

DEVELOPMENT OF MEASUREMENT SYSTEM OF IONIZATION IN COMBUSTION CHAMBER OF SPARK IGNITION ENGINE

Przemysław Filipek²
Tomasz Kamiński¹
Izabella Mitraszewska¹
Gabriel Nowacki¹
Mirosław Wendeker²
Andrzej Wojciechowski¹

¹ Instytut Transportu Samochodowego
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa
tel.: +48 22 8113231 w. 129, fax: +48 22 8110906
e-mail: tomasz.kaminski@its.waw.pl, tk42@o2.pl

² Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36, Lublin
tel. +48 81 5381272, +48 81 5381499
e-mail: m.wendeker@pollub.pl, p.filipek@pollub.pl

Abstract

The article refers to measurement system of ionization in combustion chamber of spark ignition engine. There is analyzed phenomena proceed in combustion chamber during effective steering of work process of combustion engine. Information on combustion working process can be used by measurements, as pressure, light wave emission or degree of working gases ionization. Two first methods of measurement require application of additional elements in combustion chamber, but third method uses ignition coil as ionization sensor. Analyse of ionization signal makes assessment possible air-to-fuel ratio in exhaust gases, and also obtain some information as presence of light detonation, misfire detection or combustion speed. The measurement idea of ionization degree in combustion chamber based on utilization of gas ionization as resistor of variable value of resistance depends on degree of gas ionization. This measurement based on evaluation of electric gas conductivity. The carriers of electrical charges (ions) are generated during chemical combustion reactions in the flame.

Three developed versions of measurement set are presented. The last one concerns increase voltage between electrodes of ignition coil. There were abandoned measurement of release by ignition detection set and constant time of holding measurement from the problem of length evaluation of "measurement window". Signal from detection set was transmitted simultaneously with signal of ionization to measurement card.

Keywords: internal combustion engine, ionization current, in-cylinder sensor, diagnostics

ROZWÓJ UKŁADU POMIARU JONIZACJI W KOMORZE SPALANIA SILNIKA O ZAPŁONIE ISKROWYM

Streszczenie

Celem efektywnego sterowania pracą silnika spalinowego z jednoczesnym uwzględnieniem norm emisji spalin należy dokładnie analizować zjawiska zachodzące w komorze spalania silnika spalinowego. Dostatecznie dokładne informacje o przebiegu procesu roboczego mogą być uzyskane poprzez pomiar ciśnienia, emisji fal świetlnych jak również stopnia jonizacji gazu roboczego. Dwie pierwsze metody wymagają wprowadzenia do cylindra dodatkowych elementów i zastosowania czujników, natomiast trzecia wykorzystuje świecę zapłonową jako czujnik jonizacji, bez ingerencji w konstrukcję silnika. Analiza sygnału jonizacji pozwala na ocenę nadmiaru tlenu w spalinach (współczynnik lambda) a także na uzyskanie takich informacji jak obecność spalania stukowego czy braku zapłonu mieszanki a nawet prędkości spalania. Zjonizowany gaz roboczy charakteryzuje się przewodnością elektryczną. Idea

pomiaru stopnia jonizacji w komorze spalania polega na wykorzystaniu zjonizowanego gazu jako „rezystora” o zmiennej wartości rezystancji, zależnej od stopnia jonizacji gazu. Pomiar ten polega zatem na wyznaczeniu przewodności elektrycznej gazu. Mniejsza rezystancja jest rezultatem wzrostu natężenia jonizacji. Powstające podczas spalania jony, będące w istocie nośnikami ładunku elektrycznego, wytwarzane są przez reakcje chemiczne zachodzące w płomieniu.

W pracy przedstawiono trzy, kolejne wersje rozwojowe układu pomiarowego. W ostatecznej wersji zwiększono napięcie między elektrodami świecy zapłonowej. Ze względu na problem z oceną długości „okna pomiarowego”, w kolejnej wersji układu zrezygnowano z wyzwalania pomiaru przez układ detekcji zapłonu i stałego czasu pomiaru. Sygnał z układu detekcji przekazywany był jednocześnie z sygnałem jonizacji do karty pomiarowej. Sygnał jonizacji przetwarzano z wykorzystaniem sygnału z układu detekcji zapłonu. Artykuł zakończono wnioskami.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, czujnik, jonizacja, diagnostyka

1. Wstęp

Celem efektywnego sterowania pracą silnika spalinowego z jednoczesnym uwzględnieniem norm emisji spalin należy dokładnie analizować zjawiska zachodzące w komorze spalania silnika spalinowego. Dostatecznie dokładne informacje o przebiegu procesu roboczego mogą być uzyskane poprzez pomiar w komorze spalania [2]:

- ciśnienia,
- emisji fal świetlnych,
- stopnia jonizacji gazu roboczego.

Dwie pierwsze metody wymagają wprowadzenia do cylindra dodatkowych elementów i zastosowania czujników, natomiast trzecia wykorzystuje świecę zapłonową jako czujnik jonizacji, bez ingerencji w konstrukcję silnika. Metoda ta ma zastosowanie praktycznie w każdym silniku spalinowym o zapłonie iskrowym. Ze względu na brak świecy zapłonowej silniki o zapłonie samoczynnym wymagają zastosowania dodatkowego czujnika jonizacji, który musi być umieszczony w komorze spalania.

Analiza przebiegu sygnału jonizacji umożliwia otrzymanie wielu informacji o przebiegu spalania i parametrach pracy silnika, co pozwala na uzupełnienie stosowanych dotychczas czujników, takich jak czujnik tlenu w spalinach (sonda lambda) [1]. Klasyczna odmiana tego czujnika, stosowana powszechnie w niemalże wszystkich samochodach wyposażonych w silnik benzynowy, posiada szereg wad, do których należą [2]:

- długi czas reakcji na zmianę składu spalanej mieszanki połączony ze skokową charakterystyką,
- uśrednianie wartości współczynnika składu mieszanki dla wszystkich cylindrów,
- relatywnie wysoka cena,
- długi okres nagrzewania, podczas którego sonda nie dostarcza wiarygodnych informacji o zawartości tlenu w spalinach (300°C – początek pracy, 600°C - temperatura prawidłowego działania).

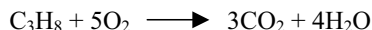
Wady te utrudniają precyzyjne sterowanie procesem spalania, a także komplikują algorytm wyznaczania współczynnika korekcji czasu wtrysku.

Coraz większą popularność zdobywa alternatywne rozwiązanie problemu oceny składu mieszanki, polegające na pomiarze wartości prądu jonizacji. Daje on duże możliwości związane ze sterowaniem i diagnozowaniem przebiegu procesu spalania [1]. Analiza sygnału pozwala dodatkowo na uzyskanie takich informacji jak obecność spalania stukowego czy braku zapłonu mieszanki a nawet prędkości spalania. Stopień jonizacji zależy od temperatury panującej w cylindrze, która jest z kolei silnie skorelowana z ciśnieniem.

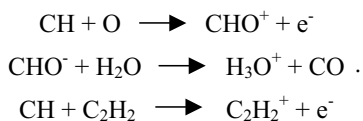
2. Idea działania układu pomiaru jonizacji

Proces spalania w silniku benzynowym zapoczątkowany jest przeskokiem iskry. Między elektrodami świecy gwałtownie rośnie temperatura, w krótkim czasie osiągając tysiące stopni

Celsjusza. Intensywna jonizacja gazu spowodowana wyładowaniem iskrowym powoduje rozpoczęcie reakcji chemicznych spalania. Odstęp pomiędzy elektrodami stanowi przerwę w obwodzie układu zapłonowego, którą musi pokonać prąd elektryczny po doprowadzeniu odpowiednio wysokiego napięcia. Pomiedzy elektrodami zaczyna płynąć prąd elektryczny tworząc tzw. kolumnę plazmową (składającą się z atomów niewzbudzonych, atomów wzbudzonych, jonów dodatnich, jonów ujemnych, swobodnych elektronów i fotonów). Przepływ prądu przyjmuje postać wyładowania iskrowego w silnie sprężonym gazie i ma inny charakter niż przepływ prądu w metalu, ponieważ ładunki elektryczne przenoszone są przez cząsteczki gazu, który podczas wyładowania dostarcza dużej ilości jonów i wolnych elektronów. Zjonizowany gaz charakteryzuje się przewodnością elektryczną. Idea pomiaru stopnia jonizacji w komorze spalania polega na wykorzystaniu zjonizowanego gazu jako „rezystora” o zmiennej wartości rezystancji, zależnej od stopnia jonizacji gazu. Pomiar ten polega zatem na wyznaczeniu przewodności elektrycznej gazu. Mniejsza rezystancja jest rezultatem wzrostu natężenia jonizacji. Zapoczątkowany od iskry elektrycznej proces spalania mieszaniny paliwowo-powietrznej powoduje wzrost temperatury i ciśnienia w cylindrze przez co zachodzą tam intensywne procesy chemiczne i fizyczne. W idealnym procesie spalania, cząsteczki węglowodorów C_xH_x reagują z cząsteczkami tlenu wytwarzając dwutlenek węgla CO_2 i parę wodną H_2O . Reakcję przedstawiającą proces spalania idealnego w silniku spalania wewnętrznego można zapisać następująco:



Jony wytwarzane są przez reakcje chemiczne zachodzące w płomieniu. Powstają również, podczas wzrostu temperatury i ciśnienia. Poniżej przedstawiono elementarne reakcje chemiczne, podczas których wytwarzane są jony [3]:



Pozostałe jony powstają na skutek oddziaływania temperatury i ciśnienia:

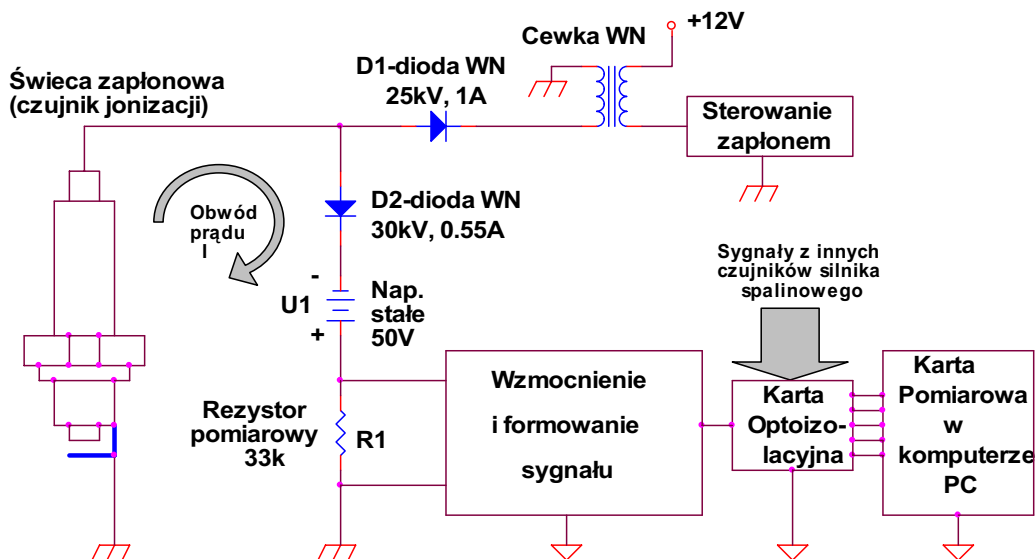


Najwięcej jonów generowanych jest w warunkach wzrostu energii wewnętrznej gazu roboczego. Jony generowane przez płomień mają zróżnicowaną prędkość. Niektóre przekształcają się błyskawicznie w bardzo stabilne cząsteczki podczas gdy inne potrzebują dłuższego czasu. Te, których czas istnienia jest względnie długi to H_3O^+ jak i C_3H^+ . Dodatkowo jony wraz z elektronami stają się głównymi nośnikami prądu jonizacji.

3. Prototypowy układ pomiaru jonizacji w komorze spalania

Na rysunku 1 przedstawiono schemat elektryczny zastosowanego w pierwszej fazie badań układu do pomiaru jonizacji w cylindrze. Z układu sterowania zapłonem podawany jest impuls ujemny na uzwojenie pierwotne cewki wysokiego napięcia (WN). W uzwojeniu wtórnym tej cewki indukują się SEM o napięciu około 25 kV. Ujemny impuls wysokiego napięcia przepływa przez diodę WN (D1) i dociera do elektrody świecy zapłonowej. Jednocześnie druga dioda WN (D2) jest spolaryzowana zaporowo i zabezpiecza układ pomiarowy przed przepięciem. Pomiedzy elektrodami świecy (która jest w istocie czujnikiem jonizacji) następuje wyładowanie iskrowe i zapłon mieszanki paliwowo-powietrznej. Zjonizowana mieszanina gazu przewodzi prąd w obwodzie pomiarowym o natężeniu tym większym, im większy jest stopień jonizacji pomiędzy elektrodami świecy. Przepływ prądu jest wymuszony przez źródło napięcia stałego ($U_1 = 50 V$),

przy czym napięcie U_1 musi posiadać potencjał przewyższający spadek napięcia na diodzie D2. Obwód prądowy pomiaru jonizacji (oznaczony szarą obrotową strzałką) składa się ze źródła napięcia stałego ($U_1 = 50\text{ V}$), elementu pomiarowego (rezystora R1), diody WN (D2) oraz świecy zapłonowej. Prąd płynący przez element pomiarowy (R1) powoduje powstanie na nim spadku napięcia, które jest wejściowym sygnałem układu wzmacniająco-formującego, zbudowanego z wykorzystaniem wzmacniacza operacyjnego.



Rys. 1. Schemat układu badawczego do pomiaru jonizacji w cylindrze
 Fig. 1. Scheme of investigation system used to ionization level measure in engine combustion chamber

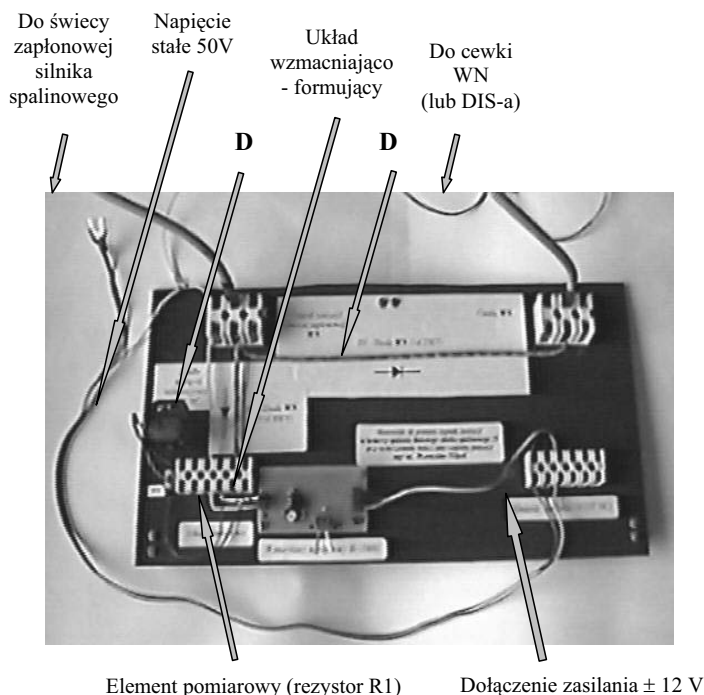
Sygnal ten jest wzmacniany 1000-krotnie i formowany w celu uzyskania amplitudy w zakresie napięcia odpowiedniego dla zastosowanej karty pomiarowej. W przypadku opisywanego urządzenia zakres pomiarowy karty wynosi $\pm 5\text{ V}$. Następnie sygnał pomiarowy jest separowany galwanicznie (dzięki karcie optoizolacyjnej) od obwodów wejściowych karty pomiarowej, by zabezpieczyć ją przed ewentualnymi przepięciami. Oprócz sygnału z układu pomiaru jonizacji do karty pomiarowej (poprzez kartę optoizolacyjną) dołączone są sygnały innych czujników silnika co pozwala na jednoczesną obserwację i rejestrację wpływu zmian warunków procesu spalania na charakterystyki czasowe wszystkich sygnałów.

Pokazany na rysunku 2 układ pomiarowy zasilany jest z niezależnego zasilacza stabilizowanego o napięciu znamionowym $\pm 12\text{ V}$ w celu zminimalizowania zakłóceń wprowadzanych przez napięcie sieci elektrycznej o częstotliwości 50 Hz. Przyłączenie układu do silnika polega na podłączeniu pomiędzy cewkę a świecę zapłonową dwóch przewodów WN odpowiednio do cewki (lub DIS-a) oraz do świecy zamontowanej w silniku.

3. Układ pomiaru jonizacji drugiej generacji

Prototypowy układ pomiaru jonizacji został wykorzystany do badań z wykorzystaniem silnika benzynowego o zapłonie iskrowym – 1.5 AE, zainstalowanego w hamowni silnikowej Politechniki

Lubelskiej. Pomiary wykazały istotną korelację przebiegu zarejestrowanego sygnału jonizacji do sygnału ciśnienia indykowanego. Kolejna wersja układu pomiarowego została przystosowana do jednoczesnego pomiaru jonizacji w czterech cylindrach silnika (rys. 3). Była ona w istocie multiplikowaną wersją opisanego powyżej układu pomiarowego.



Rys. 2. Układ badawczy do pomiaru jonizacji w komorze spalania silnika
Fig. 2. Investigation system used to ionization level measure in engine combustion chamber



Rys. 3. Układ pomiaru jonizacji drugiego typu (drugiej generacji)
Fig. 3. Second generation of ionization measurement system

W celu dodatkowej ochrony układu pomiarowego i poprawienia jakości uzyskiwanego sygnału pomiarowego zastosowano układ detekcji zapłonu, który włączał poprzez elektroniczne okno czasowe układ pomiarowy tuż po zakończeniu wyładowania iskrowego. Badania zostały wykonane na silniku C20LE firmy Holden. Otrzymany sygnał pomiarowy cechował jednak zbyt duży poziom szumów uniemożliwiający przeprowadzenie poprawnego pomiaru. Zastosowanie „okna pomiarowego” (okresowe włączanie części pomiarowej układu) powodowało wzrost

amplitudy całego sygnału. Ponadto nie spełniało ono swojego zadania, ponieważ czas trwania pomiaru (długości okna pomiarowego) był ustalany przed rozpoczęciem pomiaru, zaś czas trwania jonizacji gazu w komorze spalania zmieniał się w zależności od warunków pracy silnika takich jak prędkość obrotowa wału korbowego czy obciążenie. Zjawisko to nasilało się szczególnie przy większych prędkościach obrotowych. W tych warunkach „okno pomiarowe” nie mogło poprawnie spełniać swojej roli.

4. Ostateczna koncepcja układu pomiaru jonizacji

Schemat ideowy ostatecznej wersji układu pomiaru jonizacji został przedstawiony na rysunku 4. Jest on zbudowany z pięciu części:

- zasilającej,
- wysokonapięciowej z diodami zabezpieczającymi,
- wzmacniającej,
- obwodu pomiarowego,
- detektora impulsów zapłonowych.

W ostatecznej wersji układu pomiarowego zwiększono (w celu uzyskania większej amplitudy sygnału jonizacji) napięcie między elektrodami świecy zapłonowej do 200 V. Ze względu na problem z oceną długości „okna pomiarowego” w kolejnej wersji układu pomiarowego zrezygnowano z wyzwalania pomiaru przez układ detekcji zapłonu i stałego czasu pomiaru. Sygnał z układu detekcji przekazywany jest jednocześnie z sygnałem jonizacji do karty pomiarowej. Ostateczne przetwarzanie sygnału pomiarowego wykonywane jest przez oprogramowanie zainstalowane w komputerze. Sygnał jonizacji jest przetwarzany z wykorzystaniem sygnału z układu detekcji zapłonu.

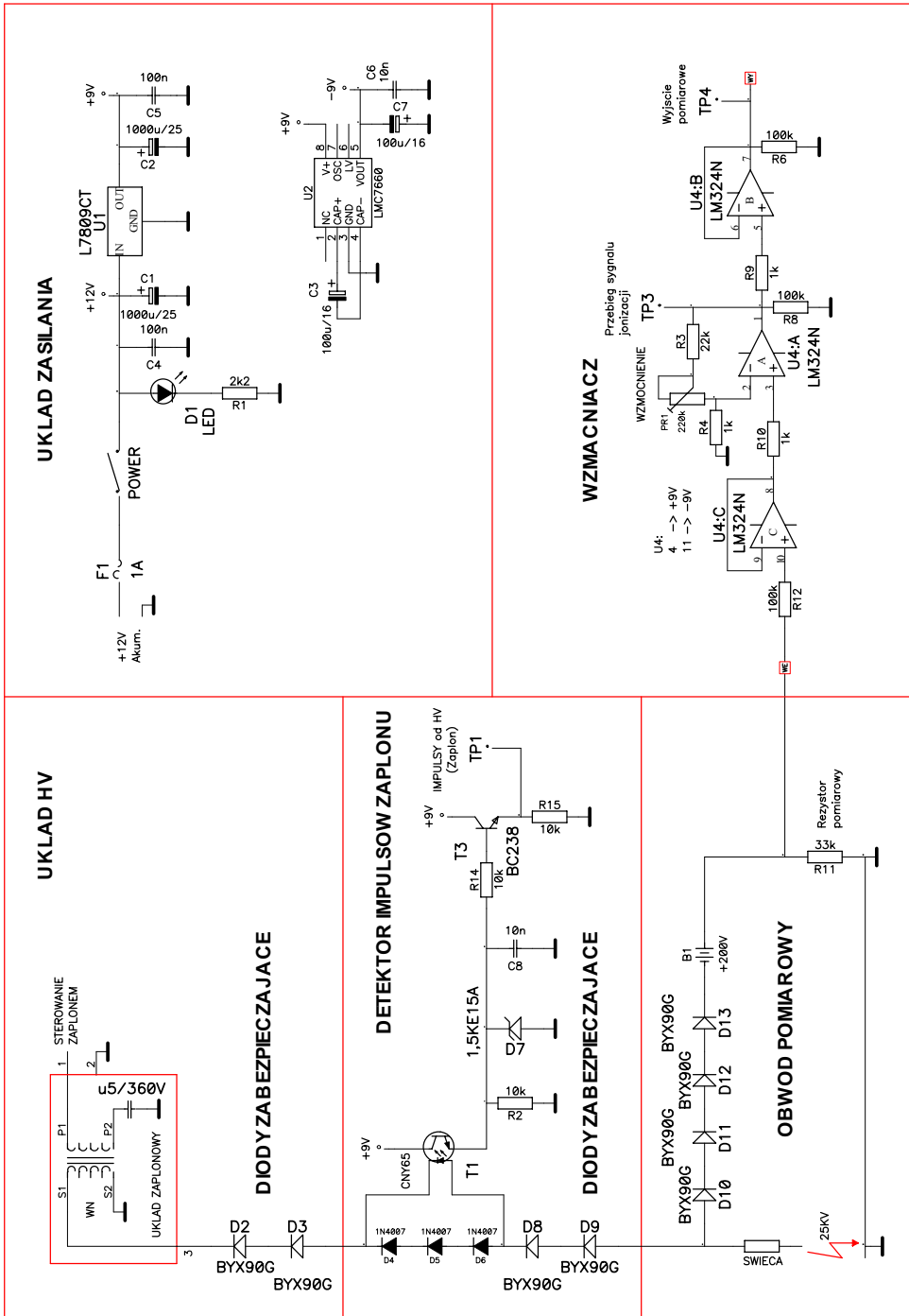
Część zasilająca stabilizuje napięcie 12 V z akumulatora na poziomie 9 V o podwójnej polaryzacji. Prąd o napięciu 12 V płynie przez bezpiecznik i wyłącznik do stabilizatora scalonego U1, który obniża je do wartości +9 V. Napięcie to, za pomocą scalonej przetwornicy U2 przetwarzane jest na napięcie o przeciwnej polaryzacji – 9 V.

Część wysokonapięciowa układu pomiarowego związana jest bezpośrednio z układem zapłonowym. Występują tu napięcia rzędu 25 kV otrzymywane z cewki zapłonowej. Ponieważ obwód pomiarowy współpracuje bezpośrednio ze świecą zapłonową, zastosowano układ czterech diod wysokiego napięcia (D2, D3, D8, D9) które w zabezpieczają wejście wzmacniacza przed pojawieniem się wysokiego napięcia z układu zapłonowego. Wzmacniacz zbudowany został na układach scalonych. Zarówno na wejściu jak i na wyjściu zastosowano wtórnik emiterowy aby zapewnić dopasowanie sygnałów i nie powodować obciążeń mogących wpływać na napięcie sygnału pomiarowego. Pomiędzy tymi elementami umieszczono właściwy wzmacniacz (U4A) o regulowanym wzmacnieniu $K_{Umax} = 250$.

Obwód pomiarowy składa się ze świecy zapłonowej, diod D10-D13, baterii B1 oraz rezystora pomiarowego R11.

Jeżeli pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej nie nastąpiło w danej chwili wyładowanie iskrowe, ani nie ma w jej otoczeniu zjonizowanego gazu, prąd w obwodzie nie płynie.

Detektor impulsów zapłonowych zbudowany został z transoptora o dużym napięciu izolacji (T1), diod D4-D6, układów zabezpieczająco-filtrujących i wzmacniacza (T3). Podczas impulsu wysokiego napięcia podawanego z cewki zapłonowej, na diodach D4-D6 pojawia się spadek napięcia rzędu 2 V który wyzwała diodę świecą w transoptorze. Następnie sygnał jest filtrowany (C8) i zabezpieczany przed przepięciami (D7), a następnie wzmacniany na tranzystorze T3. Detektor impulsów zapłonu przekazuje rzeczywisty czas zapłonu co jest wykorzystywane podczas pomiarów przebiegu prądu jonizacji.



Rys. 4. Schemat elektryczny ostatecznej wersji układu pomiaru jonizacji
 Fig. 4. Electrical scheme of final version of ionization measurement system

5. Podsumowanie

Wraz z rozwojem elektronicznych systemów sterowania silników spalinowych poszukiwane są nowe źródła pozyskiwania danych na temat przebiegu procesu roboczego silnika. Stosowane dotychczas tradycyjne i szerokozakresowe czujniki tlenu (sondy lambda) posiadają istotne wady. Dzięki klasycznej sondzie lambda można sprawdzić jedynie obecność lub niedobór tlenu w spalinach. Szerokozakresowa sonda umożliwia co prawda pomiar stężenia tlenu w spalinach, jednak cechuje ją relatywnie długi czas reakcji na zmianę stężenia tlenu, stosunkowo długi czas osiągnięcia właściwej temperatury pracy i zdolność do pomiaru jedynie jednej wielkości wpływającej na pracę silnika.

Zastosowanie czujników, które oprócz stwierdzania obecności bądź niedoboru tlenu w spalinach, pozwalają na wykrywanie braku zapłonu mieszanki, wykrywanie spalania stukowego czy też ocenę stanu cieplnego komory spalania i jest tańsze ponieważ nie wymaga zastosowania wielu, często kosztownych czujników. Trwają obecnie prace nad czujnikami optoelektronicznymi przeznaczonymi do pomiaru emisji świetlnej w komorze spalania czy też czujnikami ciśnienia spalania a także czujnikami jonizacji, jednak nie zostały one jak dotąd zastosowane na szeroką skalę w seryjnie produkowanych silnikach samochodowych. Wynika stąd potrzeba ciągłych prac nad ich udoskonalaniem a w szczególności nad poprawą powtarzalności pomiaru i trwałości czujników.

Zaprezentowany układ pomiarowy pozwala na pomiar składu mieszanki i wykrywanie wypadania zapłonów. Istotną cechą jest trwałość czujnika, jakim jest w istocie, w opisywanym przypadku świeca zapłonowa. Przetwornik pomiarowy nie wymaga zatem żadnych czynności konserwacyjnych, czy dodatkowej kalibracji. Zaletą układu jest możliwość jego miniaturyzacji i łatwego przystosowania do zabudowy w komorze silnika. Podejmowane są również próby zastosowania podobnych układów do sterowania silników HCCI, o zapłonie stężeniowym [3].

Literatura

- [1] Andersson, I., Dysertacja nt.: *Cylinder Pressure and Ionization Current Modeling for Spark Ignited Engines*. Division of Vehicular Systems, Department of Electrical Engineering, Linköping, 2002.
- [2] Kamiński, T., Wendeker, M., Wituszyński, K., *Pomiar jonizacji w komorze spalania silnika samochodowego jako nowoczesna metoda nadzorowania procesu spalania*. Archiwum Motoryzacji 4/2002, 2002.
- [3] Corcione, F., Vaglieco, B., Merola, S., *Evaluation of Knocking Combustion by an Ion Current System and Optical Diagnostics of Radical Species*. Symposium COMODIA 2004.