

Przemysław FILIPEK

ESTIMATING AIR-FUEL MIXTURE COMPOSITION IN THE FUEL INJECTION CONTROL PROCESS IN AN SI ENGINE USING IONIZATION SIGNAL IN THE COMBUSTION CHAMBER

SZACOWANIE SKŁADU MIESZANKI W PROCESIE STEROWANIA WTRYSKIEM BENZYNY W SILNIKU ZI Z WYKORZYSTANIEM SYGNAŁU JONIZACJI W KOMORZE SPALANIA*

The paper offers a comparison between signals produced by a lambda sensor and ionization sensor to estimate air-fuel mixture composition in the fuel injection control process in an SI engine. The method of measurement is described and characteristics of the ionization signal in the conducted experimental tests are given. The paper also presents a numerical model of the internal combustion engine that was designed and then used in the simulations to examine the usefulness of ionization signal for estimating air-fuel mixture composition. The conducted tests demonstrated the advantage of the controller using the ionization measurement in the combustion chamber over the controller using signals produced by a classic lambda sensor.

Keywords: internal combustion engine, composition of air-fuel mixture, ionization current, fuel injection, spark plug .

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 spalinyowego, 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.

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

1. Introduction

There are three control functions which play a vital role in the operation of an internal combustion spark ignition engine: fuel injection control, ignition control and throttle control. Out of the three control functions, the fuel injection control affects the performance of the engine most. Any change in injection parameters affects not only fuel consumption and vehicle power; above all, it determines exhaust gas composition. Fuel injection control requires predicting air fuel mixture composition in the cylinder after the charge exchange [23].

It is very difficult to measure the mixture composition in the cylinder. The most widely used method is to measure it in an indirect manner, using in-cylinder signals which occur in the combustion process. On the other hand, the methods based on cylinder pressure measurement or optical emission from the combustion chamber are impractical to be employed in engine operation [23].

Modern vehicles are equipped with a sensor of air-fuel mixture composition in the exhaust gas, mounted in the exhaust system. The sensor facilitates estimating mixture composition based on oxygen concentration in the exhaust gas. The mixture composition sensor signal is characterized by a long time delay relative to the fuel injection signal. The delay can have values of even dozens of consecutive fuel injections. In the case of an incorrect value of a fuel injection dose, the correction will occur with a considerable time shift. The state with incorrect values of oxygen concentration in the exhaust gas has a clearly negative effect on engine operation, as it decreases combustion efficiency and catalysis of toxic exhaust gas components

(decreased life of an exhaust gas catalytic reactor) as well as leads to the worsening of vehicle ecological properties [3].

In order to minimize the error which occurs when adjusting air-fuel mixture composition, the excess air factor should be much earlier evaluated in a thorough way. An alternative method for estimating mixture composition, with a much shorter time delay is to measure gas ionization in the cylinder of an internal combustion engine. The measurement is done using the cylinder spark plug electrodes as a sensor [20, 24, 25].

The method based on measuring gas ionization current in the engine cylinder has been repeatedly employed to detect knocking [2, 16, 18] and misfiring [17], to determine temperature [13], to estimate cylinder pressure [15, 19, 21] or, finally, to estimate air-fuel mixture composition, proving a strong dependence of ionization signal on mixture composition [1, 22]. Modern methods of analysis for measuring signals SI engines are also based on artificial neural network models [4], which are broadly used in many fields of science [11, 12].

A significant disadvantage of the indirect measurement of mixture composition based on ionization in the cylinder is a considerable dispersion of such signal and local character of the sensor position, i.e. the spark plug located in the combustion chamber. Based on ionization signal in the cylinder, ignition can be controlled [6], yet the available literature offers little information on the suitability of this signal for fuel injection control. The aim of the present paper is to demonstrate the suitability of using ionization signal for fuel injection control owing to a much faster way of measuring mixture composition in the cylinder and better dynamics of the signal produced by the air-

(*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie www.ein.org.pl

fuel mixture composition sensor and its high correlation in the range λ between 0.9 and 1.1.

2. Fuel injection control

Fuel injection control is generally based on oxygen measurement in the exhaust gas by means of a lambda sensor. The sensor of combustible mixture in the exhaust gas has a serious disadvantage of time delay between a change in the mixture composition after injection and the sensor reaction to it, and the value of the time delay depends on whether the mixture changes from rich to lean (or the other way round) and on the sensor temperature [3].

Figure 1 illustrates the fuel injection control registered by the author for a production, four-cylinder car engine. In the experiments, an electronic controller allowing for injection time control was used. Figure 1 shows a reaction of the adjusting correction k_s to the changing, enforced by the author, characteristic of the injection model, expressed as the correction coefficient k . Figure 1a illustrates time intervals for the mixture that is too rich or too lean, occurring right after the disturbance of the injection model characteristic. The control delay is predominantly due to inertia of the air fuel mixture composition sensor. A similar process is shown in Figure 1b, where the rapid and quick change of the model coefficient k by 15 % led the system to adjust to the correct value only after nine seconds, which shows a long rich mixture time burn of the engine.

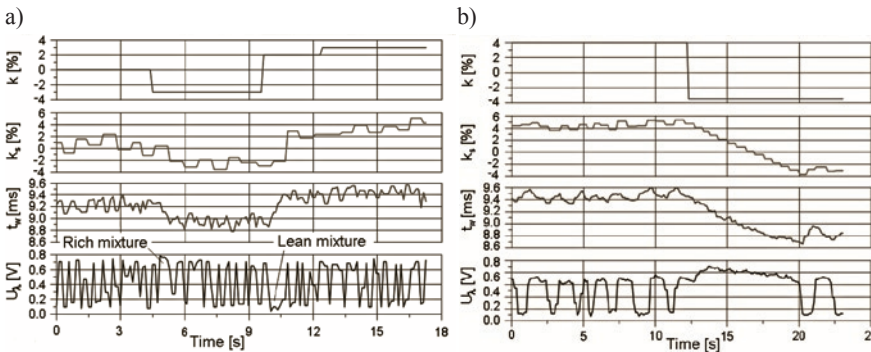


Fig. 1. Fuel injection control in a production, four-cylinder car engine during irregularly forced changes to controller injection model expressed as coefficient k (the author's own research)

3. Ionization signal in the combustion chamber of an internal combustion SI engine

Combustion in an SI engine is initiated by a spark breakdown on spark plug electrodes. The flame propagates along the spark plug and toward the combustion chamber walls, burning the air fuel mixture. Chemical reactions and a temperature increase inside the flame front led to the ionization of charged particles over the whole cylinder volume. The amount of the ionized charged particles is small, yet it can be measured. Following the voltage loss on the spark plug electrodes – i.e. the ionization sensor – a current is induced from free electric

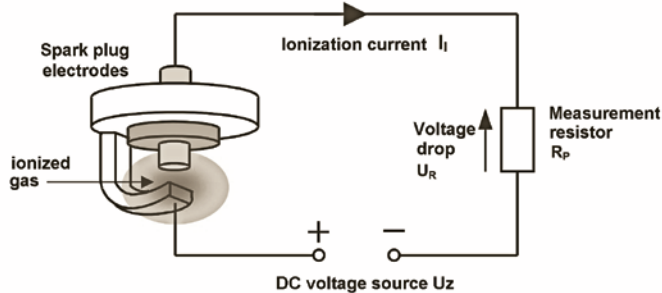


Fig. 2. Method for measuring ionization current between spark plug electrodes



Fig. 3. Measuring system used to measure ionization current in four cylinders

charges contained in the ions. This kind of current is referred to as ionization current.

3.1. Method of measurement

Figure 2 illustrates a circuit for measuring the ionization current. The system is powered by an external DC voltage U_z of 200 V [10]. The current I_i , which flows in the circuit, depends on the conductivity of a gas mixture between the spark plug electrodes in the combustion chamber, i.e. on the value of the ionized gases. The measurement is done on a measurement resistor, R_p , on which the voltage drop U_R (according to the Ohm's law) is proportional to the ionization current.

Figure 3 shows the author-designed measuring system that allows for measuring the ionization current simultaneously in four cylinders of the internal combustion engine.

3.2. Characteristic of the ionization signal in the experimental tests

The experimental tests were performed on a C20LE Holden gasoline engine with a multi-point fuel injection into the inlet manifold, adapted to LPG supply. The C20LE Holden is a four-stroke, four-cylinder, liquid cooled engine, with two valves per each cylinder moved by a single camshaft mounted in the head, equipped with a hydraulic valve adjustment. The engine has a direct ignition system DIS and is equipped with a mechanically controlled exhaust gas recirculation (EGR) valve.

In the experimental tests, a DTS-700 control system for an internal combustion SI engine, co-designed and constructed by the author at the Faculty of Mechanical Engineering at Lublin University of Technology. The apparatus is equipped with four communication interfaces RS232/422/485 and with CAN 2.0B that allow for supervisory computer control of the engine.

The experiments involved measuring the signal of the ionization current in the cylinder, at different values of the excess air coefficient, for set values of the air fuel mixture composition. In the experiments, the following were measured: the pressure signal for the fourth cylinder, the ionization current signal, and two signals describing the

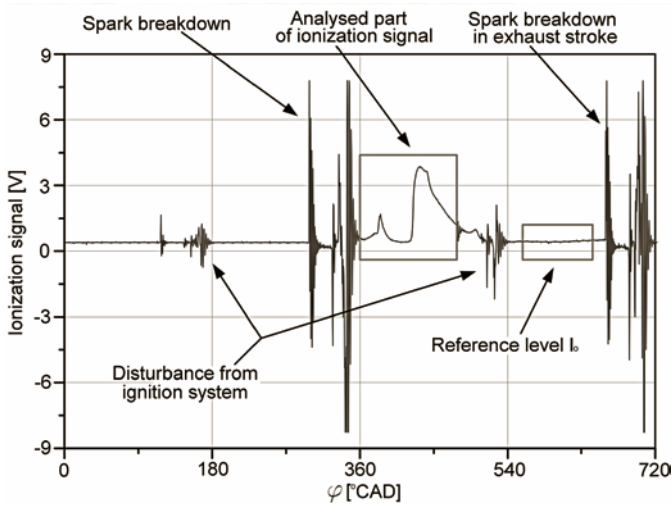


Fig. 4. Ionization signal measured in the fourth cylinder

mixture composition – one generated by the wideband lambda sensor and the other generated by the narrowband lambda sensor. Simultaneously, the TDC indicator signal was being measured.

The cylinder pressure was measured for two reasons:

- to detect potential cases of incorrect combustion (knocking, misfiring),
- to compare dispersions of the pressure signal and ionization signal in the consecutive engine cycles.

Figure 4 shows one of the registered ionization signal waveforms in the fourth cylinder. The following can be distinguished: spark breakdowns, ionization current signal, reference level as well as disturbances from the ignition system.

In order to obtain the required mixture composition, a wideband lambda sensor was used. The assumed mixture composition value was obtained by controlling the fuel injection time. The throttle position can analogically be altered, yet this process is much slower.

The ionization signal has three phases (Fig. 5) [5, 7, 14]:

- a) the ignition phase which lasts until discharge of a coil,
- b) the flame-front phase which covers the period of flame kernel formation until the flame front leaves the area of the spark plug – chemi-ionization is dominant in this phase,
- c) the post-flame phase which covers the remaining time of combustion inside the cylinder – thermal-ionization is dominant in this phase.

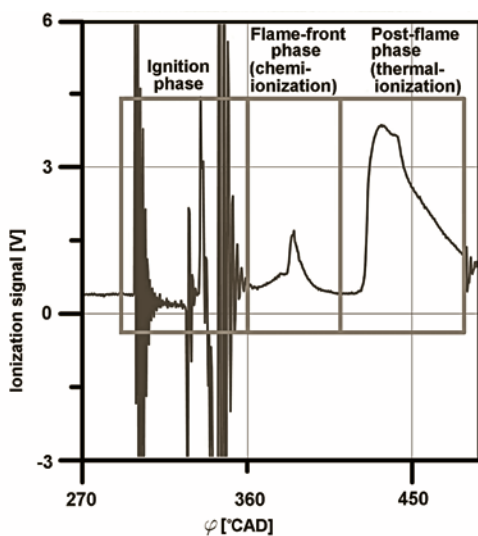


Fig. 5. Fragment of ionization signal characteristic with marked phases

When analyzing the ionization signal, the ignition phase is omitted due to the considerable effect of phenomena generated by the ignition system.

Based on the analysis of the available literature [5, 6, 7, 13, 14, 19, 20, 21] and test results obtained by the author in [8, 9, 10], it was decided that in further analysis a verifiable parameter, I_2 , would be used to describe ionization in the engine cylinder. This constitutes the mean value of the thermal ionization signal.

A model of the parameter I_2 was developed as a second degree polynomial (Fig. 6):

$$I_2 = -12,37 \cdot \lambda^2 + 20,29 \cdot \lambda - 7,09 \quad (1)$$

The correlation coefficient had a value of 0.995, while the quantile of correlation significance t was of 38.78, with only a 2.8 % share of the random component. Next, the rests were analyzed, which proved the normal distribution of the standard error δI_2 , at a test probability of 0.227. The stationarity test allowed for obtaining a quantile of the t-Student test t which had a value of 0.146, i.e. much smaller than the limit value ($t_{\alpha=0,05} = 1.782$). Also, the value of the t-Student test quantile obtained in the symmetry test of the random component was smaller than the limit value ($t = 0.146$), which confirmed the correctness of the model. The correctness of the model was only undermined by the randomness test of the random component, which resulted from a small number of data on which the model identification was based. With the other test results taken into consideration, the developed model can be considered as correct.

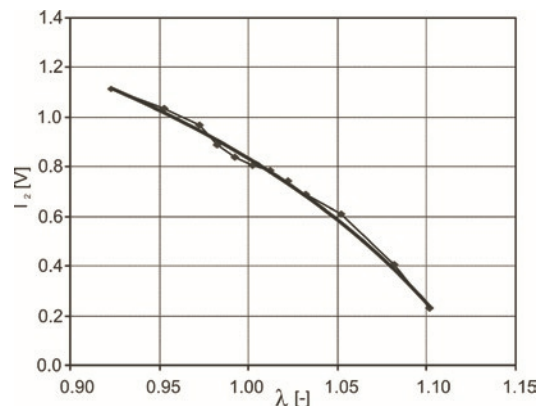


Fig. 6. Characteristics of parameter I_2 in function of λ

3.3. Comparison between the reactions of the oxygen sensor signal to lean burn and enrichment of air-fuel mixture composition

In order to compare the oxygen sensor reaction to lean burn and enrichment of the air-fuel mixture composition, some tests were conducted that involved determining time delay between fuel injection and feedback signals. The obtained results were then used to compare the delays in operation of the lambda sensor and ionization sensor.

The tests were performed at 1000 rpm rotational speed and 40 kPa mean pressure in the inlet system. The engine was in a steady thermal state. The temperatures of both the cooling agent and lubricating oil were maintained at the nominal level. At this stage, the tests consisted in decreasing or increasing the excess air coefficient by changing the injector opening time in an irregular manner.

Figure 7.a illustrates the excess air coefficient set by the fuel injection and the reaction of the classic oxygen sensor to the lean burn. Analogical data are presented in Figure 7.b. The difference between them lies in changing the mixture composition, from lean to rich. The determined time delay of the oxygen sensor signal was specified as

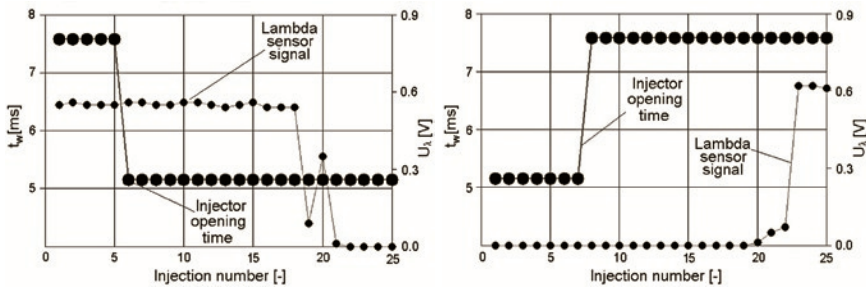


Fig. 7. Fuel injection timing and reaction of classic oxygen sensor to a) lean burning; b) enriching of air-fuel mixture composition

16 consecutive engine strokes (i.e. 16 consecutive fuel injections in a four-stroke, four-cylinder engine).

3.4. Estimating the mixture composition based on signals produced by the oxygen and ionization sensors

Having determined the time delay of the signal from the oxygen sensor relative to changes in the fuel injection time, a PI controller was designed, with the coefficient of mixture composition A_2 set to 0.1. The developed control algorithm was put into the DTS-700 electronic controller.

Figure 8 illustrates the timing for the excess air factor in the course of fuel injection control by the PI controller algorithm based on the lambda sensor signal. Two signals are compared: one estimated on the basis of the fuel injection and the other based on ionization and lambda sensor measurements.

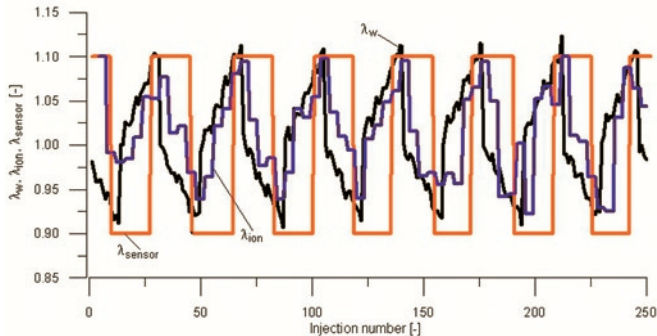


Fig. 8. Timing of excess air factor λ estimated on the basis of fuel injection λ_w , ionization signal λ_{ion} and lambda sensor signal λ_{sensor}

The value of the excess air factor generated during the fuel injection was calculated from the dependence:

$$\lambda_w = \frac{\bar{t}_w}{t_w} \tag{2}$$

where t_w denotes a consecutive value of fuel injection time, while \bar{t}_w denotes the mean value calculated on the basis of all values registered in the experiment (assuming control error symmetry).

The value of excess air coefficient estimated on the basis of the registered ionization signal I_2 was calculated in accordance with a converse model of the dependence (1).

$$\lambda = -0,11 \cdot I_2^2 - 0,05 \cdot I_2 + 1,12 \tag{3}$$

With regard to the lambda sensor signal, it was assumed that the voltage values of the oxygen sensor greater than 0.4 V would de-

note a rich mixture ($\lambda_{sensor} = 0.9$), while the values smaller than or equal to 0.4 V would denote a lean mixture ($\lambda_{sensor} = 1.1$). It should be stressed that the estimation of λ_{ion} was done four times more rarely compared to the signals λ_{sensor} and λ_w , which resulted from measuring the ionization current in only one cylinder of this four-cylinder engine.

The timings given in Figure 8 show that substituting the lambda sensor signal with an on-off control system by the ionization signal with an one-to-one characteristic and a slight nonlinearity and considerably wide range allows for a more accurate estimation of excess air factor values.

It should be stressed that the positive verification of using ionization signal to predict mixture composition will be even more positive after considering (measuring) ionization in all the engine cylinders.

4. Simulations of fuel injection control based on signals produced by the oxygen sensor and ionization sensor

In the simulations, the designed numerical model of a gasoline engine equipped with a control system as well as the results of the simulations conducted with this engine model were used.

The fundamental role of the model was to calculate control as injector opening time based on the injection time under steady conditions and the adjusting correction calculated in the PI controller. The data for calculating the injection time under steady conditions pertained to the assumed cylinder filling, ambient conditions and the adopted value of injector output. The PI controller coefficients were calculated based on the adopted deviation for the mixture composition and time delay of measuring the feedback signal. In the model, ionization signal also based on the signal noise model is simulated.

In the simulations, 10000-cycle fuel injections were calculated, for two types of estimating air-fuel mixture composition and for several variants of the PI controller coefficients.

4.1. Numerical model of the engine with the control system

When designing the model, the following assumptions were made:

- the simulations would involve operation of a four-cylinder engine with 2000 cm³ displacement;
- the cylinder would have 50% filling;
- the injector would be characterized by linear injection.

Given the number of calculations performed, only the final formulae have been presented [10].

The fuel mass injected into the engine:

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

where:

- m_{pal} – is the fuel mass,
- t_w – is the injection time,
- w_B – is the injector output constant set to 3.0 [mg/ms],
- $k(i)$ – is the coefficient of variation of the injection model [%].

The real excess air factor:

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

where:

- λ_w – is the calculated lambda value,
- m_{pow} – is the air mass,
- L_t – is the theoretical demand for combustion air set to 14.7 [kg air/ kg fuel].

The control coefficient $k_s(i)$:

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

where:

- $k_s(i)$ – denotes the injection control coefficient,
- t_w^M – denotes the basic injection time.

4.2. Simulation results

The simulations were performed for two measurement (estimation) variants of the excess air factor and the following eight values of the parameter A_λ : {0.005; 0.010; 0.015; 0.018; 0.020; 0.025; 0.030; 0.040}. In this way, a synthesis of the PI controller for both variants of mixture composition measurement was conducted.

The timings of the set variation coefficient of injection k_i , the controller response k_s , the fuel injection time t_w , and the air-fuel mixture composition λ directly after the injection are shown in Figures 9 and 10.

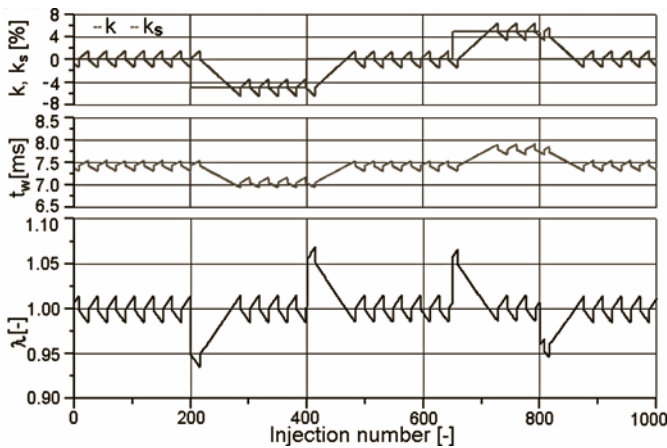


Fig. 9. Injection control with mixture composition measured by oxygen sensor at $A_\lambda = 0.015$

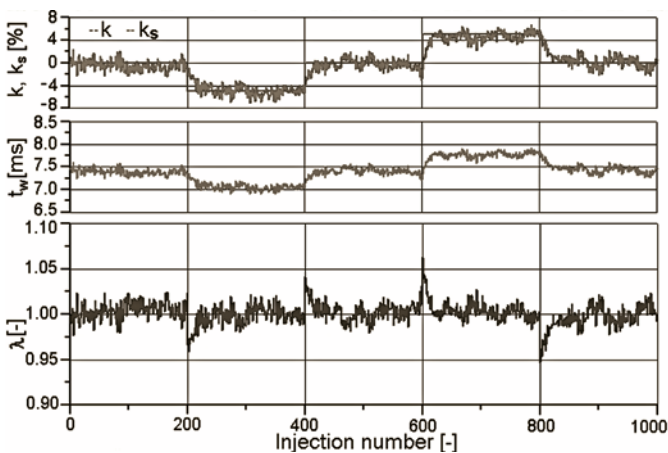


Fig. 10. Injection control with mixture composition measured by ionization sensor at $A_\lambda = 0.015$

4.3. Result analysis

For both variants, three stabilization coefficients of mixture composition were calculated. The following definitions of stabilization coefficients were taken:

1) $\delta_{\lambda 1}$ denotes the coefficient of control error energy $\varepsilon(i)$:

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

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

2) $\delta_{\lambda 2}$ denotes the coefficient of maximum control error:

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

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

where i_{\max} is the maximum error coefficient $\varepsilon(i)$.

3) $\delta_{\lambda 3}$ denotes the mean error coefficient, defined as:

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

where:

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

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

Figure 11 offers a comparison of the dependence of the stabilization coefficients $\delta_{\lambda 1}$, $\delta_{\lambda 2}$ and $\delta_{\lambda 3}$ on the coefficient A_λ . In each presented case, the advantage of the controller using the ionization signal to estimate the mixture composition can be observed.

The optimum values of the PI controllers are located in the vicinity of A_λ equal to 2%, which is consistent with the observations made for real gasoline engines.

The performed simulations demonstrated the advantage of the controller using the measurement of ionization in the cylinder over the controller using the signal from the classic lambda sensor.

5. Conclusions

1. The conducted experimental tests have confirmed the suitability of using an ionization transducer in the combustion chamber to estimate values of mixture composition in the fuel injection control system.
2. A considerable dependence of the I_2 parameter characterizing the ionization signal on the λ coefficient (of the air-fuel mixture composition) was proved. The linear correlation in the range λ between 0.9 and 1.1 exceeded 0.99.
3. It was observed that the time distance between the ionization signal and fuel injection was equal to three power strokes of a four-cylinder, four-stroke engine with injection to the inlet manifold.
4. It was observed that the time distance between the signal from the oxygen sensor and fuel injection was equal up to dozens of power strokes of the four-cylinder, four-stroke engine with injection to the inlet manifold.

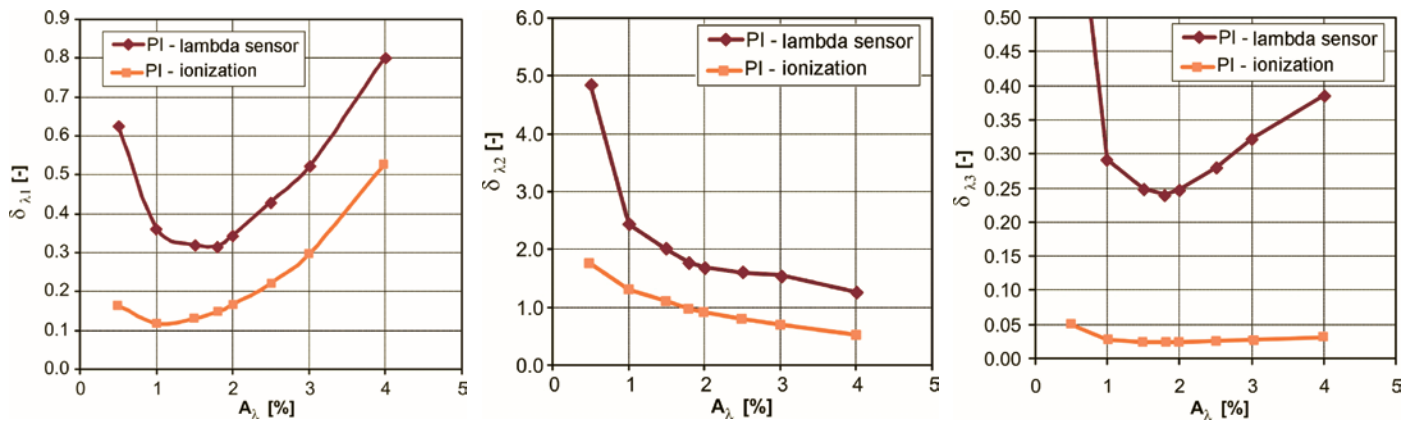


Fig. 11. Dependence of stabilization coefficients $\delta_{\lambda,1}$, $\delta_{\lambda,2}$, $\delta_{\lambda,3}$ on coefficient A_λ for both control variants

- By adding to the car engine control algorithm a spark plug ionization signal, an individual control of the mixture composition coefficient in each cylinder will be possible.

References

- 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.
- Abhijit A, Naber J. Ionization Signal Response during Combustion Knock and Comparison to Cylinder Pressure for SI Engines, SAE SP 2009; 2159: 25–40.
- Ambrozik A, Kruczyński S, Łączyński J, Tomaszewski D. Badania sygnałów z sond lambda w trójfunkcyjnym reaktorze katalitycznym na potrzeby OBD II. Journal of KONES 2002; 12(3): 5–9.
- 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.
- Eriksson L, Nielsen L, Glavenius M. Closed Loop Ignition Control by Ionization Current Interpretation. SAE Technical Paper 1997; doi:10.4271/970854.
- Eriksson L, Nielsen L. Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines. Control Eng Pract 1997; 5 (8): 1107–1113.
- Eriksson L, Nielsen L, Nytoft J. Ignition control by ionization current interpretation. SAE Technical Paper 1996; doi:10.4271/960045.
- 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.
- Filipek P. Badania poziomu jonizacji w komorze spalania silnika spalinowego o zapłonie iskrowym. Folia Societatis Lublinensis 2002; 11: 66–73.
- Filipek P. Sterowanie wtryskiem benzyny w silniku o zapłonie iskrowym z wykorzystaniem sygnału jonizacji w komorze spalania. Rozprawa doktorska Politechnika Lubelska 2006.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Minelli G, Moro D, Solieri L, Cavina N, Corti E. Knock indexes normalization methodologies. SAE Technical Paper 2006; doi:10.4271/2006-01-2998.
- 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.
- 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.
- 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.

Nomenclature

A_λ	–	assumed amplitude of variation of excess air factor,
I_{jon}	–	ionization current,
I_0	–	reference current for ionization signal,
I_2	–	thermal ionization signal value,
I_I	–	ionization current in measuring circuit,
$k(i)$	–	coefficient of variation of injection model [%],
$k_s(i)$	–	injection control coefficient [%],
L_t	–	theoretical combustion air demand,
m_{pal}	–	fuel mass,
m_{pow}	–	air mass,
$^{\circ}\text{CAD}$	–	crankshaft angle degrees,
R_p	–	resistance of measurement resistor,
t_w^M	–	basic injection time,
t_w	–	injection time [ms],
U_R	–	voltage drop on measurement resistor,
U_z	–	DC voltage in ionization current measuring circuit [V],
U_{jon}	–	voltage of measuring ion density in combustion chamber,
U_λ	–	lambda signal voltage [V],
w_B	–	injector output constant,
ΔI_2	–	thermal-ionization signal deviation,
Δt_w	–	injection time correction,
δ_λ	–	quality control coefficient,
λ	–	oxygen content in exhaust gases,
λ_{jon}	–	calculated value of lambda based on ionization,
λ_{sonda}	–	lambda sensor signal,
λ_w	–	calculated value of lambda.

Przemysław FILIPEK, Ph.D. (Eng.)

Department of Machine Design
 Faculty of Mechanical Engineering
 Lublin University of Technology
 ul. Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin, Poland
 e-mail: p.filipek@pollub.pl

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].

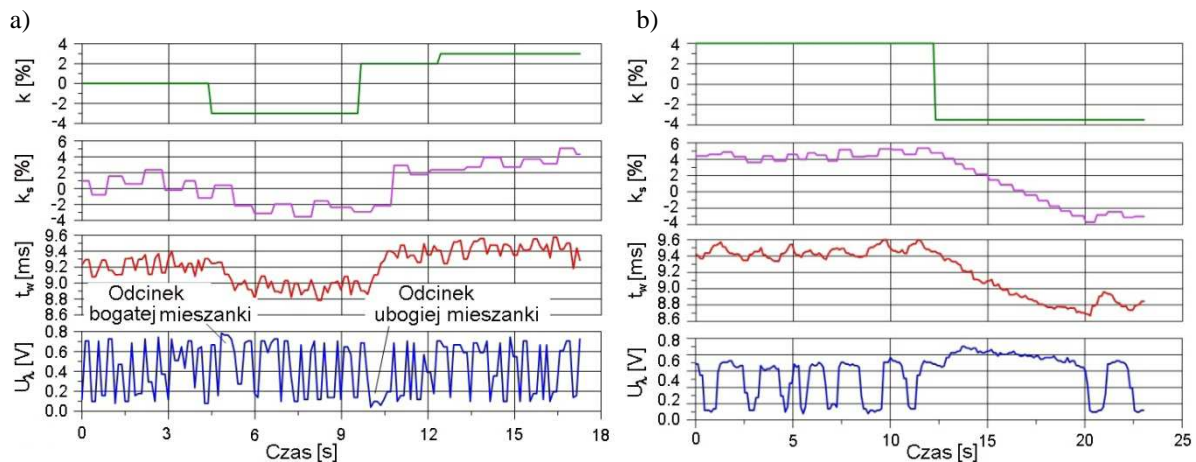
Pomiar prądu jonizacji gazu w cylindrze silnika spalinowego wielokrotnie już wykorzystywano do wykrywania spalania stukowego [2, 16, 18], diagnostyki wypadania zapłonów [17], określania temperatury [13], szacowania ciśnienia w cylindrze [15, 19, 21], czy szacowania składu mieszanki paliwowo-powietrznej, 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.



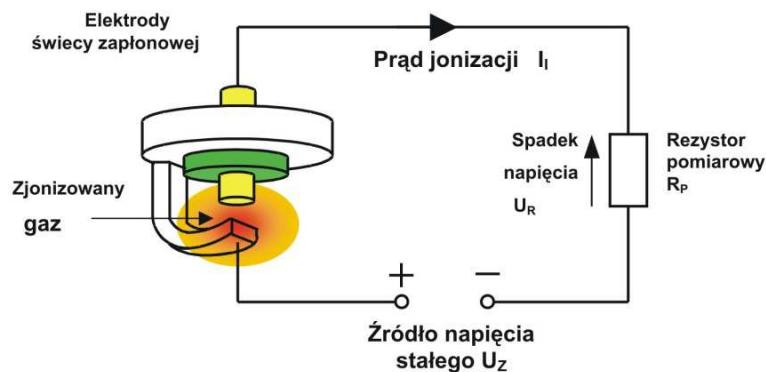
Rys. 1. Przebiegi regulacji wtrysku paliwa w produkcyjnym, czterocylindrowym silniku samochodowym w czasie skokowo wymuszanych zmian modelu wtrysku w sterowniku wyrażanych współczynnikiem k (badania autora)

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

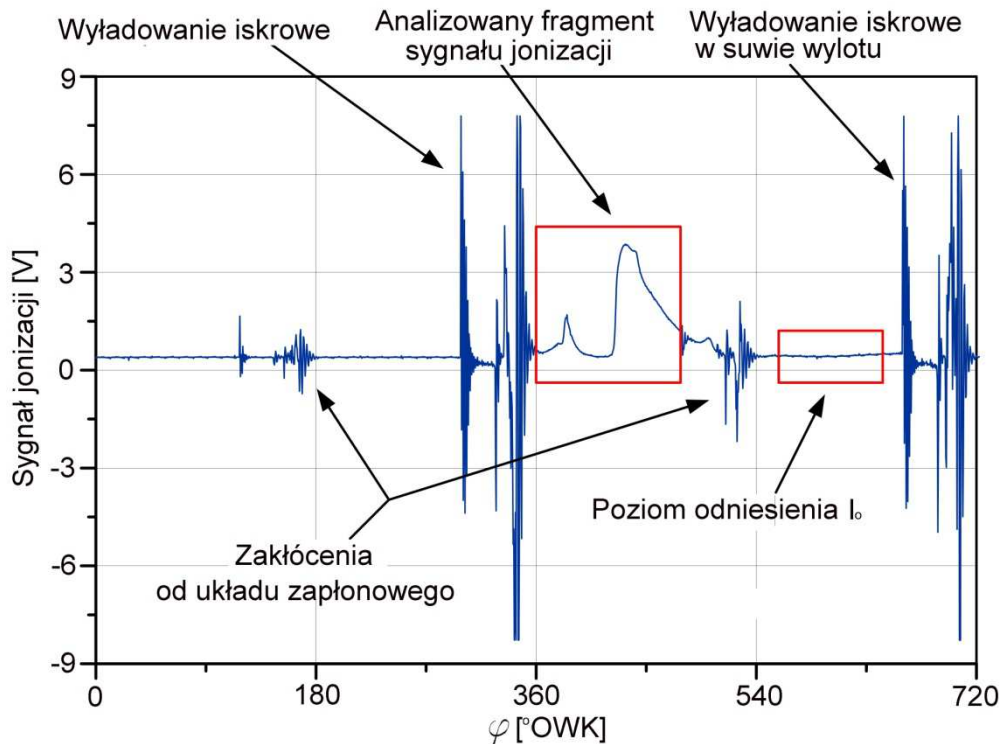
Badania doświadczalne przeprowadzono na benzynowym silniku C20LE Holden z wielopunktowym wtryskiem benzyny do kolektora dolotowego, przystosowanym do zasilania gazem LPG. C20LE Holden to czterosurowy, czterocylindrowy silnik chłodzony cieczą, z dwoma zaworami na cylinder poruszanymi pojedynczym wałkiem 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

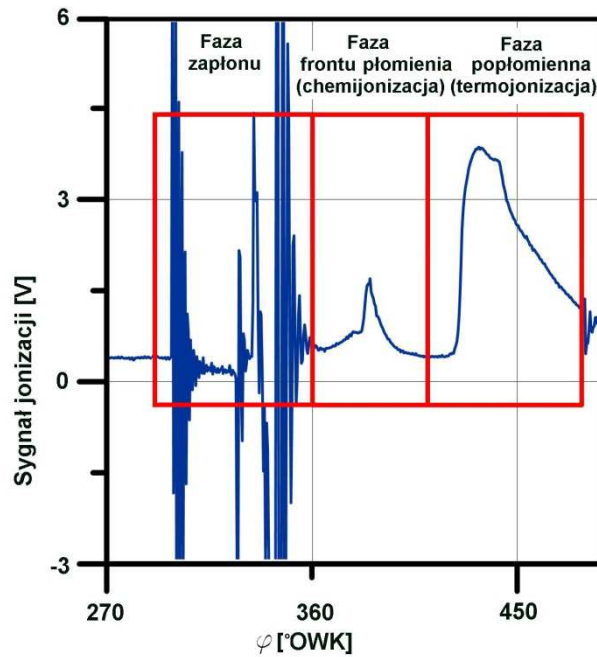
Aby uzyskać określony w badaniach skład mieszanki, korzystano z pomiarów szerokozakresowej sondy lambda. Dopasowanie do założonej wartości składu mieszanki otrzymywano poprzez sterowanie czasem wtrysku paliwa. Analogicznie można również zmieniać położenie przepustnicy, lecz sterowanie to jest znacznie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

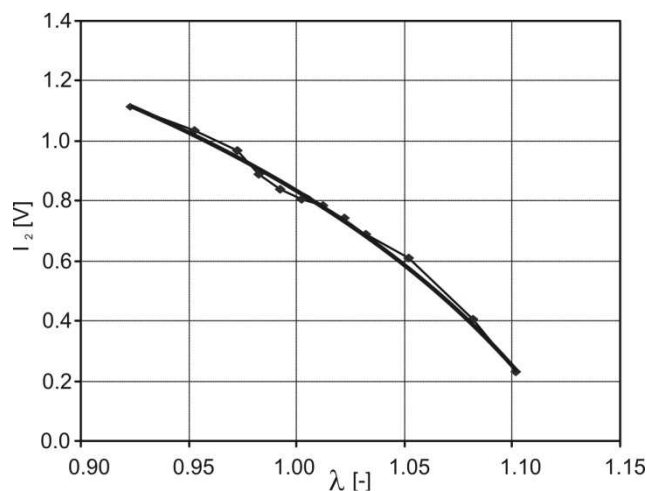


Rys. 5. Fragment charakterystyki sygnału jonizacji z oznaczonymi fazami

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.



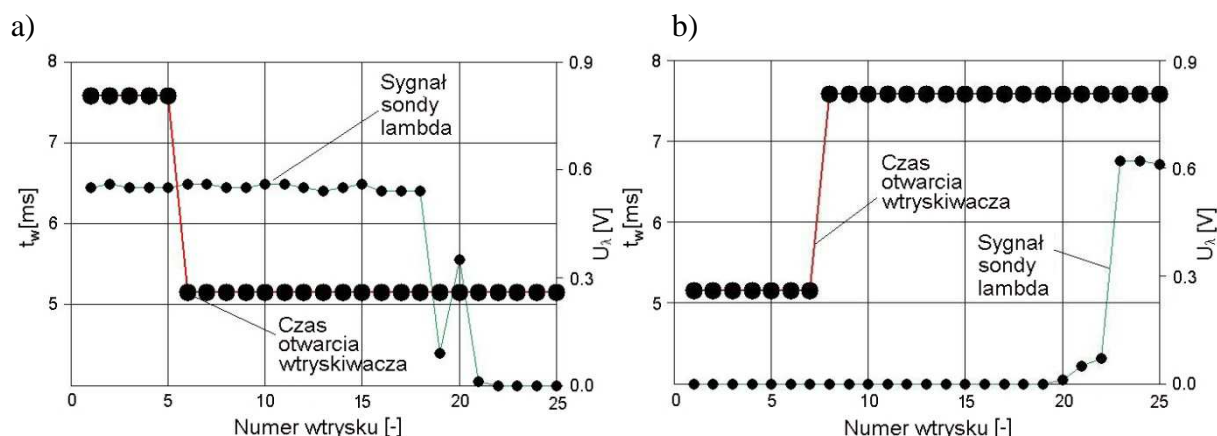
Rys. 6. Charakterystyka parametru I_2 w funkcji λ

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).

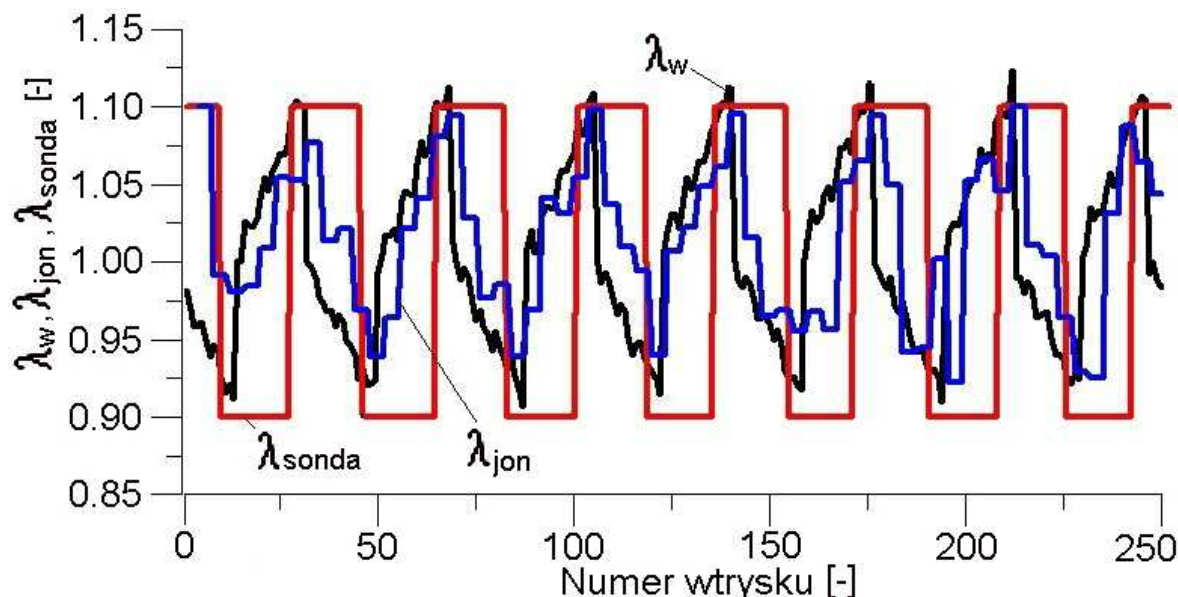


Rys. 7. Przebieg czasu wtrysku benzyny oraz reakcja klasycznego czujnika tlenu na skokowe a) zubożenie; b) wzbogacenie; mieszanki paliwowo-powietrznej

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 błędów 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 $k_s(i)$:

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

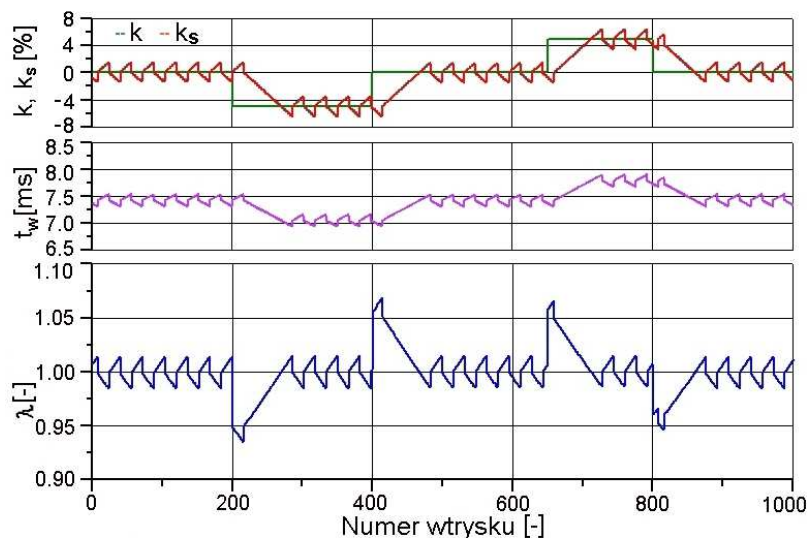
gdzie:

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

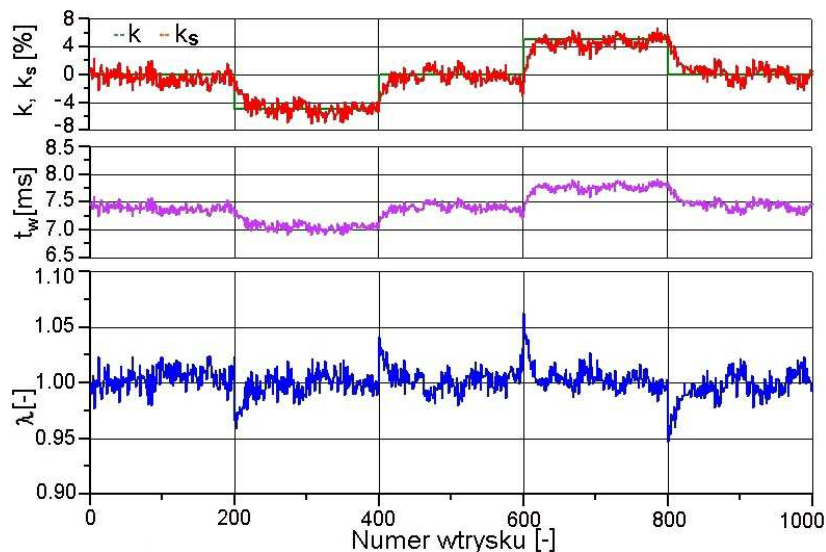
4.2. Wyniki badań symulacyjnych

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:

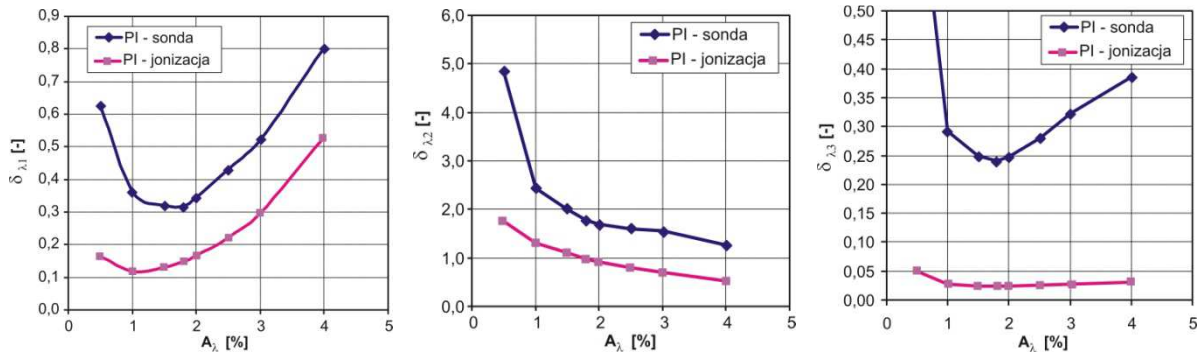
$$\delta_{\lambda 3} = \frac{\delta}{j_{\max}} \quad (10)$$

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.