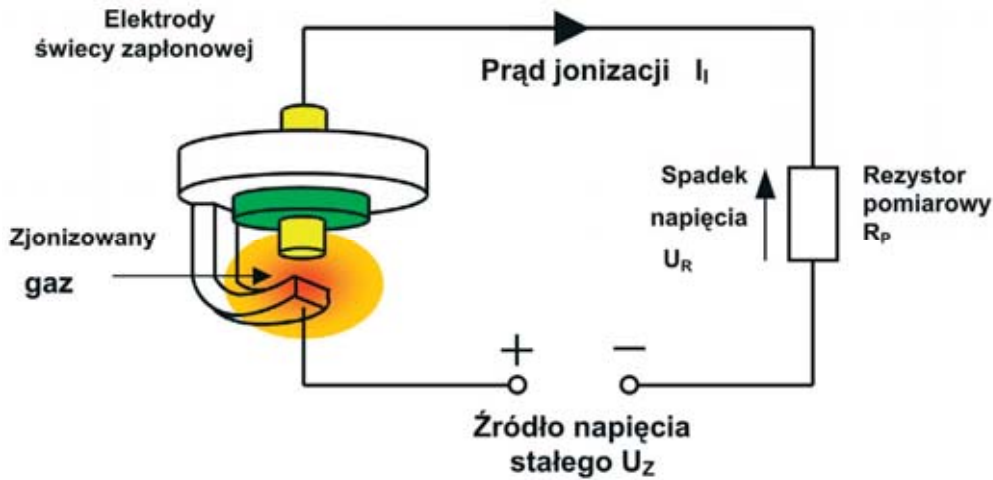
Fig. 2. Dependence delay of the oxygen sensor of his temperature [3]

W warunkach biegu jałowego opóźnienie reakcji czujnika tlenu przekracza jedną sekundę, co oznacza przesunięcie czasowe pomiędzy wtryskiem benzyny a reakcją czujnika tlenu w silniku czterocylindrowym na poziomie około 30 kolejnych wtrysków silnikowych. Opóźnienie reakcji czujnika tlenu zmniejsza się w przypadku większej prędkości obrotowej.

Pragnąc zmniejszyć błąd regulacji składu mieszanki paliwowo-powietrznej należy dokonywać wcześniejszej i dokładniejszej oceny współczynnika nadmiaru powietrza. Jedną z metod określających skład mieszanki z mniejszym opóźnieniem czasowym jest metoda pomiaru stopnia jonizacji gazu roboczego w cylindrze. W literaturze przedmiotu potwierdzone są istotne zależności sygnału jonizacji od składu mieszanki. Dużą wadą pośredniego pomiaru składu mieszanki na podstawie przebiegu jonizacji w cylindrze jest duży rozrzut takiego sygnału oraz jego lokalny charakter w sensie umieszczenia czujnika, jakim jest świeca zapłonowa, w komorze spalania.

2. Zasada działania układu pomiaru prądu jonizacji w komorze spalania silnika o ZI

Idea pomiaru prądu jonizacji w komorze spalania silnika spalinowego o ZI przy wykorzystaniu świecy zapłonowej jako czujnika, polega na utworzeniu obwodu prądowego z wymuszeniem w postaci źródła napięcia stałego (Rys. 3.).



Rys. 3. Obwód pomiaru prądu jonizacji w komorze spalania silnika ZI [2]
 Fig. 3. The circuit of measurement of ionization current in a combustion chamber of SI engine [2]

Obwód składa się z elektrod świecy zapłonowej (pomiędzy którymi znajduje się zjonizowany gaz), źródła napięcia stałego U_Z (które wymusza przepływ prądu I_I w obwodzie) oraz rezystora pomiarowego R_P . Prąd przepływa od (+) źródła zasilania U_Z , poprzez elektrody świecy zapłonowej i zjonizowany gaz (zgodnie z zaznaczonym kierunkiem na rysunku), przez rezystor pomiarowy R_P (na którym odkłada się spadek napięcia U_R rejestrowany później kartą pomiarową) do (-) źródła zasilania. Zgodnie z prawem Ohma napięcie U_R odkładające się na rezystorze pomiarowym R_P (o stałej wartości rezystancji) jest proporcjonalne do płynącego w obwodzie prądu jonizacji I_I .

$$U_R = I_I R_P, \quad (1)$$

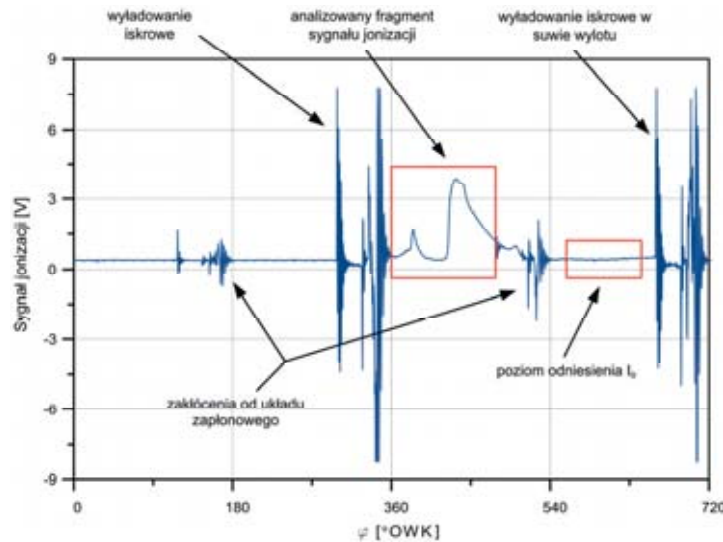
Mierząc spadek napięcia na rezystorze pomiarowym R_P otrzymujemy sygnał wprost proporcjonalny do natężenia prądu płynącego poprzez zjonizowany gaz, co jest również proporcjonalne do ilości jonów zjonizowanego gazu znajdującego się pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej, będącej czujnikiem jonizacji.

Na wyjściu obwodu pomiarowego stosuje się wzmacniacz napięciowy dopasowujący amplitudę sygnału do zakresu karty pomiarowej.

3. Charakterystyka prądu jonizacji

Poniższy rysunek przedstawia charakterystykę mierzonego prądu jonizacji w komorze spalania silnika spalinowego o ZI w czwartym cylindrze, w pojedynczym cyklu silnikowym.

Analizowany fragment sygnału jonizacji składa się z dwóch części („garbów”). Są to chemia i termojonizacja.



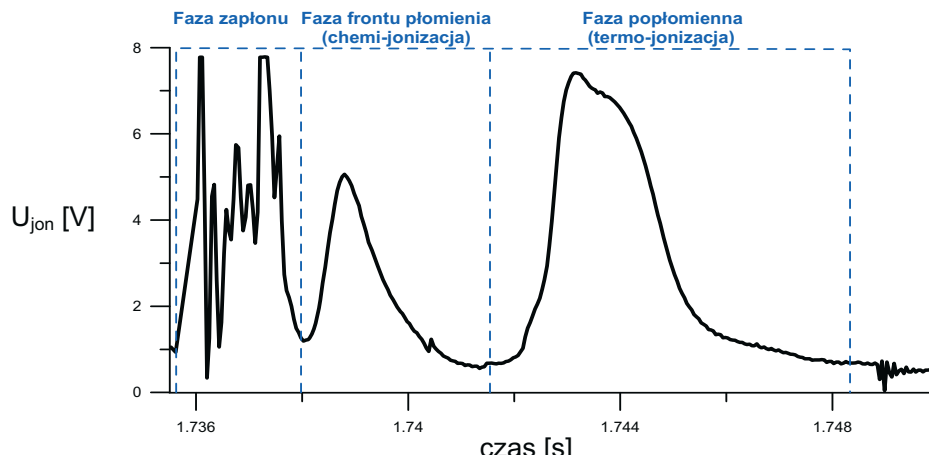
Rys. 4. Przebieg sygnału jonizacji w cylindrze nr 4 w pojedynczym cyklu silnikowym [2]
 Fig. 4. The characteristics of ion signal in the 4th engine cylinder in single cycle [2]

4. Zjawisko chemi i termojonizacji

Przebieg prądu jonizacji, według prac Ericssona [4, 5], można podzielić na trzy fazy (Rys. 5.):

- fazę zapłonu - trwa ona od początku wyładowania do momentu rozładowania cewki,
- fazę frontu płomienia - obejmuje ona okres rozwoju jądra płomienia do chwili opuszczenia frontu płomienia obszaru świecy zapłonowej. W fazie tej dominuje chemijonizacja,
- fazę popłomienną - obejmuje ona pozostały okres spalania wewnątrz cylindra, a rejestrowany sygnał pochodzi głównie z termojonizacji.

Faza zapłonu jest pomijana w analizie prądu jonizacji, gdyż na jej przebieg oprócz przebiegu tworzenia jądra płomienia mają wpływ zjawiska zachodzące w układzie zapłonowym.



Rys. 5. Przykładowy przebieg prądu jonizacji [2]
 Fig. 5. The example - course of ionization current [2]

4.1. Chemijonizacja

Z uzyskanych wyników pomiarów oraz rozważań teoretycznych na temat kinematyki chemicznej wynika, że najczęściej jonów w strefie reakcji węglowodorowych w płomieniu stanowią jony CHO^+ , utworzone podczas reakcji:



oraz idącej za nią reakcji rozbitcia CHO^+ na jon H_3O^+ zachodzącej poprzez reakcję transferu protonu:



Trzecim rodzajem jonów często zauważalnym w płomieniu węglowodorowym jest $C_3H_3^+$, który zostaje utworzony w wyniku reakcji [6]:



Te trzy reakcje razem z reakcją rekombinacji:



zostały przedstawione przez Reinmanna [7] w opisie modelu przepływu prądu w szczelinie świecy zapłonowej podczas wczesnej fazy spalania.

4.2. Termojonizacja

Do opisanie jonizacji termicznej w gazie można się oprzeć na reakcji cząstki A podczas jonizacji [8].



Początkowe tempo reakcji (stopień jonizacji) jest proporcjonalne do koncentracji cząstek [A], podczas gdy końcowe tempo (stopień rekombinacji) jest proporcjonalne do $[A^+][e]$. Zatem tempo reakcji cząstek, można zapisać jako:

$$\partial_t[A] = -k_i(T)[A], \quad (7)$$

$$\partial_t[A^+] = -k_r(T)[A^+][e], \quad (8)$$

gdzie $k_i(T)$ i $k_r(T)$ są stałymi szybkości reakcji zależnymi od temperatury. W przypadku równowagi, oba tempa reakcji są sobie równe:

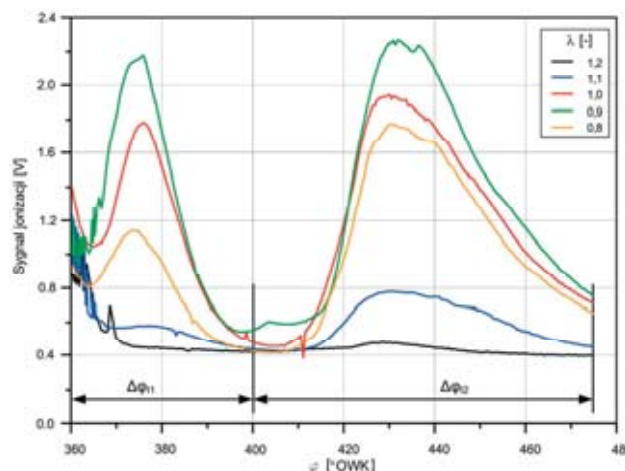
$$\partial_t[A] = \partial_t[A^+], \quad (9)$$

Stężenie równowagi cząstek opisuje zależność:

$$\frac{[A^+][e]}{[A]} = \frac{k_i(T)}{k_r(T)} = K(T), \quad (10)$$

Poziom równowagi $K(T)$ tej reakcji może być obliczony za pomocą równania Saha'sa opartego na lokalnej równowadze termicznej.

Poniższy rysunek przedstawia przykładowy pomiar prądu jonizacji w cylindrze dla różnych wartości współczynnika nadmiaru powietrza z zaznaczeniem przedziałów analizy sygnału dla chemii i termojonizacji [2].



Rys. 6. Sygnał jonizacji w jednym cylindrze dla różnych wartości współczynnika nadmiaru powietrza ($\Delta\phi_{11}$ - przedział analizy sygnału chemijonizacji, $\Delta\phi_{12}$ - przedział analizy sygnału termojonizacji) [2]

Fig. 6. Ionization signal for different excess-air factor (λ) in single cylinder ($\Delta\phi_{11}$ - chemionization, $\Delta\phi_{12}$ - thermal ionization) [2]

5. Parametry charakterystyczne sygnału jonizacji

W ramach prowadzonych przez autora badań [1, 2], jako parametry charakterystyczne służące do identyfikacji modelu sygnału jonizacji, przyjęto parametr będący średnią wartością sygnału chemijonizacji I_1 oraz parametr I_2 opisujący średnią wartość sygnału termojonizacji.

Każdy z opracowywanych poniżej modeli był następnie weryfikowany dziewięcioma metodami badania: istotności korelacji, wyrazistości modelu, istotności parametrów, symetrii składnika losowego, losowości składnika losowego, stacjonarności składnika losowego, wartości oczekiwanej składnika losowego, autokorelacji składnika losowego oraz normalności składnika losowego.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów opracowano liniowy, regresyjny model zależności [2]:

Dla:

$$I_1 = -5.999 \cdot \lambda + 6.835, \quad (11)$$

Uzyskując współczynnik korelacji aproksymacji wielomianem pierwszego stopnia wynoszący 0.9351.

Dla:

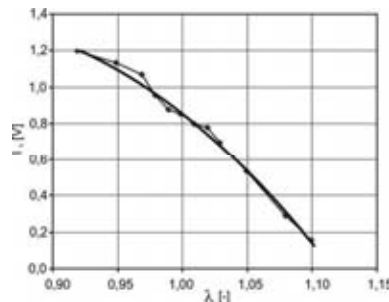
$$I_2 = -4.764 \cdot \lambda + 5.564. \quad (12)$$

Współczynnik korelacji aproksymacji wielomianem pierwszego stopnia wynosi 0.971.

Przeprowadzono następną aproksymację wyników badań i jako model przyjęto wielomian drugiego stopnia:

Dla:

$$I_1 = -15.96 \cdot \lambda^2 + 26.31 \cdot \lambda - 9.48, \quad (13)$$

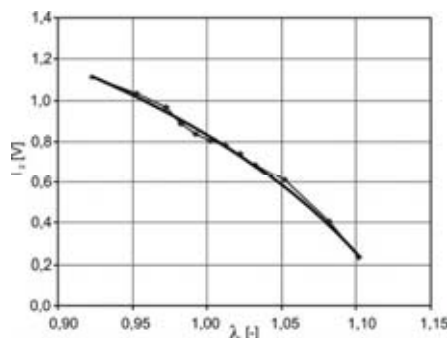


Rys. 7. Aproksymacja sygnału I_1 wielomianem drugiego stopnia [2]
 Fig. 7. The model of signal I_1 in function of excess-air factor [2]

uzyskując współczynnik korelacji aproksymacji wielomianem drugiego stopnia równy 0.9764.

Dla:

$$I_2 = -12.37 \cdot \lambda^2 + 20.29 \cdot \lambda - 7.09, \quad (14)$$



Rys. 8. Aproksymacja sygnału I_2 wielomianem drugiego stopnia [2]
 Fig. 8. The model of signal I_2 in function of excess-air factor [2]

uzyskano współczynnik korelacji 0.995.

Ponieważ największą korelację do współczynnika nadmiaru powietrza wykazał parametr I_2 aproksymowany wielomianem drugiego stopnia (opisujący średnią wartość sygnału termojonizacji), pozwoliło to autorowi na wykorzystanie parametru I_2 do dalszych prac nad analizą sygnału jonizacji i regulacji składu mieszanki.

Literatura

- [1] Filipek, P., *Badania jonizacji pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej silnika ZI w aspekcie obserwacji procesu spalania*, Raport końcowy z projektu badawczego KBN Nr PB-8T 12D 022-20, Politechnika Lubelska, Lublin 2001.
- [2] Filipek, P., *Sterowanie wtryskiem benzyny w silniku o zapłonie iskrowym z wykorzystaniem sygnału jonizacji w komorze spalania*, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2006.
- [3] Wendeker, M., *Sterowanie wtryskiem w silniku samochodowym*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 1999.
- [4] Eriksson, L., Nielsen, L., *Closed Loop Ignition Control by Ionization Current Interpretation*, SAE Technical Paper Nr 970854, 1997.
- [5] Eriksson, L., *Spark Advance for Optimal Efficiency*, SAE Technical Paper No. 1999-01-0548, 1999.
- [6] Fialkov, A., *Investigations on ions in flames*, Prog. Energy Combust. Sci., 23 (5-6): pp. 399-528, 1997.
- [7] Reinmann, R., Saitzko, A., Mauss, F., *Local air-fuel ratio measurements using the spark plug as an ionization sensor*, SAE Technical Paper No. 970856, 1997.
- [8] Martinsson, L., *Studies of Spark Plasmas. PhD thesis*, Lund Institute of Technology, Lund Reports on Atomic Physics, LRAP-66, 1986

