

## OPINION OF IONIZATION SIGNAL TO ESTIMATING COMPOSITION OF MIXTURE IN COMBUSTION PROCESS ABOUT ENGINE SI

**Przemysław Filipek, Mirosław Wendeker**

*Lublin University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-614 Lublin, Poland  
tel.: +48 81 5381499, fax.: +48 81 5381272  
e-mail: p.filipek@pollub.pl, m.wendeker@pollub.pl*

**Tomasz Kamiński, Izabella Mitraszewska, Gabriel Nowacki**

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

### **Abstract**

*Fuel economy drives the development of efficiency of the engine. This includes optimal ignition timing and fuel amount for a given operating condition. Emission reduction drives the development of air-fuel ratio control, misfire detection and purge control.*

*Oxygen sensors mounted in the exhaust pipe provide a possibility for closed loop air-fuel ratio control and piezoelectric knock sensors mounted on the engine block, for closed loop knock control, but the need for supervising the combustion process itself increases constantly.*

*The measurement of ionization signal in cylinder of engine about the sparkle ignition deliver many valuable information about course of combustion process and type of composition of fuel - air mixture. Currently the most using measurement method to composition of mixture is use a lambda probe. There defect is: the two states and large time answers delay, however the advantage - the unambiguity of opinion.*

*In reference to converter of density current in a combustion chamber It is possible to ascertain that the largest advantage is speed reaction on change of fuel injection and the largest defect - the dispersion the results of measurement.*

*The replacement in control system of fuel injection signal from sensor of oxygen in combustions ionization signal can lead to smaller mistake of constant time value regulation.*

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

## OCENA SYGNAŁU JONIZACJI DO SZACOWANIA SKŁADU MIESZANKI W PROCESIE SPALANIA SILNIKA O ZI

### **Streszczenie**

*Ograniczenie zużycia paliwa prowadzi do wzrostu sprawności silnika. Wiąże się to z optymalnym czasem zapłonu i dawką paliwa dla danych warunków pracy. Redukcja emisji prowadzi do lepszej kontroli nad stosunkiem paliwo-powietrze, wypadania zapłonów i cząstek.*

*Czujnik tlenu zamontowany na dolocie wprowadza możliwość regulacji stosunku powietrze-paliwo w zamkniętej pętli a piezoelektryczny czujnik stuku montowany na bloku silnika, do detekcji spalania stukowego w zamkniętej pętli. Pomimo tego, potrzeba stałej kontroli parametrów spalania ciągle wzrasta.*

*Pomiar sygnału jonizacji w cylindrze silnika o zapłonie iskrowym dostarcza wielu cennych informacji o przebiegu procesu spalania i składzie mieszanki paliwowo-powietrznej. Obecnie najczęściej stosowaną metodą pomiaru składu mieszanki jest użycie czujnika tlenu (sondy lambda). Jej wadami są: dwustanowość pomiaru oraz duże opóźnienie czasowe odpowiedzi, natomiast zaletą - jednoznaczność oceny.*

*W odniesieniu do przetwornika gęstości prądu w komorze spalania można stwierdzić, że jego największą zaletą jest szybkość reakcji na zmianę wtrysku benzyny a największą wadą - rozproszenie wyników pomiaru.*

*Zastąpienie w systemie sterowania wtryskiem benzyny sygnału z czujnika tlenu w spalinach sygnałem jonizacji może prowadzić do mniejszego błędu regulacji stałowartościowej.*

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

## 1. Wstęp

Współcześnie, w sterowaniu spalaniem silnika spalinowego o ZI dąży się do minimalizacji emisji spalin do atmosfery. Można to osiągnąć regulując wielkość dawki wtrysku paliwa do cylindra oraz określając precyzyjnie czas w którym nastąpi zapłon. Aby jednak sterować wtryskiem i zapłonem, potrzebna jest dokładna informacja o składzie i stężeniu spalin na wyjściu silnika [3].

Taką informację może dostarczyć np. analizator spalin, czujnik zawartości tlenu w spalinach (popularnie zwany sondą lambda) lub czujnik stopnia zjonizowania gazów w komorze spalania.

a) Analizator spalin jest urządzeniem dość drogim, ponadto posiada swoje gabaryty - więc bezpośrednia współpraca z silnikiem byłaby bardzo utrudniona przy masowej produkcji (stosuje się je w pracowniach badawczych i na stanowiskach hamownianych).

b) Sonda lambda klasycznie stosowana w masowej produkcji silników spalinowych pomimo dość dużej precyzji pomiaru, wprowadza duże opóźnienie pomiędzy rzeczywistym spalaniem a wysłaną wartością pomiaru. Jest to spowodowane przez dwa rodzaje opóźnień:

- opóźnienie wynikające z dostarczenia spalin od cylindra do układu wydechowego,
- opóźnienie wynikające z pracy samego czujnika.

Sumarycznie, opóźnienie to (zależąc również od wartości temperatury i sposobu zmiany składu mieszanki) osiąga wartości nawet przekraczające 1 sekundę (Rys. 1.) co oznacza przesunięcie czasowe pomiędzy wtryskiem benzyny a reakcją sondy lambda w silniku czterocylindrowym na poziomie ok. 30 kolejnych wtrysków silnikowych. Opóźnienie reakcji sondy lambda zmniejsza się w przypadku większej prędkości obrotowej.

c) Stopień zjonizowania gazów w komorze spalania określa układ pomiaru prądu jonizacji. W odniesieniu do sondy lambda, sygnał jonizacji charakteryzuje się praktycznie bezzwłocznym pomiarem lecz jednocześnie jest obarczony wysokim stopniem niepewności. Mimo to, (jak dowodzi wiele opracowań) pomiar gęstości jonów w komorze spalania pozwala na jednoznaczne określenie składu mieszanki oraz wykrywanie anomalii procesu spalania (takich jak spalanie stukowe czy brak spalania). Pomiar stopnia jonizacji gazów w cylindrze charakteryzuje się bardzo małym opóźnieniem czasowym reakcji na zmianę warunków spalania. Ponadto pomiar przeprowadzany jest w poszczególnych cylindrach, umożliwiając aplikację indywidualnego sterowania dla każdego z nich. Wadami sygnału jonizacji jest jednak duże rozproszenie wyników pomiaru oraz lokalny charakter pomiaru. Jednocześnie model sygnału jest zależny nie tylko od składu mieszanki paliwowo-powietrznej ale także od prędkości obrotowej, obciążenia, wilgotności powietrza, energii iskry czy też składu paliwa.

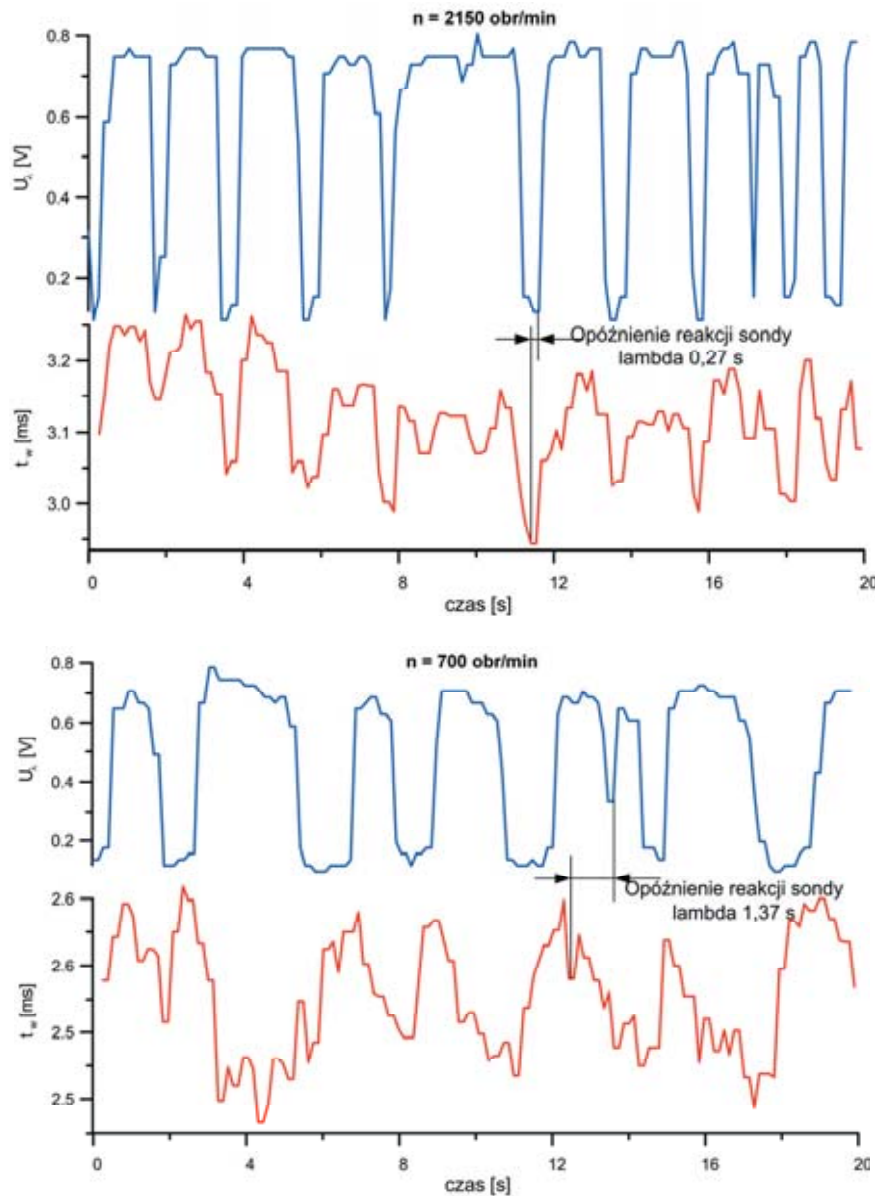
Spalanie w silniku ZI inicjowane jest poprzez wyładowanie na świecy zapłonowej. Płomień rozchodzi się od świecy w kierunku ścianek cylindra spalając mieszaninę paliwowo-powietrzną.

Reakcje chemiczne i wzrost temperatury wewnątrz frontu płomienia wywołują jonizowanie cząstek ładunku w całej objętości cylindra. Ilość zjonizowanych cząstek jest mała, ale możliwa do zmierzenia. Po zaniku napięcia zasilania na świecy indukuje się prąd z wolnych ładunków zawartych w jonach. Prąd ten określany jest jako prąd jonizacji.

Przedstawiony poniżej obwód pomiaru jonizacji w komorze spalania silnika spalinowego o ZI bazuje na świecy zapłonowej w cylindrze - jako czujniku jonizacji (Rys. 2.).

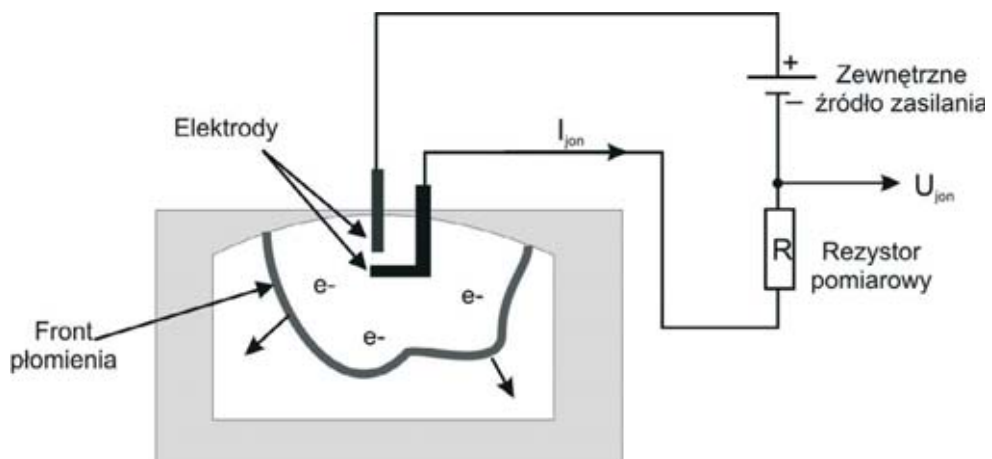
Obwód zasilany jest z zewnętrznego źródła napięcia stałego. Prąd  $I_{jon}$  płynący przez obwód jest zależny od przewodności właściwej gazów w komorze spalania a więc od stopnia zjonizowania gazów pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej. Pomiaru dokonuje się na rezystorze pomiarowym R mierząc spadek napięcia  $U_{jon}$  będący proporcjonalną miarą prądu jonizacji.

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



Rys. 1. Odpowiedź czujnika tlenu na zmianę składu mieszanki (badania autora, silnik 4-cylindrowy pojemności skokowej 1400 cm<sup>3</sup>): a) n = 2250 obr/min, b) n = 700 obr/min [2]

Fig. 1. The answer of oxygen sensor on change of mixture composition (author's research, engine 4-cylinder cubic capacity 1400 cm<sup>3</sup>): a) n = 2250 rev/min, b) n = 700 rev/min [2]

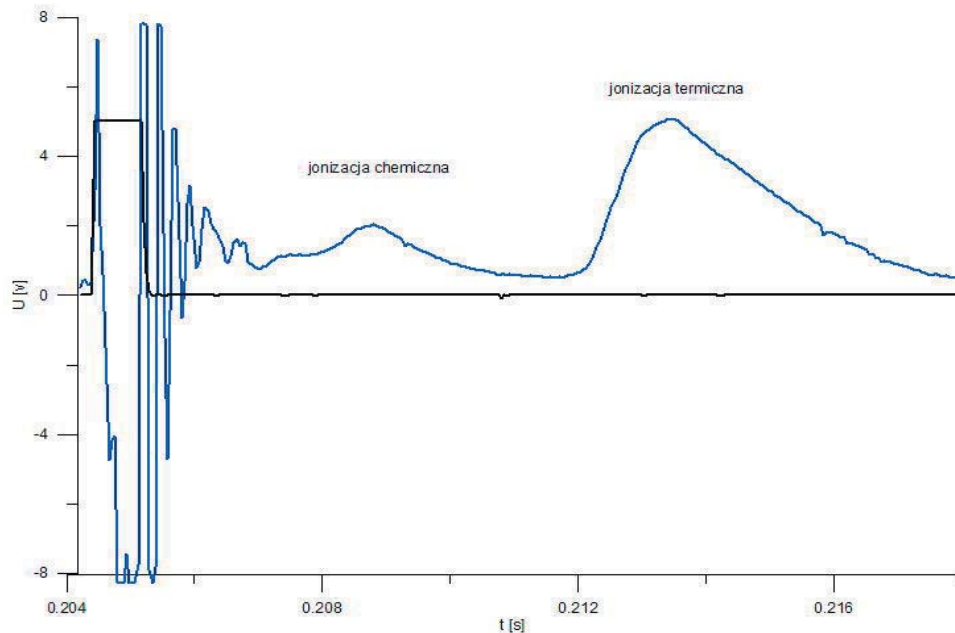


Rys. 2 Obwód pomiaru prądu jonizacji [4]

Fig. 2. The circuit of measurement of ionization current [4]

## 2. Charakterystyka sygnału jonizacji

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



Rys. 3. Charakterystyka sygnału jonizacji [2]  
Fig. 3. The characteristic of ionization signal [2]

Mierzony sygnał jonizacji składa się z trzech faz [4]:

- zapłonu (od początku wyładowania na świecy do czasu rozładowania cewki),
- frontu płomienia (chemijonizacja),
- popłomiennej (termojonizacja).

## 3. Ocena składu mieszanki na podstawie czujnika zawartości tlenu

Sonda lambda jest miernikiem składu mieszanki paliwo-powietrze działającym w sposób pośredni. Skład mieszaniny palnej jest określany w oparciu o stężenie tlenu w spalinach. Elektroda stykająca się ze spalinami jest pokryta substancją katalityczną, dzięki temu w otoczeniu elektrody powstaje równowaga stechiometryczna. Stężenie tlenu w pobliżu elektrody odpowiada sytuacji jaka miałyby miejsce w przypadku całkowitego i zupełnego spalania paliwa.

Element pomiarowy sondy lambda ma kształt cylindra zamkniętego z jednej strony, wykonanego ze stabilizowanego tlenkiem itru dwutlenku cyrkonu ( $ZrO_2$ ). Zewnętrzna powierzchnia elementu stykająca się ze spalinami pokryta jest porowatą warstwą platyny stanowiącą katalizator spalin. Skład gazów spalinowych w pobliżu warstwy platyny odpowiada sytuacji spalania zupełnego i całkowitego. Pod wpływem wysokiej temperatury porowata masa z dwutlenku cyrkonu staje się przepuszczalna dla jonów tlenu. Pomiędzy dwoma powierzchniami elementu cylindrycznego powstaje różnica potencjałów proporcjonalna do logarytmu stosunku ciśnień parcjalnych tlenu w spalinach i w powietrzu atmosferycznym. Na podstawie potencjału takiego ogniwa można określić zawartość tlenu w spalinach.

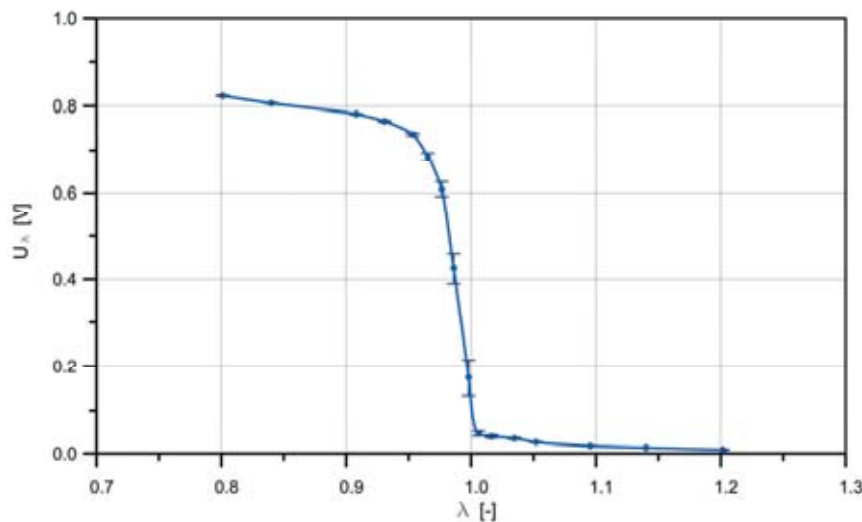
Siła elektromotoryczna idealnego czujnika jest dana wzorem Nernsta:

$$V = \frac{RT}{4F} \ln \left( \frac{P_{O_2(pow)}}{P_{O_2(spal)}} \right), \quad (1)$$

gdzie:

- $R$  - uniwersalna stała gazowa,  
 $T$  - temperatura bezwzględna,  
 $F$  - stała Faradaya,  
 $p_{O2(pow)}$  - ciśnienie cząstkowe tlenu w powietrzu,  
 $p_{O2(spal)}$  - ciśnienie cząstkowe tlenu w gazach spalinowych.

Napięcie wyjściowe zmienia się gwałtownie w punkcie stechiometrycznym ( $\lambda = 1$ ), dlatego czujnik ten jest często nazywany wąskozakresowym bądź dwustanowym (Rys. 4.). Dla wartości  $\lambda < 1$  (mało tlenu w spalinach) mieszanka jest bogata, dla  $\lambda > 1$  (dużo tlenu w spalinach) mieszanka jest uboga.



Rys. 4. Zależność napięcia na sondzie lambda od współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ , [2]  
 Fig. 4. The characteristic of voltage on oxygen sensor of excess-air factor  $\lambda$ , [2]

#### 4. Ocena składu mieszanki na podstawie sygnału jonizacji

Sygnał jonizacji posiada przewagę nad sygnałem czujnika tlenu pod względem:

- szybkości reakcji (pomiar po każdym zapłonie),
- szerokości zakresu (czujnik tlenu mierzy dwustanowo),
- temperatury pracy (czujnik tlenu wymaga do poprawnej pracy osiągnięcia temperatury przynajmniej 300 °C),
- łatwości zastosowania (czujnikami jonizacji mogą być elektrody świecy zapłonowej - nie trzeba ingerować w konstrukcję silnika),
- niskich kosztów,
- pomiaru w każdym cylindrze (czujnik tlenu umieszczony na wyjściu dokonuje jedynie pomiaru ogólnego).

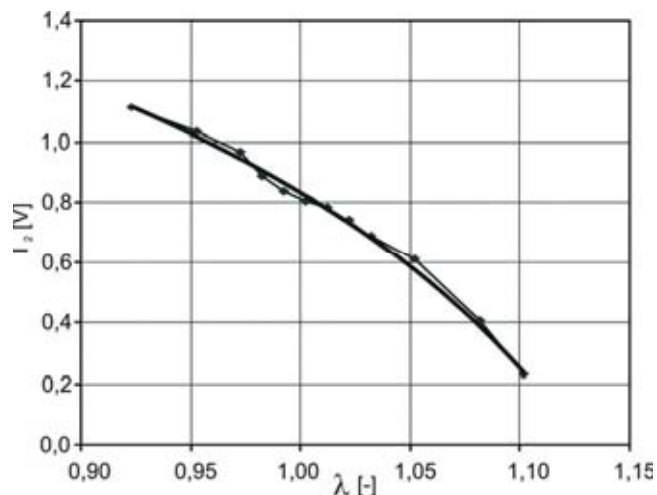
Sygnał z czujnika tlenu posiada przewagę nad czujnikiem jonizacji pod względem:

- jednoznaczności pomiaru (sygnał jonizacji obarczony jest dużą niepewnością pomiaru. Należy go uśredniać z większej ilości pomiarów),
- łatwości przeliczania wskazania (sygnał jonizacji trzeba przetwarzać).

Na podstawie badań wykonanych przez autora [1, 2] określono, że największą korelację (0,995) do współczynnika nadmiaru powietrza wykazał parametr  $I_2$  (opisujący średnią wartość sygnału termojonizacji) aproksymowany wielomianem drugiego stopnia.

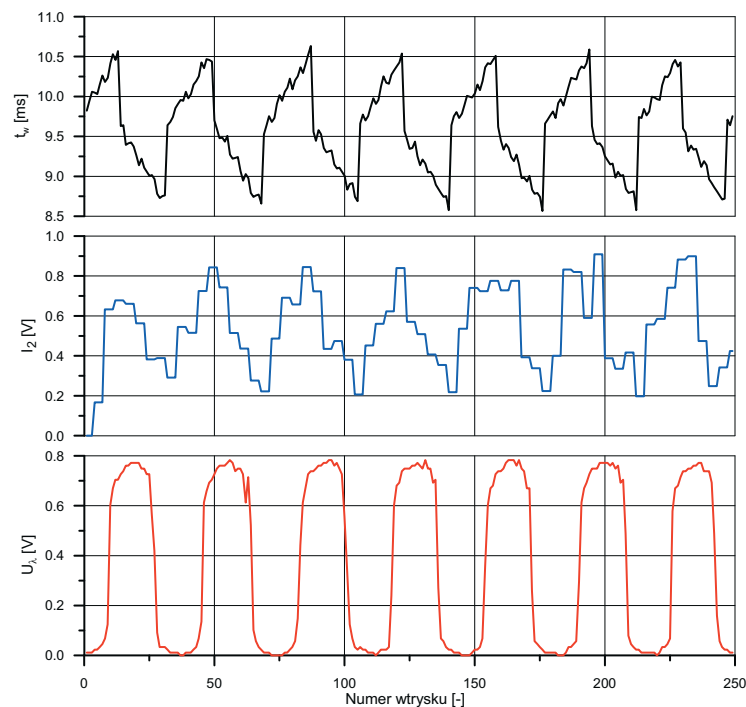
$$I_2 = -12,37 \cdot \lambda^2 + 20,29 \cdot \lambda - 7,09. \quad (2)$$





Rys. 5. Aproksymacja sygnału  $I_2$  wielomianem drugiego stopnia [2]  
 Fig. 5. The model of signal  $I_2$  in function of excess-air factor [2]

Zaprojektowano regulator PI z założonym współczynnikiem zmiany składu mieszanki  $A_\lambda = 0,1$ . Opracowany algorytm zaimplementowano w elektronicznym sterowniku badawczym DTS-700. Wyniki badań przedstawia Rys. 6.



Rys. 6. Przebieg sterowania wtryskiem benzyny  $t_w$  regulatorem PI na podstawie sygnału sondy lambda  $U_\lambda$  wraz z zarejestrowanym sygnałem jonizacji  $I_2$  [2]  
 Fig. 6. The course of steering the moulding injection of petrol  $t_w$  the regulator PI on basis of signal of oxygen sensor  $U_\lambda$  together with registered signal of ionization  $I_2$  [2]

Na rysunku widoczne są zmiany czasu otwarcia wtryskiwacza  $t_w$  i wywołane tym zmiany wartości sygnału jonizacji  $I_2$  oraz sygnału sondy lambda  $U_\lambda$

Widać duże opóźnienie reakcji czujnika tlenu na zmianę dawki wtrysku. Jednocześnie, sygnał jonizacji reaguje dużo szybciej, lecz mniej dokładnie.

## 5. Wnioski

Sygnał jonizacji reagując znacznie szybciej (pomiar w czasie rzeczywistym) od czujnika tlenu, wydaje się być lepszym sygnałem do szacowania składu mieszanki paliwowo-powietrznej.

Z drugiej strony, duża niepewność sygnału skłania do uśredniania wartości z kilku pomiarów. Przy zastosowaniu pomiaru jonizacji jednocześnie w czterech cylindrach, ilość pomiarów wzrosłaby czterokrotnie, więc uśredniając sygnał jonizacji z czterech cylindrów nie byłoby istotnego opóźnienia w pomiarze.

Jednoznaczny, choć opóźniony pomiar z czujnika tlenu mógłby być pomocny w korekcji sygnału z czujnika jonizacji.

Współpraca czujnika jonizacji z czujnikiem tlenu będzie odznaczała się większą precyzją (w zakresie pomiaru dawki stechiometrycznej) oraz większą szybkością pomiaru - w porównaniu do zastosowania samego czujnika tlenu.

## **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] Andersson, I., *Cylinder Pressure and ionization current modeling for spark ignited engines*, Linkoping studies in science and technology, Thesis No. 962, 2002.

