

Dr inż. Przemysław Filipek
Kat. Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38
20-618 Lublin
e-mail: p.filipek@pollub.pl

Szacowanie składu mieszanki w procesie sterowania wtryskiem benzyny w silniku ZI z wykorzystaniem sygnału jonizacji w komorze spalania

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, skład mieszanki, prąd jonizacji, wtrysk benzyny, świeca zapłonowa

Streszczenie: W artykule zawarto porównanie sygnałów z sondy lambda oraz czujnika jonizacji do szacowania składu mieszanki w procesie sterowania wtryskiem benzyny w silniku o zapłonie iskrowym. Opisano sposób pomiaru i charakterystykę sygnału jonizacji w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych. Przedstawiono stworzony model matematyczny silnika spalinowego, którego użyto do przeprowadzenia badań symulacyjnych, testujących użyteczność sygnału jonizacji do szacowania składu mieszanki paliwowo-powietrznej. Wykazano przewagę regulatora wykorzystującego pomiar jonizacji w komorze spalania w porównaniu z regulatorem korzystającym z sygnału klasycznej sondy lambda.

1. Wstęp

Podczas eksploatacji silnika spalinowego o zapłonie iskrowym, najważniejszą rolę pełnią trzy podstawowe funkcje sterujące: sterowanie wtryskiem paliwa, sterowanie zapłonem i sterowanie przepustnicą. Ze wszystkich trzech funkcji sterujących, sterowanie wtryskiem ma najdalej idące konsekwencje dla jakości pracy silnika spalinowego. Zmiana parametrów wtrysku odbija się bowiem nie tylko na zużyciu paliwa i mocy samochodu, ale przede wszystkim determinuje skład spalin silnikowych. Sterowanie wtryskiem wymaga predykcji składu mieszanki w cylindrze po zakończeniu wymiany ładunku [23].

Bezpośredni pomiar składu mieszanki w cylindrze jest bardzo utrudniony. Najczęściej stosowaną metodą jest pośredni pomiar składu mieszanki, z wykorzystaniem sygnałów wewnątrz-cylindrowych towarzyszących procesowi spalania. Metody wykorzystujące pomiar ciśnienia w cylindrze lub emisję optyczną z komory spalania są niepraktyczne do zastosowania w eksploatacji [23].

Współczesne pojazdy wyposażone są w czujnik składu mieszanki palnej w spalinach, zamontowany w układzie wydechowym. Czujnik ułatwia szacowanie składu mieszanki na podstawie stężenia tlenu w spalinach. Sygnał pomiarowy z czujnika składu mieszanki palnej 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 informacja korygująca wystąpi z dużym przesunięciem czasowym. Utrzymujący się stan niewłaściwych wartości stężenia tlenu w spalinach wpływa zdecydowanie niekorzystnie na wskaźniki eksploatacyjne pracy silnika powodując zmniejszenie sprawności spalania i katalizy toksycznych składników spalin (spadek trwałości reaktora katalitycznego spalin) oraz pogorszenie ekologicznych właściwości pojazdu [3].

Aby zminimalizować błąd występujący podczas regulacji składu mieszanki paliwowo-powietrznej należy zdecydowanie wcześniejszej i dokładniej oceniać współczynnik nadmiaru powietrza. Metodą alternatywną, określającą skład mieszanki ze zdecydowanie mniejszą zwłoką czasową jest pomiar wielkości jonizacji gazu w cylindrze silnika spalinowego. Pomiar ten dokonywany jest przy użyciu jako czujnika – elektrod świecy zapłonowej w cylindrze [20, 24, 25].

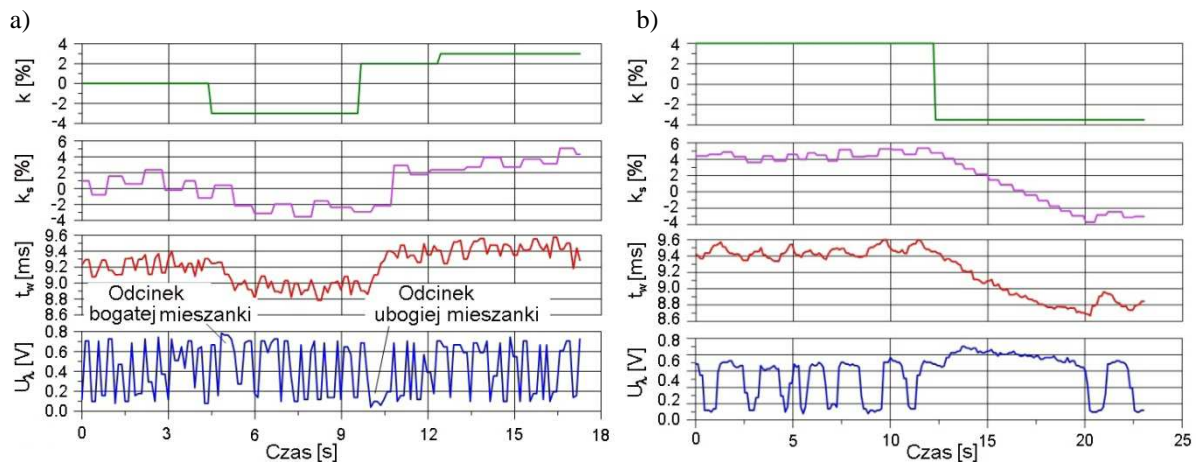
Pomiar prądu jonizacji gazu w cylindrze silnika spalinowego wielokrotnie już wykorzystywano do wykrywania spalania stukowego [2, 16, 18], diagnostyki wypadania zapłonów [17], określania temperatury [13], szacowania ciśnienia w cylindrze [15, 19, 21], czy szacowania składu mieszanki paliwowo-powietrznej, gdzie potwierdzono istotne zależności sygnału jonizacji od składu mieszanki [1, 22]. Nowoczesne metody analizy sygnałów pomiarowych silników ZI są coraz częściej oparte na modelach sztucznych sieci neuronowych [4] a szeroko stosowane w wielu innych dziedzinach nauki [11, 12].

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. Na podstawie sygnału jonizacji w cylindrze można sterować zapłonem [6], lecz literatura wykazuje niedostatki wiedzy o przydatności tego sygnału do sterowania wtryskiem benzyny. Niniejszy artykuł wskazuje na celowość wykorzystania sygnału jonizacji do sterowania wtryskiem benzyny z uwagi na znacznie szybszy pomiar składu mieszanki w cylindrze i lepszą dynamikę sygnału od czujnika składu mieszanki palnej oraz jego wysokiej korelacji w zakresie λ między 0.9 a 1.1.

2. Sterowanie wtryskiem benzyny

Sterowanie wtryskiem benzyny oparte jest powszechnie o pomiar zawartości tlenu w spalinach za pośrednictwem sondy lambda. Czujnik składu mieszanki palnej w spalinach charakteryzuje się istotną wadą w postaci czasu opóźnienia pomiędzy zmianą składu mieszanki po wtrysku benzyny a reakcją czujnika na ten fakt, przy czym wielkość opóźnienia czasowego zależna jest od kierunku zmiany mieszanki bogatej na ubogą (lub odwrotnie) oraz od temperatury czujnika [3].

Rysunek 1 przedstawia zarejestrowane przez autora przebiegi regulacji wtrysku paliwa w produkcyjnym, czterocylindrowym silniku samochodowym. W badaniach eksperymentalnych wykorzystano elektroniczny sterownik z możliwością realizacji procesu regulacji czasu wtrysku. Na Rys. 1. widać reakcję poprawki regulacyjnej k_s na zmieniającą się, wymuszoną przez autora, charakterystykę modelu wtrysku wyrażoną współczynnikiem poprawkowym k . Rysunek 1a pokazuje odcinki czasowe zbyt bogatej lub zbyt ubogiej mieszanki pojawiające się bezpośrednio po zaburzeniu charakterystyki modelu wtrysku. Opóźnienie regulacji jest przede wszystkim związane z bezwładnością czujnika składu mieszanki palnej. Podobny przebieg regulacji pokazuje rysunek 1b, gdzie gwałtowna i szybka zmiana współczynnika modelu k o 15 % wywołała reakcję dostrojenia się układu do właściwej wielkości dopiero po dziewięciu sekundach, co oznacza bardzo długi czas przebywania silnika w warunkach spalania mieszanki bogatej.



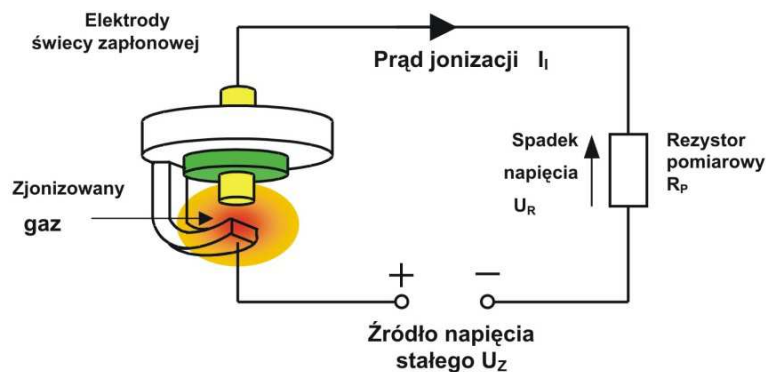
Rys. 1. Przebiegi regulacji wtrysku paliwa w produkcyjnym, czterocylindrowym silniku samochodowym w czasie skokowo wymuszanych zmian modelu wtrysku w sterowniku wyrażanych współczynnikiem k (badania autora)

3. Sygnał jonizacji w komorze silnika spalinowego ZI

Spalanie w silniku ZI inicjowane jest poprzez wyładowanie iskrowe na elektrodach świecy zapłonowej. Płomień rozchodzi się od świecy w kierunku ścianek komory spalania, 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 elektrodach świecy - czujniku jonizacji - indukuje się prąd z wolnych ładunków zawartych w jonach. Prąd ten określany jest jako prąd jonizacji.

3.1. Sposób pomiaru

Na rysunku 2 przedstawiono obwód pomiaru prądu jonizacji. Układ zasilany jest zewnętrznym napięciem stałym $U_z = 200 \text{ V}$ [10]. Prąd I_i , który płynie w obwodzie zależy od przewodności właściwej mieszaniny gazów pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej w komorze spalania, a więc od wartości zjonizowania gazów. Pomiar dokonywany jest na rezystorze pomiarowym R_p , na którym spadek napięcia U_R (zgodnie z prawem Ohma) jest proporcjonalny do prądu jonizacji.



Rys. 2. Metoda pomiaru prądu jonizacji pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej

Układ pomiarowy, zbudowany przez autora, umożliwiający pomiar prądu jonizacji jednocześnie w czterech cylindrach silnika spalinowego, przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Widok układu badawczego do pomiaru prądu jonizacji w czterech cylindrach

3.2. Charakterystyka sygnału jonizacji z badań doświadczalnych

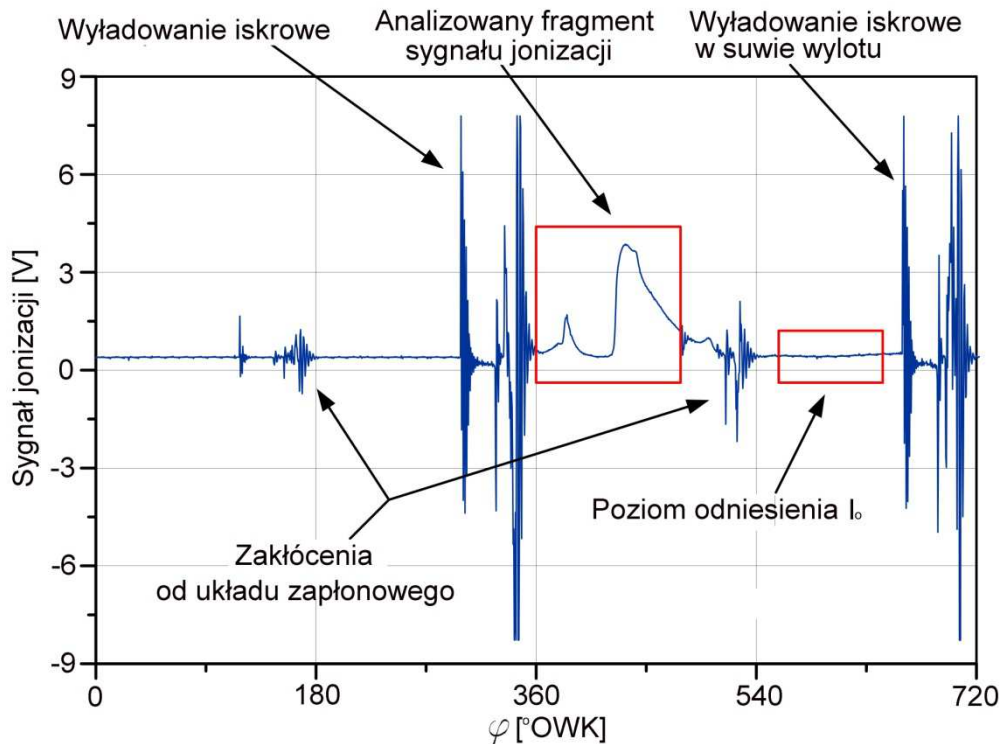
Badania doświadczalne przeprowadzono na benzynowym silniku C20LE Holden z wielopunktowym wtryskiem benzyny do kolektora dolotowego, przystosowanym do zasilania gazem LPG. C20LE Holden to czterosurowy, czterocylindrowy silnik chłodzony cieczą, z dwoma zaworami na cylinder poruszanymi pojedynczym wałkiem rozrządu umieszczonym w głowicy, z hydrauliczną regulacją luzów. Silnik posiada bezrozdzielaczy układ zapłonowy DIS oraz wyposażony jest w mechanicznie sterowany zawór recyrkulacji spalin EGR.

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano układ sterowania silnikiem spalinowym o zapłonie iskrowym DTS-700, zaprojektowany i zbudowany przy współudziale autora na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Urządzenie wyposażone jest w cztery interfejsy komunikacyjne RS232/422/485 oraz CAN 2.0B, które umożliwiają sterowanie silnikiem z komputera nadzorczego.

Opracowano wyniki prób polegających na pomiarze sygnału prądu jonizacji w cylindrze przy różnych wartościach współczynnika nadmiaru powietrza, dla zadawanych wartości składu mieszanki paliwo-powietrze. W czasie badań mierzono sygnał prądu jonizacji, sygnał ciśnienia dla czwartego cylindra silnika oraz dwa sygnały określające skład mieszanki: sygnał generowany przez szerokozakresową sondę lambda i sygnał generowany przez wąskozakresową sondę lambda. Równolegle wykonywano pomiary sygnału znacznika GMP. Wartość ciśnienia w cylindrze mierzono z dwóch względów:

- w celu wykrycia ewentualnych przypadków nieprawidłowego spalania (spalanie stukowe, wypadanie zapłonów),
- w celu porównania rozproszenia sygnału ciśnienia i sygnału jonizacji w kolejnych cyklach silnikowych.

Rysunek 4 przedstawia jeden z zarejestrowanych przebiegów sygnału jonizacji w czwartym cylindrze. Można wyróżnić w nim wyładowania iskrowe, sygnał prądu jonizacji, poziom odniesienia oraz zakłócenia od układu zapłonowego.



Rys. 4. Charakterystyka sygnału jonizacji mierzona w czwartym cylindrze

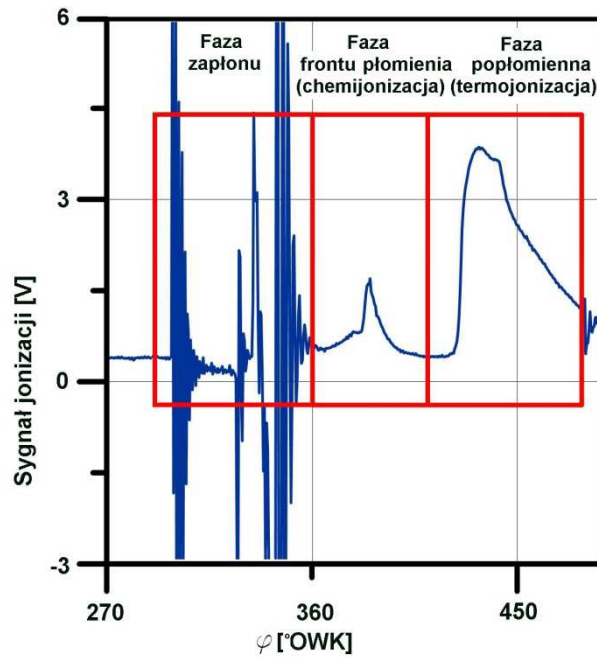
Aby uzyskać określony w badaniach skład mieszanki, korzystano z pomiarów szerokozakresowej sondy lambda. Dopasowanie do założonej wartości składu mieszanki otrzymywano poprzez sterowanie czasem wtrysku paliwa. Analogicznie można również zmieniać położenie przepustnicy, lecz sterowanie to jest znacznie wolniejsze.

Sygnał jonizacji ma trzy fazy (rysunek 5) [5, 7, 14]:

- a) faza zapłonu – która trwa od chwili wyładowania do czasu rozładowania cewki,
- b) faza frontu płomienia – to czas rozwoju jądra płomienia aż do chwili gdy front płomienia opuści obszar świecy zapłonowej – w tej fazie dominuje chemijonizacja,
- c) faza popłomienna – która obejmuje pozostały czas spalania występujący wewnątrz cylindra – w tej fazie dominuje termojonizacja.

Podczas analizy sygnału jonizacji pomija się fazę zapłonu, ponieważ duży wpływ mają wówczas zjawiska pochodzące od układu zapłonowego.

Po przeprowadzonej analizie literatury [5, 6, 7, 13, 14, 19, 20, 21] i zgodnie z wynikami wcześniejszych badań autora [8, 9, 10] ustalono, że do dalszej analizy będzie użyty weryfikowany parametr I_2 który opisuje przebieg jonizacji w cylindrze silnika. Jest to średnia wartość sygnału termojonizacji.

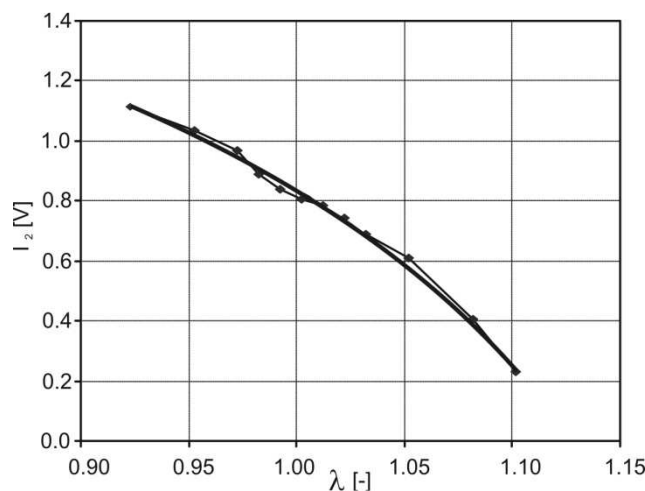


Rys. 5. Fragment charakterystyki sygnału jonizacji z oznaczonymi fazami

Opracowano model parametru I_2 w postaci wielomianu drugiego stopnia (rysunek 6):

$$I_2 = -12.37 \cdot \lambda^2 + 20.29 \cdot \lambda - 7.09 \quad (1)$$

Współczynnik korelacji wyniósł aż 0.995 a kwantyl istotności korelacji $t = 38.78$ przy udziale składnika losowego zaledwie 2.8 %. Następnie przeprowadzono analizę reszt, która wykazała normalność rozkładu standaryzowanego błędu δI_2 przy prawdopodobieństwie testowym wynoszącym 0.227. Badanie stacjonarności pozwoliło na uzyskanie kwantyla testu t-Studenta $t = 0.146$, znacznie poniżej wartości granicznej ($t_{\alpha=0.05} = 1.782$). Także kwantyl testu t-Studenta w badaniu symetrii składowej losowej uzyskał wartość poniżej wartości granicznej ($t = 0.146$) potwierdzając poprawność modelu. Jedynie badanie losowości składowej losowej podważa poprawność modelu, ale wynika to z małej liczby danych, na których oparto identyfikację modelu. Biorąc pod uwagę wyniki pozostałych testów można przyjąć opracowany model za poprawny.



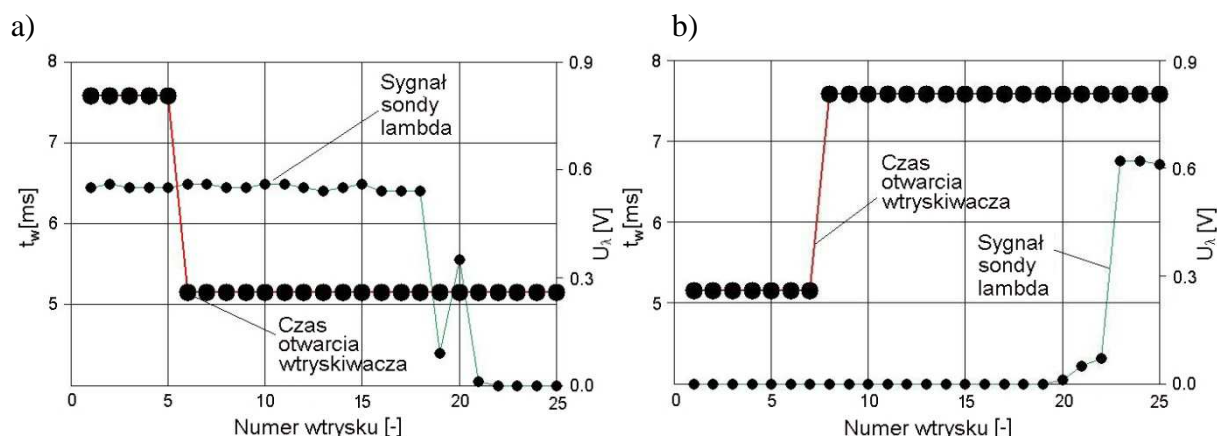
Rys. 6. Charakterystyka parametru I_2 w funkcji λ

3.3. Porównanie reakcji sygnału czujnika tlenu na skokowe zubożenie i wzbogacenie składu mieszanki palnej

Aby porównać reakcję sygnału z czujnika tlenu na skokowe zubożenie i wzbogacenie składu mieszanki paliwowo-powietrznej, przeprowadzono badania polegające na określeniu opóźnienia czasowego pomiędzy wtryskiem paliwa a sygnałami sprężenia zwrotnego. Uzyskane wyniki posłużyły następnie do porównania opóźnienia działania sondy lambda i czujnika jonizacji.

Badania przeprowadzono dla prędkości obrotowej 1000 obr/min i średniego ciśnienia w układzie dolotowym 40 kPa. Silnik znajdował się w ustalonym stanie termicznym. Zarówno temperatura cieczy chłodzącej jak i temperaturę oleju smarującego utrzymywano na poziomie nominalnym. Badania w tej fazie polegały na zmniejszeniu lub zwiększeniu współczynnika nadmiaru powietrza poprzez skokową zmianę czasu otwarcia wtryskiwacza.

Na rysunku 7.a przedstawiono przebieg zadanego poprzez wtrysk paliwa współczynnika nadmiaru powietrza oraz reakcję klasycznego czujnika tlenu na zubożenie mieszanki paliwowo-powietrznej. Analogiczne dane przedstawiono na rysunku 7.b. Różnica polega na zmianie składu mieszanki z ubogiego na bogaty. Wyznaczony czas opóźnienia sygnału czujnika tlenu określono na 16 kolejnych suwów silnika (czyli 16 kolejnych wtrysków benzyny w czterosuwowym silniku czterocylindrowym).

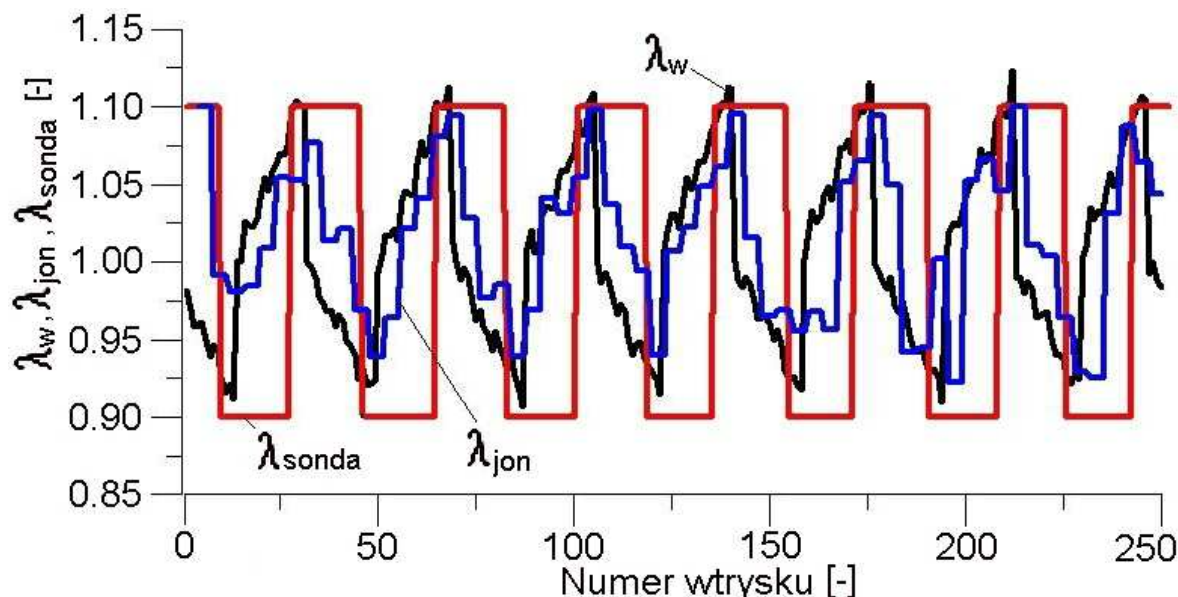


Rys. 7. Przebieg czasu wtrysku benzyny oraz reakcja klasycznego czujnika tlenu na skokowe a) zubożenie; b) wzbogacenie; mieszanki paliwowo-powietrznej

3.4. Szacowanie składu mieszanki na podstawie sygnałów czujnika tlenu i jonizacji

Po wyznaczeniu czasu opóźnienia sygnału z czujnika tlenu na zmiany czasu wtrysku benzyny, zaprojektowano regulator typu PI z ustalonym współczynnikiem zmiany składu mieszanki $A_\lambda = 0.1$. Opracowany algorytm sterowania wprowadzono do elektronicznego sterownika badawczego DTS-700.

Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi czasowe współczynnika nadmiaru powietrza podczas sterowania wtryskiem benzyny algorytmem regulacyjnym PI na podstawie sygnału sondy lambda. Zestawiono sygnał oszacowany na podstawie wtrysku oraz sygnał uzyskany na podstawie pomiaru wskazań jonizacji i sondy lambda.



Rys. 8. Przebiegi czasowe współczynnika nadmiaru powietrza λ oszacowanego na podstawie wtrysku λ_w , sygnału jonizacji λ_{jon} i sygnału sondy lambda λ_{sonda}

Wartość współczynnika namiaru powietrza generowanego podczas wtrysku benzyny obliczana była z zależności:

$$\lambda_w = \frac{\bar{t}_w}{t_w} \quad (2)$$

gdzie t_w oznacza kolejną wartość czasu wtrysku benzyny zaś \bar{t}_w wartość średnią obliczoną na podstawie wszystkich zarejestrowanych wartości podczas eksperymentu (założono symetrię błędu regulacji).

Wartość współczynnika nadmiaru powietrza szacowana na podstawie zarejestrowanego sygnału jonizacji I_2 , obliczana była zgodnie z modelem odwrotnym zależności (1).

$$\lambda = -0.11 \cdot I_2^2 - 0.05 \cdot I_2 + 1.12 \quad (3)$$

W odniesieniu do sygnału sondy lambda przyjęto, że wartości napięcia czujnika tlenu większe od 0.4 V oznaczają mieszankę bogatą ($\lambda_{sonda} = 0.9$) zaś mniejsze lub równe 0.4 V mieszankę ubogą ($\lambda_{sonda} = 1.1$). Należy zaznaczyć, że szacowanie λ_{jon} dokonywane było czterokrotnie rzadziej w porównaniu z sygnałami λ_{sonda} i λ_w , co wynika z rejestracji prądu jonizacji w jednym tylko cylindrze czterocylindrowego silnika.

Zamieszczone przebiegi czasowe z rysunku 8 pokazują, że zastąpienie sygnału sondy lambda o charakterystyce dwustanowej sygnałem jonizacji o charakterystyce jednoznacznej z niewielką nieliniowością i znaczącym zakresem pozwala na dokładniejsze szacowanie wartości współczynnika nadmiaru powietrza.

Należy podkreślić, że pozytywna ocena sygnału jonizacji do prognozowania składu mieszanki będzie podwyższona po uwzględnieniu (pomiarze) jonizacji we wszystkich cylindrach silnikowych.

4. Badania symulacyjne sterowania wtryskiem benzyny na podstawie sygnałów czujnika tlenu oraz jonizacji

Do badań symulacyjnych wykorzystano stworzony model matematyczny silnika benzynowego wraz z systemem sterowania oraz wyniki badań symulacyjnych z użyciem tego modelu.

Podstawowym zadaniem modelu jest obliczenie sterowania w postaci czasu otwarcia wtryskiwacza na podstawie czasu wtrysku w warunkach ustalonych i obliczonej poprawki regulacyjnej obliczonej w regulatorze PI. Dane do obliczeń czasu wtrysku w warunkach ustalonych związane są z założonym napełnieniem cylindra, warunkom otoczenia i przyjętej wartości wydatku wtryskiwacza. Współczynniki regulatora PI obliczane są na podstawie przyjętej odchyłki składu mieszanki oraz opóźnienia czasowego pomiaru sygnału sprzężenia zwrotnego. W modelu symulowany jest przebieg sygnału jonizacji wykorzystujący również model szumu sygnału.

Podczas badań symulacyjnych obliczano 10000 cyklicznych wtrysków benzyny dla dwóch typów szacowania składu mieszanki paliwo-powietrze oraz kilku wariantach współczynników regulatora PI.

4.1. Model matematyczny silnika wraz z systemem sterowania

Podczas budowy modelu przyjęto następujące założenia:

- symulowane jest działanie silnika czterocylindrowego o pojemności skokowej 2000 cm³;
- napełnianie cylindra jest 50-procentowe;
- wtryskiwacz posiada liniową charakterystykę wtrysku.

Z uwagi na ilość obliczeń przedstawiono tylko końcowe wzory [10].

Masa paliwa wtryskiwana do silnika:

$$m_{pal} = t_w(i) \cdot w_B \cdot \frac{1}{1 + \frac{k(i)}{100}} \quad (4)$$

gdzie:

m_{pal} – masa paliwa,

t_w – czas wtrysku,

w_B – stała wydatku wtryskiwacza = 3.0 [mg/ms],

$k(i)$ – współczynnik zmienności modelu wtrysku [%].

Rzeczywisty współczynnik nadmiaru powietrza:

$$\lambda_w(i) = \frac{m_{pow}}{L_t \cdot m_{pal}(i)} \quad (5)$$

gdzie:

λ_w – obliczona wartość lambda,

m_{pow} – masa powietrza,

L_t – teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania = 14.7 [kg powietrza/ kg paliwa].

Współczynnik regulacji $k_s(i)$:

$$k_s(i) = \frac{\Delta t_w(i) \cdot 100}{t_w^M} \quad (6)$$

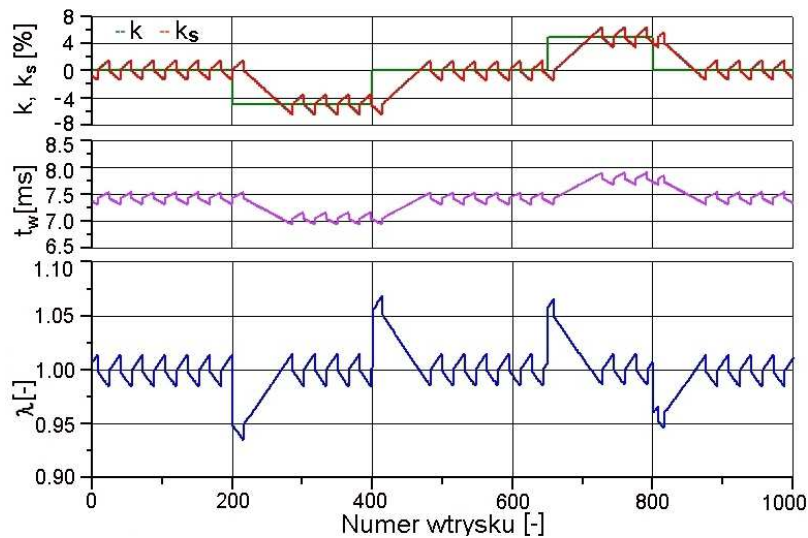
gdzie:

$k_s(i)$ – współczynnik regulacji wtrysku,
 t_w^M – bazowy czas wtrysku.

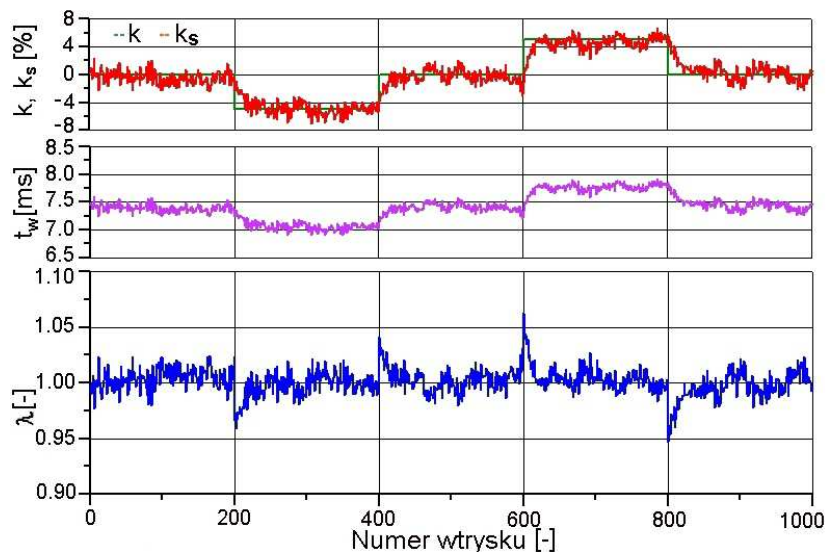
4.2. Wyniki badań symulacyjnych

Badania symulacyjne przeprowadzono dla dwóch wariantów pomiaru (szacowania) współczynnika nadmiaru powietrza i ośmiu wartości parametru $A_\lambda = \{0.005; 0.010; 0.015; 0.018; 0.020; 0.025; 0.030; 0.040\}$. W ten sposób przeprowadzono syntezę regulatora PI dla obu wariantów pomiaru składu mieszanki.

Przebiegi czasowe zadanego współczynnika zmienności wtrysku k , odpowiedzi regulatora k_s , czasu wtrysku benzyny t_w oraz składu mieszanki paliwowo-powietrznej λ bezpośrednio po wtrysku przedstawiają rysunki 9 i 10.



Rys. 9. Sterowanie wtryskiem przy pomiarze składu mieszanki czujnikiem tlenu dla $A_\lambda = 0.015$



Rys. 10. Sterowanie wtryskiem przy pomiarze składu mieszanki czujnikiem jonizacji dla $A_\lambda = 0.015$

4.3. Analiza wyników

Dla obu wariantów obliczono trzy wskaźniki stabilizacji składu mieszanki. Przyjęto następujące definicje wskaźników:

1) $\delta_{\lambda 1}$ – wskaźnik przedstawiający energię uchybu regulacji $\varepsilon(i)$:

$$\varepsilon(i) = \lambda_w(i) - 1 \quad (7)$$

$$\delta_{\lambda 1} = 1000 \cdot \sum_{i=1}^{10000} \varepsilon^2(i) \quad (8)$$

2) $\delta_{\lambda 2}$ – wskaźnik przedstawiający maksymalny uchyb regulacji:

$$\delta_{\lambda 2} = \int_{i=i_1}^{i=i_2} |\varepsilon(i)|, \quad i \in \{i_1, i_2\} \quad \text{sign}[\varepsilon(i)] = \text{sign}[\varepsilon(i-1)] \quad (9)$$

$$i_{\max} \in \{i_1, i_2\}$$

gdzie:

i_{\max} – indeks maksymalnego uchybu $\varepsilon(i)$.

3) $\delta_{\lambda 3}$ – wskaźnik przedstawiający średni uchyb, definiowany jako:

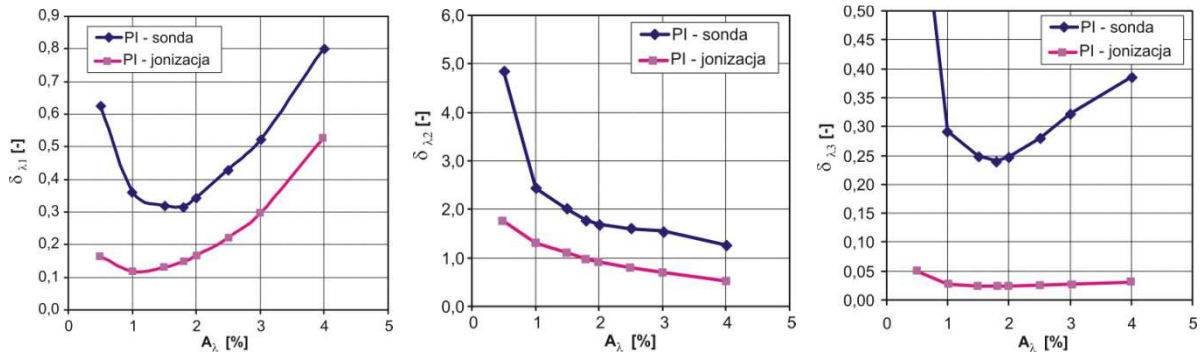
$$\delta_{\lambda 3} = \frac{\delta}{j_{\max}} \quad (10)$$

gdzie:

$$\delta = \sum_{j=1}^{j_{\max}} \sum_{i=i_1(j)}^{i=i_2(j)} |\varepsilon(i)| \quad (11)$$

$$i \in \{i_1(j), i_2(j)\} \quad \text{sign}[\varepsilon(i)] = \text{sign}[\varepsilon(i-1)]$$

Rysunek 11 przedstawia porównanie zależności wskaźników stabilizacji $\delta_{\lambda 1}$, $\delta_{\lambda 2}$ i $\delta_{\lambda 3}$ od współczynnika A_λ . W każdym z przypadków widać przewagę regulatora korzystającego z sygnału jonizacji do oceny składu mieszanki.



Rys. 11. Zależność wskaźników stabilizacji $\delta_{\lambda 1}$, $\delta_{\lambda 2}$, $\delta_{\lambda 3}$ od współczynnika A_λ dla obu wariantów regulacji

Optymalne wartości regulatorów PI zlokalizowane są w pobliżu wartości $A_\lambda = 2\%$, co zgodne jest z obserwacjami rzeczywistych silników benzynowych.

Badania symulacyjne wykazały przewagę regulatora wykorzystującego pomiar jonizacji w cylindrze w porównaniu z regulatorem wykorzystującym sygnał z klasycznej sondy lambda.

5. Wnioski

1. Wykonane badania zdecydowały o pozytywnej weryfikacji użyteczności przetwornika jonizacji w komorze spalania do szacowania wartości składu mieszanki w układzie sterowania wtryskiem benzyny.
2. Wykazano istotną zależność parametru I_2 charakterystyki sygnału jonizacji od współczynnika λ (składu mieszanki paliwowo-powietrznej). Korelacja liniowa w zakresie λ między 0.9 a 1.1 przekroczyła wartość 0.99.
3. Stwierdzono, że odległość czasowa pomiędzy sygnałem jonizacji a wtryskiem benzyny jest równa trzem suwom pracy czterocylindrowego silnika czterosuwowego z wtryskiem do kolektora dolotowego.
4. Stwierdzono, że odległość czasowa pomiędzy sygnałem z czujnika tlenu a wtryskiem benzyny jest równa od kilkunastu do kilkudziesięciu suwów pracy czterocylindrowego silnika czterosuwowego z wtryskiem do kolektora dolotowego.
5. Wprowadzenie do algorytmu sterowania samochodowego silnika spalinowego sygnału jonizacji pochodzącego ze świec zapłonowych umożliwi indywidualną regulację współczynnika składu mieszanki w każdym cylindrze.

6. Literatura

1. Abhijit A, George G, Naber J. Correlation of Air Fuel Ratio with Ionization Signal Metrics in a Multicylinder Spark Ignited Engine. SAE SP 2009; 2248: 45-62.
2. Abhijit A, Naber J. Ionization Signal Response during Combustion Knock and Comparison to Cylinder Pressure for SI Engines, SAE SP 2009; 2159: 25-40.
3. Ambrozik A, Kruczyński S, Łaczyński J, Tomaszewski D. Badania sygnałów z sond lambda w trójfunkcyjnym reaktorze katalitycznym na potrzeby OBD II. Journal of KONES 2002; 12(3): 5-9.
4. Czarnigowski J. A neural network model-based observer for idle speed control of ignition in SI engine. Engineering Applications of Artificial Intelligence 2010; 23: 1–7.
5. Eriksson L, Nielsen L, Glavenius M. Closed Loop Ignition Control by Ionization Current Interpretation. SAE Technical Paper 1997; doi:10.4271/970854.
6. Eriksson L, Nielsen L. Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines. Control Eng Pract 1997; 5 (8): 1107–1113.
7. Eriksson L, Nielsen L, Nytomt J. Ignition control by ionization current interpretation. SAE Technical Paper 1996; doi:10.4271/960045.
8. 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 2001.

9. Filipek P. Badania poziomu jonizacji w komorze spalania silnika spalinowego o zapłonie iskrowym. *Folia Societatis Lublinensis* 2002; 11: 66-73.
10. Filipek P. Sterowanie wtryskiem benzyny w silniku o zapłonie iskrowym z wykorzystaniem sygnału jonizacji w komorze spalania. Rozprawa doktorska Politechnika Lubelska 2006.
11. Gajewski J, Jedliński Ł, Jonak, J. Classification of wear level of mining tools with the use of fuzzy neural network. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2013; 35: 30–36.
12. Gajewski J, Jonak J. Towards the identification of worn picks on cutterdrums based on torque and power signals using Artificial Neural Networks. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2011; 26: 22–28.
13. Gao Z, Wu X, Man Ch, Meng X, Huang Z. The relationship between ion current and temperature at the electrode gap. *Applied Thermal Engineering* 2012; 33(34): 15-23.
14. Gao Z, Wu X, Gao H, Liu B, Wang J, Meng X, Huang Z. Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gas–hydrogen blends with BSS de-noising method. *International Journal of Hydrogen Energy* 2010; 35(23): 12918–12929.
15. Hellring M, Holmberg U. A comparison of ion-current-based algorithms for peak pressure position control. SAE Technical Paper 2001; doi:10.4271/2001-01-1920.
16. Hung D, Zhu G, Danne N, McKoskey J. Knock Detection for a Large Displacement Air-Cooled V-Twin Motorcycle Engine Using In-Cylinder Ionization Signals. SAE Technical Paper 2008; doi:10.4271/2008-32-0028.
17. Lundstrom D, Schagerberg S. Misfire detection for prechamber SI engines using ion-sensing and rotational speed measurements. SAE Technical Paper 2001; doi:10.4271/2001-01-0993.
18. Minelli G, Moro D, Solieri L, Cavina N, Corti E. Knock indexes normalization methodologies. SAE Technical Paper 2006; doi:10.4271/2006-01-2998.
19. Rivara N, Dickinson P B, Shenton A T. A neural network implementation of peak pressure position control by ionization current feedback. *J Dyn Syst Meas Control* 2009; 131(5): 051003.
20. Saitzkoff A, Reinmann R, Berglind T, Glavmo M. An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor. SAE Technical Paper 1996; doi:10.4271/960337.
21. Saitzkoff A, Reinmann R, Mauss F, Glavmo M. In-cylinder pressure measurements using the spark plug as an ionization sensor. SAE Technical Paper 1997; doi:10.4271/970857.
22. Schneider D, Lai M. Real-time air/fuel ratio control in a small SI engine using the ionic current signal. SAE Technical Paper 1999; doi:10.4271/1999-01-3323.

23. Wendeker M. Sterowanie wtryskiem w silniku samochodowym. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 1999.
24. Wu X. M, Gao Z, Jiang D M, Huang Z H. Experimental investigation of the effect of electrodes on the ionization current during combustion. Energy Fuels 2008; 22(5): 2941–2947.
25. Yoshiyama S, Tomita E, Hamamoto Y. Fundamental study on combustion diagnostics using a spark plug as ion probe. SAE Technical Paper 2001; doi:10.4271/2000-01-2828.

Wykaz skrótów i oznaczeń:

A_λ	–	założona amplituda zmienności współczynnika nadmiaru powietrza,
I_{jon}	–	prąd jonizacji,
I_0	–	prąd odniesienia dla sygnału jonizacji,
I_2	–	wartość sygnału termojonizacji,
I_I	–	prąd jonizacji w obwodzie pomiarowym,
$k(i)$	–	współczynnik zmienności modelu wtrysku [%],
$k_s(i)$	–	współczynnik regulacji wtrysku [%],
L_t	–	teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania,
m_{pal}	–	masa paliwa,
m_{pow}	–	masa powietrza,
$^{\circ}OWK$	–	stopnie obrotu wału korbowego,
R_p	–	rezystancja rezystora pomiarowego,
t_w^M	–	bazowy czas wtrysku,
t_w	–	czas wtrysku [ms],
U_R	–	spadek napięcia na rezystorze pomiarowym,
U_z	–	napięcie stałe w obwodzie pomiaru prądu jonizacji [V],
U_{jon}	–	napięcie pomiarowe gęstości jonów w komorze spalania,
U_λ	–	napięcie sondy lambda [V],
w_B	–	stała wydatku wtryskiwacza,
ΔI_2	–	odchyłka sygnału termojonizacji,
Δt_w	–	poprawka czasu wtrysku,
δ_λ	–	wskaźnik jakości regulacji,
λ	–	zawartość tlenu w spalinach,
λ_{jon}	–	obliczona wartość lambda na podstawie jonizacji,
λ_{sonda}	–	sygnał sondy lambda,
λ_w	–	obliczona wartość lambda.