

Mgr inż. Łukasz Fiedkiewicz

Instytut Silników Spalinowych i Transportu
Politechnika Poznańska
Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska
E-mail: Lukasz.M.Fiedkiewicz@doctorate.put.poznan.pl

Prof. dr hab. inż. Ireneusz Pielecha

Instytut Silników Spalinowych i Transportu
Politechnika Poznańska
Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska
E-mail: Ireneusz.Pielecha@put.poznan.pl

Ocena możliwości wykorzystania sygnału jonizacji do diagnostyki procesu spalania w silniku spalinowym o zapłonie iskrowym zasilanym gazem ziemnym

Słowa kluczowe: czujnik jonizacji, sterowanie silnikiem, diagnostyka silnika, ciśnienie indykowane, wywiązywanie ciepła

Streszczenie: Sygnał jonizacji wynikający z obecności jonów oraz elektronów w przestrzeni cylindra silnika spalinowego jest składową wielu czynników, między innymi: temperatury, ciśnienia, składu mieszanki, rodzaju paliwa, obecności reszty spalin oraz innych. Kształt sygnału zmienia się w znacznym stopniu z cyklu na cykl, co świadczy o stochastyce procesu spalania. Mimo tego, jego analiza dostarcza wielu przydatnych informacji, takich jak położenie maksymalnego ciśnienia czy maksymalnej szybkości wywiązywania się ciepła. Ich wykorzystanie pozwala uzupełnić ograniczone systemy kontroli procesu spalania w silnikach spalinowych.

W artykule przedstawiono analizę porównawczą sygnału prądu jonizacji gazów w cylindrze oraz ciśnienia szybkozmiennego przy ustalonych punktach pracy jednocylindrowego, czterosuwowego silnika zasilanego gazem ziemnym. W wyniku analizy uzyskano zależność położenia maksymalnej wartości sygnału jonizacji termicznej od położenia maksymalnej wartości ciśnienia spalania, uzależniono również położenie maksimum pochodnej członu termicznego od położenia maksimum szybkości wywiązywania się ciepła.

1. Wprowadzenie

Do oceny poprawności procesu spalania w silniku spalinowym konieczna jest analiza wskaźników termodynamicznych, takich jak ciśnienie, początek i koniec spalania, ilość ciepła wywiązanego i szybkość jego wywiązywania. Najpopularniejszym sposobem uzyskania powyższych wartości jest pomiar ciśnienia szybkozmiennego w cylindrze silnika oraz jego dalsze przetwarzanie [12, 13, 16, 20]. Wymusza to konieczność stosowania czujników ciśnienia, pozwalających na pomiary z dużą częstotliwością w warunkach dużego ciśnienia i temperatury oraz aparatury obsługującej dany czujnik. Koszty systemu do indykowania ograniczają jego zastosowanie jedynie do jednostek naukowych oraz pojazdów klasy wyższej. Alternatywnymi, dostępnymi metodami, są systemy optyczne [18, 19, 21] oraz systemy oparte na pomiarze prądu jonizacji w cylindrze [13, 15]. Analiza fali świetlnej wymaga stosowania skomplikowanej aparatury, podobnie jak w odniesieniu do indykowania ciśnienia szybkozmiennego [24]. Pomiar prądu jonizacji ma największe właściwości aplikacyjne ze względu na budowę i niskie koszty systemu [4, 5, 8].

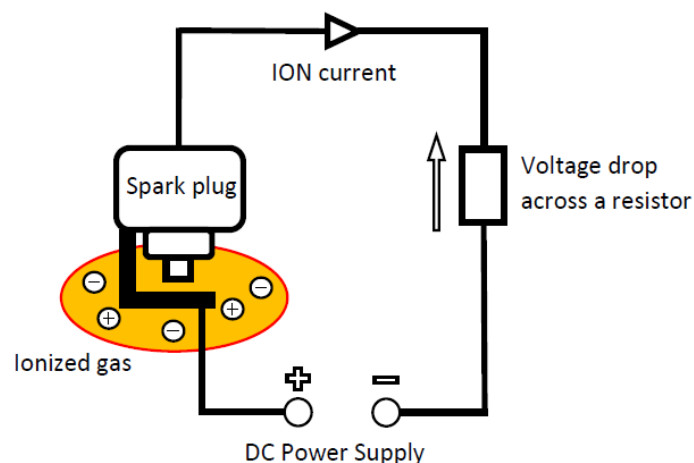
Podstawowym celem pomiaru prądu jonizacji jest identyfikacja wypadania zapłonu oraz występowania spalania stukowego [11]. Systemy te cechuje szybsza reakcja na zaistniałą sytuację. Istnieją również próby wykorzystania sygnału do wielu aplikacji silnikowych, takich jak: pomiar zawartości recyrkulowanych spalin w mieszance paliwowo-powietrznej [2, 14], ocena współczynnika nadmiaru powietrza w spalonym ładunku [22, 23], pomiar temperatury w cylindrze [9], sterowanie kątem wyprzedzenia zapłonu ze sprzężeniem zwrotnym w postaci informacji o położeniu maksymalnego ciśnienia spalania [10]. W ostatnich latach przeprowadzane są także prace mające na celu wykorzystanie sygnału jonizacji do kontroli jakości oraz sterowania procesem spalania w silnikach wykorzystujących zapłon samoczynny mieszanki jednorodnej, tzw. silnikach HCCI [1, 17].

W wyniku wystąpienia zapłonu następuje rozprzestrzenianie się frontu płomienia w mieszance od elektrod świecy zapłonowej w kierunku ścianek cylindra. Towarzyszące temu silne reakcje chemiczne podtrzymują proces, powodując tym samym intensywne wytwarzanie się jonów oraz wolnych elektronów w tzw. fazie jonizacji chemicznej. W wyniku wzrostu temperatury oraz ciśnienia w końcowej fazie procesu spalania intensywność wytwarzania się jonów ponownie znacznie przewyższa ich rekombinację, przez co obserwuje się wzrost ich ilości. Faza ta nazywana jest jonizacją termiczną.

Daniels [3] wykazał, że szybkość wytwarzania się jonów jest ściśle skorelowana z istotnymi wskaźnikami termodynamicznymi, takimi jak: kąt wystąpienia zapłonu, punkt maksymalnego przyspieszenia frontu płomienia, punkt maksymalnej szybkości wywiązywania się ciepła, kąt występowania maksymalnego ciśnienia oraz koniec procesu spalania. Eriks-son [6] dodaje, że szybkość narastania krzywej tzw. fazy chemicznej jonizacji jest ściśle powiązana ze składem mieszanki paliwowo-powietrznej.

2. Sygnał napięcia jonizacji

Pomiar ilości jonów wykonuje się z użyciem świecy zapłonowej, w przypadku silników o zapłonie iskrowym, lub czujnika dla silników o zapłonie samoczynnym. Idea polega na wytworzeniu dużej różnicy potencjałów (do kilkuset woltów) między elektrodami świecy zapłonowej, w czasie którym świeca nie spełnia swojej podstawowej funkcji, tzn. nie służy do zapłonu mieszanki (rys. 1).



Rys. 1. Schemat obwodu pomiarowego sygnału jonizacji [7]

Ze względu na zdolność jonów oraz elektronów do przenoszenia ładunku, następuje przepływ prądu (prąd jonizacji) proporcjonalny do ilości jonów znajdujących się w okolicy elektrod. Na podłączonym szeregowo rezystorze pomiarowym, zgodnie z prawem Ohma, występuje różnica potencjałów proporcjonalna do przepływającego prądu jonizacji. Napięcie

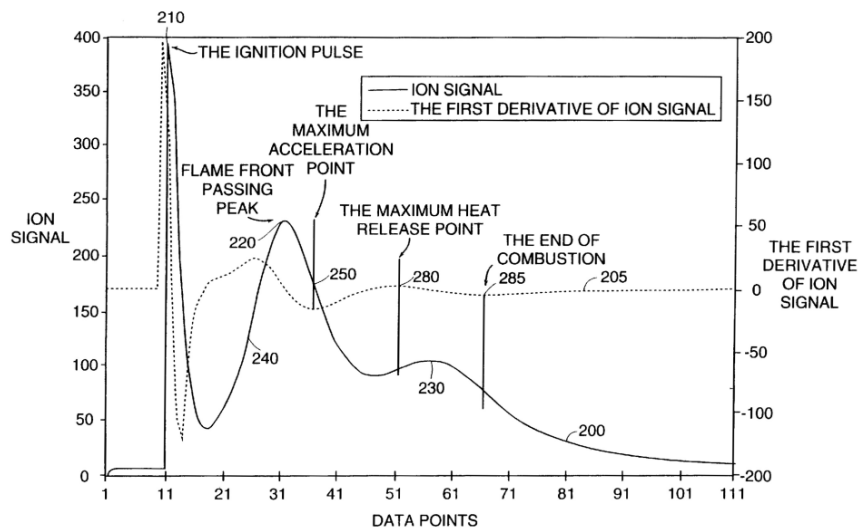
to wykorzystywane jest bezpośrednio przez urządzenie pomiarowe i nazywane jest napięciem jonizacji.

Charakterystyczny sygnał prądu jonizacji cechuje się trzema fazami (rys. 2):

a) faza zapłonu (210) – silne promieniowanie elektromagnetyczne z układu zapłonowego – powoduje ono zakłócenia w sygnale jonizacji, utrudniając analizę,

b) faza jonizacji chemicznej (220) – silnie powiązana z powstającym frontem płomienia,

c) faza jonizacji termicznej (230) – wykazuje duże powiązanie z maksymalnym ciśnieniem oraz temperaturą w cylindrze.



Rys. 2. Sygnał napięcia jonizacji i jego pierwsza pochodna wraz ze zdefiniowanymi fazami [3]

Ponadto szybkość wytwarzania się jonów wyrażona jako pierwsza pochodna sygnału jonizacji (205) zawiera informację o:

a) punkcie maksymalnego przyspieszenia frontu płomienia (250) – punkt przegięcia występujący po punkcie maksymalnej jonizacji chemicznej; jest punktem maksymalnego przyspieszenia płomienia, który wyznacza koniec tworzenia się jonów w okolicy elektrod świecy zapłonowej (w wyniku działania frontu płomienia i dalszej propagacji płomienia w głąb komory spalania),

b) punkcie maksymalnej szybkości wywiązywania się ciepła w wyniku procesu spalania mieszanki (280) – lokalna temperatura dookoła świecy zapłonowej wzrasta wraz z intensywnością procesu spalania; tym samym szybkość wytwarzania się jonów w fazie jonizacji termicznej w okolicy świecy zapłonowej jest ściśle powiązana z szybkością wywiązywania się ciepła w pobliżu świecy zapłonowej,

c) punkcie zakończenia procesu spalania (285) – w okolicach elektrod świecy zapłonowej następuje zatrzymanie procesu wytwarzania się jonów oraz wzrost intensywności ich rekombinacji.

Ze względu na stochastykę procesu spalania oraz dużą czułość metody pomiarowej przebieg prądu jonizacji cechuje się dużą niepowtarzalnością w stosunku do przebiegu ciśnienia w cylindrze (rys. 3a), co utrudnia analizę sygnału (rys. 3b). Wynika to z braku możliwości zapewnienia powtarzalnych warunków termodynamicznych oraz wymaganej jakości mieszanki w przestrzeni między elektrodami świecy zapłonowej w każdym cyklu pracy silnika. Dotyczy to w szczególności [6]:

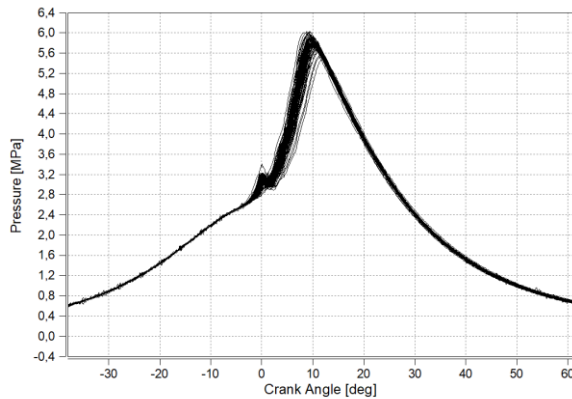
a) temperatury – wpływa na wielkość energii dostarczonej do jonizacji cząsteczek oraz na szybkość rekombinacji jonów,

b) stosunku masy powietrza do paliwa – podczas spalania mieszanek ubogich poziom sygnału spada, co wynika z niższej temperatury procesu spalania w stosunku do mieszanki

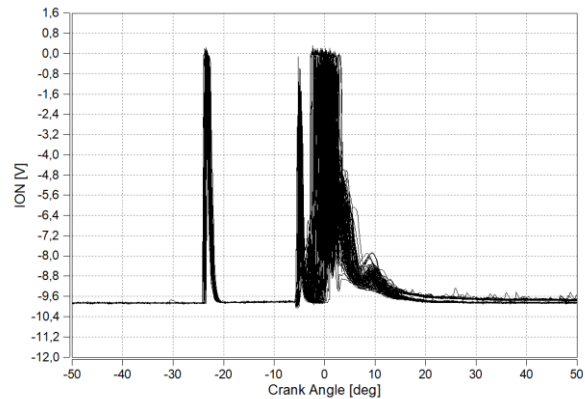
stechiometrycznej; ponadto mniejsza gęstość występowania cząsteczek paliwa zmniejsza prędkość rozprzestrzeniania się frontu płomienia, co wpływa na mniejszą szybkość powstawania jonów,

c) składu chemicznego paliwa – różne rodzaje paliw w zależności od budowy łańcuchów węglowodorów oraz rodzajów zawartych dodatków, wpływają znacząco na proces tworzenia oraz rekombinacji jonów po zapłonie.

a)



b)



Rys. 3. Niepowtarzalność przebiegów wewnątrzcyldrowych: a) ciśnienia spalania, b) sygnału napięcia jonizacji dla 100 następujących po sobie cykli pracy silnika (średnie ciśnienie indykowane IMEP = 0,5 MPa, początek zapłonu SOI = 6 deg przed GMP, współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1$)

3. Cel pracy

Zastosowanie sygnału jonizacji dotyczy głównie silników zasilanych stechiometryczną mieszanką benzyny. W literaturze przedmiotu znajduje się niewiele informacji na temat wykorzystania tego sygnału do diagnostyki procesu podczas spalania mieszanek gazowych.

Celem niniejszej pracy była ocena sygnału jonizacji do diagnostyki procesów termodynamicznych zachodzących podczas spalania mieszanki paliwowo-powietrznej, w której paliwo stanowi metan. Diagnostyka taka będzie możliwa jeśli uzyskane zostaną informacje o warunkach zastąpienia przebiegu ciśnienia oraz szybkości wywiązywania się ciepła diagnostycznym sygnałem jonizacji. W tym celu dokonano porównawczej analizy wskaźników termodynamicznych, wyznaczonych na podstawie przebiegu ciśnienia indykowanego oraz sygnału napięcia jonizacji. Poszukiwano zależności między charakterystycznymi wielkościami oraz ich położeniem. Uzyskanie korelacji między wskaźnikami termodynamicznymi procesu a sygnałem napięcia jonizacji zwiększy diagnostykę procesu spalania, umożliwiając jednocześnie jego większą kontrolę oraz sterowanie. Uzyskanie korelacji między tymi sygnałami pozwoli także na eliminację dodatkowych czujników (np. ciśnienia spalania), którego obróbka sygnału w czasie rzeczywistym w silniku jest dość utrudniona.

Analiza wyników takich badań pozwoli na rozszerzenie zakresu diagnostyki silników spalinowych zasilanych nie tylko mieszankami benzynowo-powietrznymi, ale także mieszankami gazowymi.

4. Metoda badań

4.1. Obiekt badań

Badania przeprowadzono na jednocylindrowym, czterosuwowym silniku badawczym firmy AVL 5804. Zasilana pierwotnie olejem napędowym jednostka została przystosowana do spalania gazu ziemnego. W tym celu zmodyfikowano układ wtryskowy (wysokociśnieniowy wtrysk bezpośredni zastąpiono niskociśnieniowym wtryskiem pośrednim), zainstalowano układ zapłonowy oraz ograniczono stopień sprężania. Parametry techniczne wykorzystywanego silnika badawczego przedstawiono w tablicy 1.

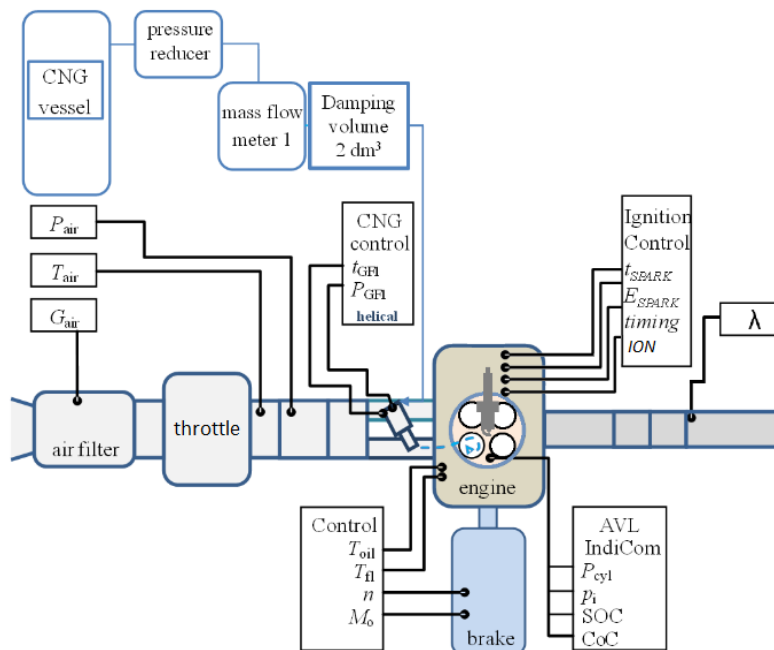
Tablica 1

Charakterystyka silnika badawczego AVL 5804

Parametr	Jednostka	Wartość/rodzaj
Silnik	–	1-cylinder, 4-zawory, ZI
Pojemność skokowa	dm ³	0.5107
Średnica × skok	mm	85 x 90
Stopień sprężania	–	15.2
Układ paliwowy	–	Wtrysk pośredni gazu (wtryskiwacz elektromagnetyczny)
Układ dolotowy	–	Silnik wolnossący

4.2. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono z użyciem specjalistycznej aparatury pomiarowej (tab. 2) oraz dedykowanych urządzeń sterujących (rys. 4). Sterownik zapłonu firmy Autoelektronika umożliwiał regulację kąta wyprzedzenia zapłonu oraz energii wyładowania (funkcja czasu ładowania uzwojenia pierwotnego cewki). Do sterowania natężeniem przepływu powietrza zastosowano elektronicznie sterowaną przepustnicę. Elektromagnetyczny wtryskiwacz gazu ziemnego firmy Bosch, sterowany przy użyciu aparatury produkcji Autoelektronika, dostarczał dawkę paliwa przy zadanym kącie OWK oraz czasie trwania wtrysku. Ciśnienie gazu dostarczanego ze zbiornika wysokociśnieniowego regulowane było przy użyciu reduktora i osiągało poziom 0,9 MPa. W celu ograniczenia zjawisk falowych, w układzie zasilania gazem ziemnym zamontowano dodatkową objętość o pojemności 2 dm³.



Rys. 4. Stanowisko badawcze do analizy prądu jonizacji [7]

W celu zachowania stałych warunków termodynamicznych, stanowisko wyposażono w układ kondycjonowania cieczy i oleju (utrzymywano stałe warunki temperaturowe o wartości $T_{oi} = 80^{\circ}\text{C}$ oraz $T_c = 80^{\circ}\text{C}$). Do uzyskania napięcia jonizacji zastosowano czujnik zintegrowany z cewką zapłonową wykorzystywany w silnikach Mazda Skyactiv-G. Czujnik ciśnienia spalania Kistler 6081A umieszczono w głowicy silnika badawczego w odległości 10 mm od świecy zapłonowej.

Tablica 2

Aparatura użyta do badań

Parametr	Nazwa	Zakres
Hamulec silnikowy	AVL AMK DW13-170	-50–300 Nm
Zużycie powietrza	Sensycon Sensyflow	0–720 kg/h
Zużycie paliwa	Bronkhorst 111B	0.1–100 g/h
Układ smarowania	AVL 577	0–150 °C
Układ chłodzenia	AVL 577	0–150 °C
System akwizycji danych	AVL IndiSmart	8-kanałowy system
	AVL Concerto	Post-processing
Szerokopasmowy czujnik tlenu	Bosch LSU 4.9	$\lambda > 0.5$

4.3. Zakres badań

Do określenia zależności między wskaźnikami termodynamicznymi procesu spalania a sygnałem jonizacji wykorzystano silnik badawczy pracujący przy stałej prędkości obrotowej $n = 1500$ obr/min i współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1$. Przyjęto stałą wartość początkową obciążenia silnika w postaci średniego ciśnienia użytecznego o wartości $\text{IMEP} = 0,43$ MPa. Wartość tę uzyskano przy wyprzedzeniu zapłonu o wartości 19 stopni przed GMP. Wtrysk paliwa realizowano do kanału dolotowego przy kącie 170 stopni przed GMP. Dawkę paliwa utrzymywano na stałym poziomie o wartości $q_o = 16,9$ mg/wtrysk. Zmiennymi wielościami był kąt zapłonu (SOI). Warunki takie powodowały zmianę procesu spalania. Analizowano w dalszej części średnią wartość ciśnienia użytecznego (IMEP), kąt maksymalnego ciśnienia spalania (AP_{mx}) oraz kąt maksymalnej szybkości wywiązanego ciepła (AHRR_{mx}). Zakres prowadzenia badań przedstawiono w tablicy 3.

Analizę procesu spalania prowadzono z rozdzielczością kątową 0,1 deg przy rejestracji 100 cykli pracy silnika, które poddano uśrednianiu. Niepowtarzalność wskaźników spalania wyznaczono jako odchylenie standardowe σ ze 100 cykli pomiarowych; wartości wynikowe (uśrednione ze 100 cykli) zawarto w tablicy 3.

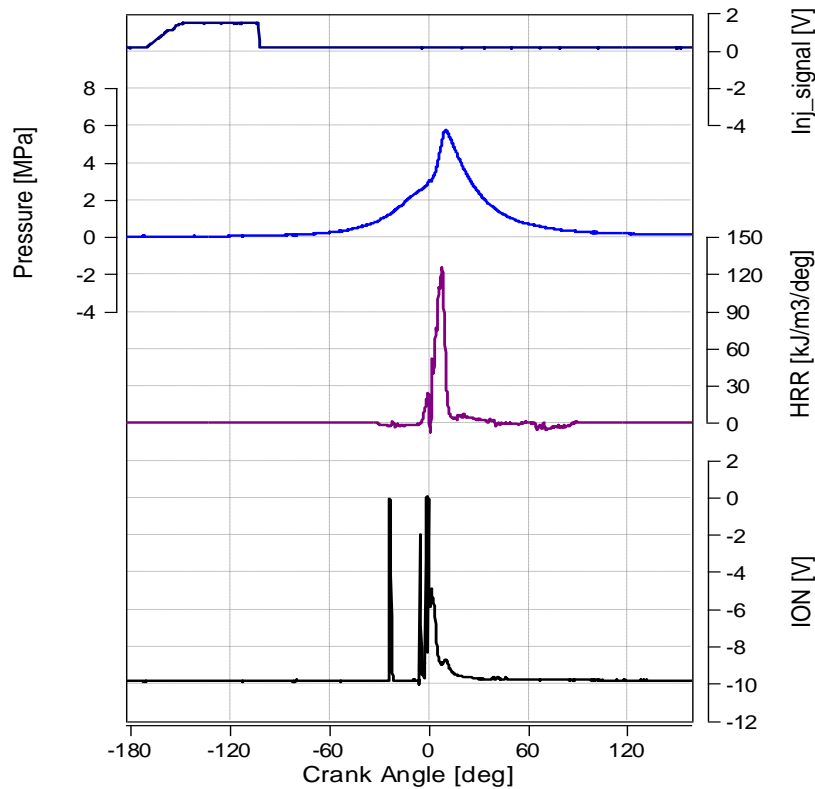
Tablica 3

Warunki prowadzenia badań oraz średnie wartości wynikowe

Lp.	Zadane			Wynikowe (średnie)				
	stałe		zmiennie	IMEP [MPa]	AP_{mx} [deg po GMP]	AHRR_{mx} [deg po GMP]	$\sigma(\text{AP}_{\text{mx}})$ [deg]	$\sigma(\text{AHRR}_{\text{mx}})$ [deg]
	n [obr/min]	q_o [mg/wtrysk]	SOI [deg po GMP]					
1.	1500	16,9	-19	0,43	0	-4,8	0,601	0,512
2.			-15	0,46	2	-1,1	0,422	0,578
3.			-12	0,51	4	1,7	0,475	0,497
4.			-10	0,52	6	3,7	0,445	0,432
5.			-8	0,52	8	6	0,452	0,447
6.			-6	0,53	10	7,9	0,596	0,538

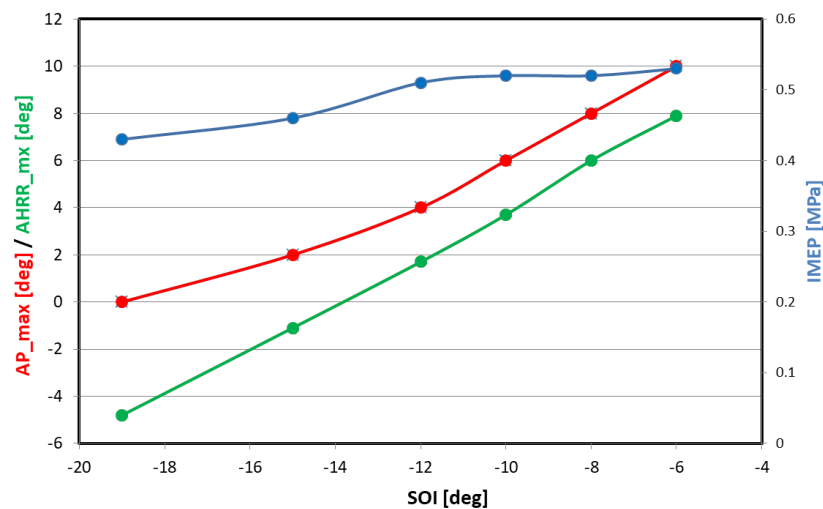
Warunki pracy silnika przedstawione w tablicy 3 posłużyły do określenia zależności między położeniem maksymalnego ciśnienia spalania, maksymalnej szybkości wywiązywania

się ciepła a sygnałem jonizacji. Sygnały sterujące wraz z sygnałem jonizacji oraz wyniki analiz termodynamicznych dla przykładowego nieuśrednionego przebiegu przedstawiono na rys. 5.



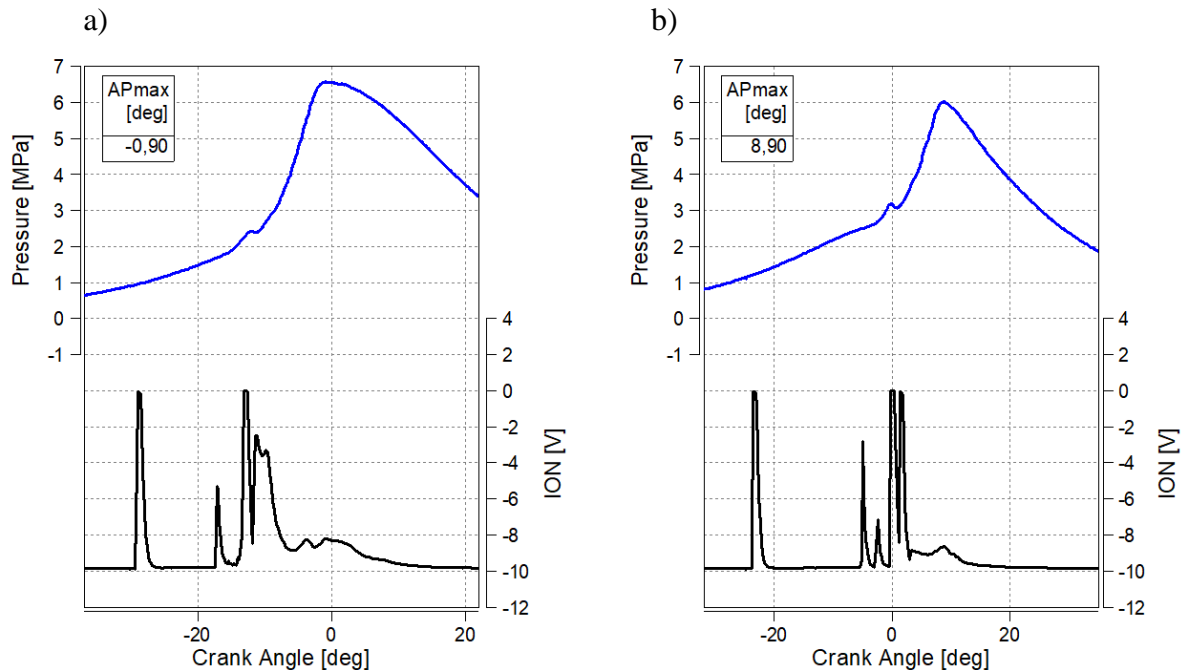
Rys. 5. Wykres indykatorowy przedstawiający analizowane wielkości

Przedstawione na rys. 5 oraz w tabeli 3 warunki badań wskazują, że zmiana nastaw kąta wyprzedzenia zapłonu wpływa bezpośrednio na proces spalania (przy stałych pozostałych nastawach pracy silnika). W wyniku opóźnienia kąta zapłonu, opóźnieniu ulega także wystąpienie maksimum ciśnienia spalania oraz później występuje kąt maksymalnej szybkości wywiązywania ciepła. Zmiany tych wielkości nie są proporcjonalne, co dla 100 uśrednionych przebiegów przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na średnie wartości: średniego użytecznego ciśnienia indykowanego (IMEP), położenia maksymalnego ciśnienia w cylindrze (AP_max) oraz kąta maksymalnej wartości szybkości wywiązywania ciepła (AHRR_mx) w silniku zasilanym gazem ziemnym ($\lambda = 1$)

Ze względu na zwiększenie wartości odchylenia standardowego przy skrajnych nastawach kąta wyprzedzenia zapłonu, dokonano analizy ciśnienia spalania i sygnału jonizacji w tych punktach pracy (rys. 7). Z analizy danych wynika, że zapłon mieszanki skutkuje charakterystycznym pikiem ciśnienia. Zmianie tej odpowiadają inne przebiegi sygnału jonizacji w komorze spalania.



Rys. 7. Przebiegi ciśnienia indykowanego oraz sygnału napięcia jonizacji z komory spalania dla skrajnych punktów pomiarowych wchodzących w zakres badań: a) SOI = 19 deg przed GMP, b) SOI = 6 deg przed GMP

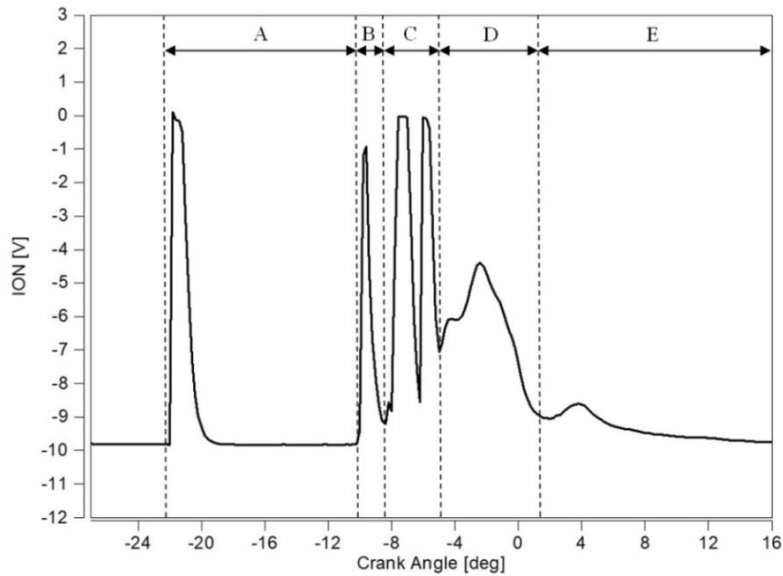
Zastosowanie gazu ziemnego jako paliwa, wymagało zachowania stabilnej temperatury pracy silnika, ze względu na duży jej wpływ na warunki procesu spalania. Warunki takie wynikają z małej pojemności cieplnej gazu ziemnego. Przyjęta temperatura 80°C utrzymywana była przez układ kondycjonowania cieczy oraz kondycjonowania oleju.

5. Analiza wyników badań sygnału jonizacji

5.1. Charakter sygnału jonizacji

Uzyskane przebiegi napięcia jonizacji pozwalają na wyodrębnienie poszczególnych faz, zarówno w fazie zapłonu jak i w fazie spalania mieszanki (rys. 8). Pierwszy charakterystyczny wzrost napięcia jonizacji jest zbieżny z momentem rozpoczęcia ładowania uzwojenia pierwotnego cewki zapłonowej. Czas trwania fazy ładowania (A) jest ograniczony przez drugi wzrost sygnału jonizacji rozpoczynający fazę zapłonu (B). Faza ta wynika z przerwania procesu ładowania cewki zapłonowej i powstania zjawiska samoindukcji, dzięki któremu dochodzi do wyładowania na elektrodach świecy zapłonowej. W wyniku wyładowania następuje wytracenie energii zgromadzonej w cewce zapłonowej, czego efektem są powstające oscylacje napięcia na uzwojeniu wtórnym. Ich odzwierciedleniem są charakterystyczne wzrosty (C) sygnału jonizacji utrudniające pomiar prądu jonizacji w trakcie procesu spalania.

Analiza uzyskanych przebiegów jonizacji w komorze spalania wskazuje na występowanie pewnych rozbieżności między teoretycznym sygnałem jonizacji a sygnałem rzeczywistym. Sygnał rzeczywisty zawiera zakłócenia pochodzące z systemu zapłonowego, co powoduje, że analiza sygnału jonizacji chemicznej (faza D – rys. 8) jest utrudniona. Z tego powodu, dalsza analiza sygnału napięcia jonizacji dotyczy głównie jej części chemicznej (faza E – rys. 8).

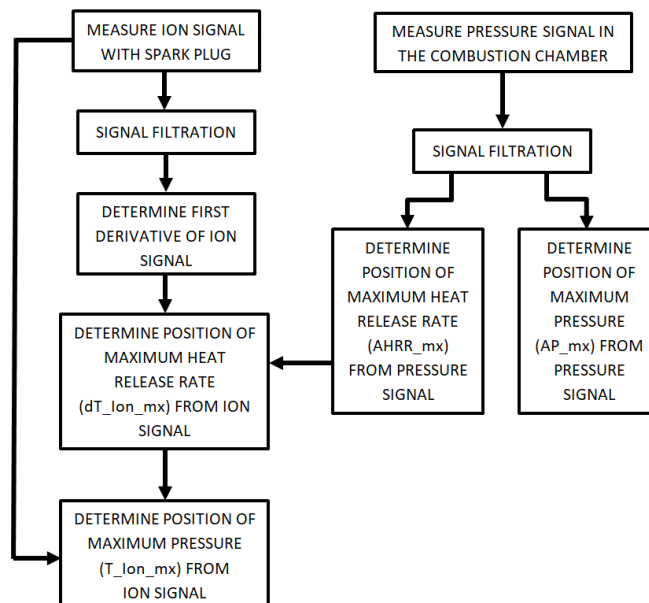


Rys. 8. Rzeczywisty sygnał napięcia jonizacji wraz z wyznaczonymi fazami

Takie podejście powoduje, że analizy związane z sygnałem napięcia jonizacji dotyczyć będą procesu spalania, a nie oceny procesów przedpłomiennych. Powoduje to, że sygnał taki będzie wykorzystany do oceny procesu spalania, a nie do oceny czasu wystąpienia zapłonu lub oszacowania innych wielkości (np. współczynnika nadmiaru powietrza) przed zapłonem w okolicy świecy zapłonowej.

5.2. Algorytm wyznaczania wskaźników procesu

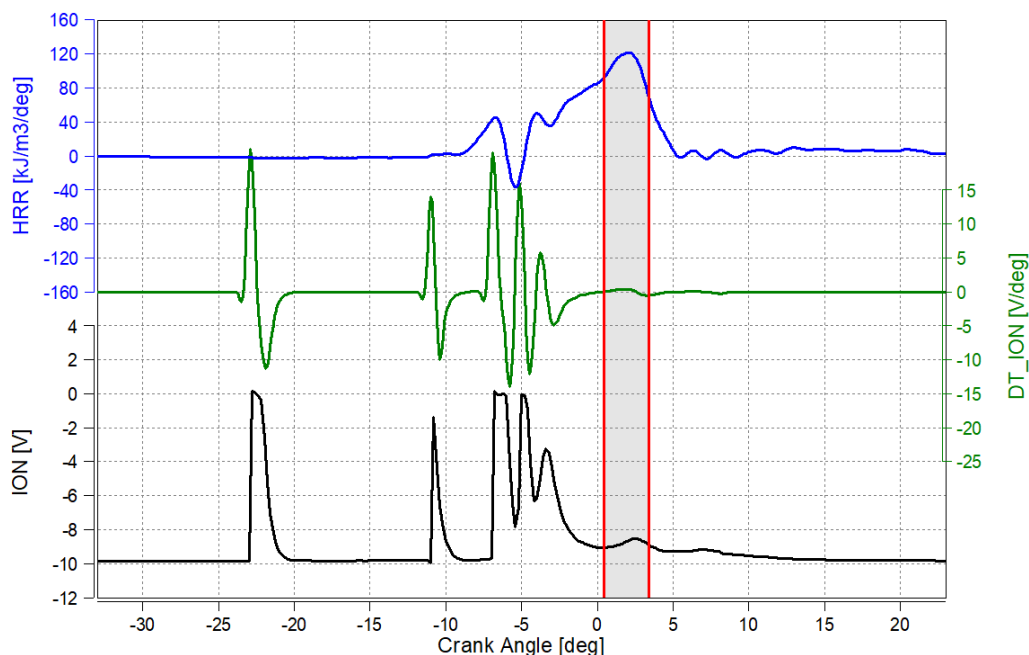
Do uzyskania poszukiwanych zależności (przedstawionych w rozdziale 3) stworzono program (z użyciem oprogramowania AVL Concerto) umożliwiający wyznaczenie punktów charakterystycznych sygnału jonizacji (rozdział 2). Przy użyciu algorytmu obliczeniowego (rys. 9) w pierwszym etapie dokonano filtracji sygnału jonizacji oraz sygnału ciśnienia filtrem dolnoprzepustowym. Następnie wyznaczono pierwszą pochodną (dT_{Ion}) zawierającą informację o kątowym położeniu maksymalnej szybkości wywiązywania się ciepła.



Rys. 9. Algorytm obliczeniowy pozwalający na wyznaczenie punktów charakterystycznych sygnału jonizacji oraz jego pochodnej

Wyznaczona wartość położenia maksymalnej szybkości wywiązywania się ciepła na podstawie sygnału ciśnienia (AHRR_mx) umożliwiła ograniczenie analizy sygnału jonizacji do obszaru 3 stopni OWK. W tym zakresie algorytm wyznaczał maksymalną wartość sygnału jonizacji oraz jego pochodnej (rys. 10).

Wybrany zakres $\pm 1,5$ stopnia OWK w stosunku do położenia maksymalnej wartości szybkości wywiązywania się ciepła wyznaczonej na podstawie sygnału ciśnienia, zapewniał dużą skuteczność w wyznaczaniu poszukiwanych punktów charakterystycznych sygnału jonizacji (T_Ion_mx) oraz jego pochodnej (dT_Ion_mx).



Rys. 10. Obszar analizy sygnału jonizacji (3° OWK) zaznaczony kolorem czerwonym

5.3. Zależności sygnału jonizacji i wskaźników termodynamicznych procesu spalania

Do wyznaczenia zależności między sygnałem napięcia jonizacji a wskaźnikami termodynamicznymi procesu spalania (uzyskanymi na podstawie sygnału ciśnienia w cylindrze) oraz szybkością wywiązywania się ciepła, skupiono się na ich charakterystycznych wielkościach:

- położeniu kątowemu maksymalnej wartości ciśnienia w cylindrze – AP_mx [deg]; wielkość tę uzyskano na podstawie indykowania silnika,
- położeniu kątowemu maksymalnej szybkości wywiązywania się ciepła – AHRR_mx [deg]; wielkość tę uzyskano na podstawie równania:

$$\frac{AHRR_{mx}}{d\alpha} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left(\frac{P_\alpha + P_{\alpha+1}}{2} \right) (V_{\alpha+1} - V_\alpha) + \frac{1}{\kappa - 1} \left(\frac{V_\alpha + V_{\alpha+1}}{2} \right) (P_{\alpha+1} - P_\alpha)$$

gdzie:

P – ciśnienie w cylindrze,

V – objętość nad tłokiem,

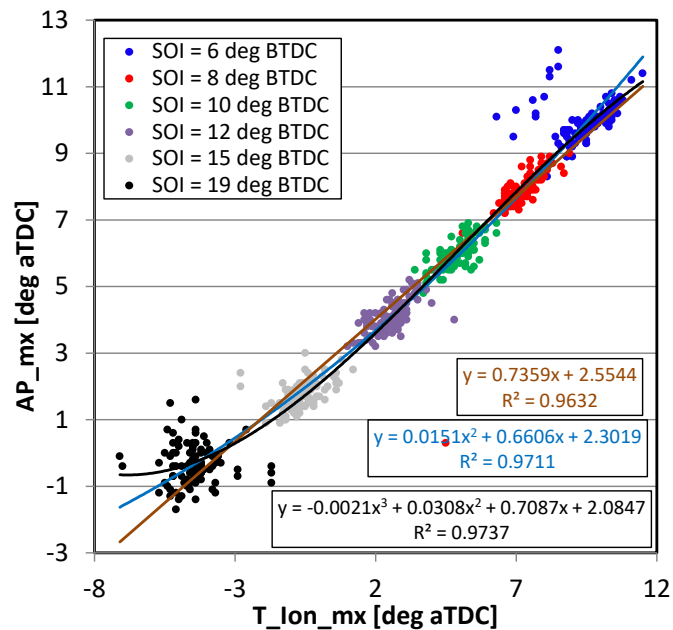
κ – wykładnik politropy sprężania lub rozprężania ($\kappa = 1.32$),

indeksy α oraz $\alpha+1$ oznaczają bieżącą i następną wartość kąta obrotu wału korbowego silnika.

- położeniu kątowemu maksymalnej wartości napięcia jonizacji w fazie termicznej – T_Ion_mx [deg]; wielkość tę uzyskano z wykorzystaniem czujnika jonizacji (rys. 1) oraz zaprojektowanego algorytmu (rozdział 5.2),

d) położeniu kątowym maksymalnej wartości pochodnej sygnału jonizacji fazy termicznej – dT_Ion_mx [deg]; wielkość tę uzyskano z wykorzystaniem zaprojektowanego algorytmu.

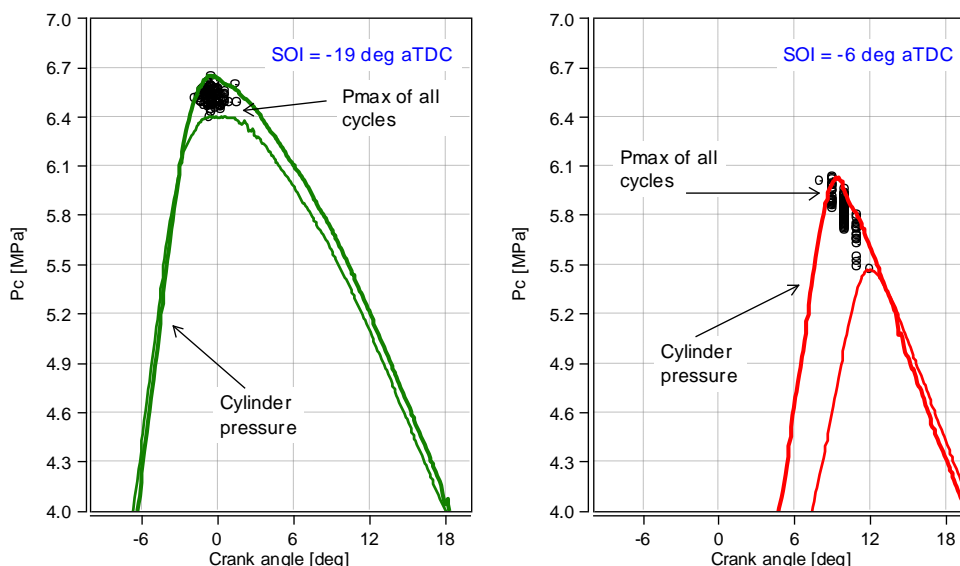
Z analizy zależności między grupami wielkości AP_mx i T_Ion_mx oraz $AHRR_mx$ i dT_Ion_mx wynika możliwość ich porównywania i poszukiwania związków korelacyjnych. Analiza zależności kąta występowania maksymalnego ciśnienia oraz kąta występowania maksymalnej wartości sygnału jonizacji termicznej wskazuje na dużą korelację tych wielkości w odniesieniu do wszystkich punktów badawczych (rys. 11).



Rys. 11. Zależność kąta położenia maksymalnego ciśnienia (AP_mx) od kąta maksymalnej wartości napięcia jonizacji termicznej (T_Ion_mx) z uwzględnieniem wszystkich punktów badawczych

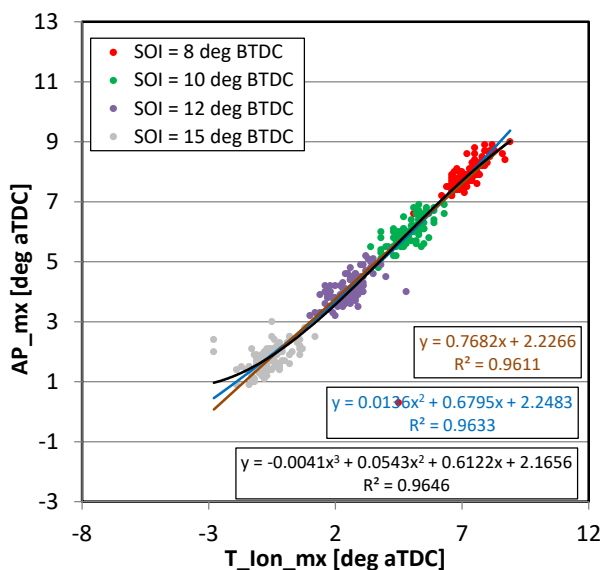
Korelacje te przedstawiono w odniesieniu do funkcji liniowej, funkcji kwadratowej oraz trzeciego stopnia (nie zastosowano funkcji logarytmicznej oraz wykładniczych ze względu na występowanie wartości ujemnych obu zmiennych). Ich współczynniki determinacji są na podobnym poziomie wynoszącym 0,97. Różnice między nimi wynoszą 3%. Oznacza to, że możliwe jest przyjęcie funkcji liniowej do określenia położenia maksymalnego ciśnienia w cylindrze na podstawie sygnału jonizacji. Funkcja taka jest również bardziej przydatna w implementacji takiego rozwiązania, gdyż pozwala na zwiększenie szybkości wyznaczania AP_mx w sterowniku silnika w czasie rzeczywistym (krótszy czas obliczeń przy wykorzystaniu określonego algorytmu).

Jednakże dla skrajnych wartości wyprzedzenia zapłonu ($SOI = 19$ deg przed GMP oraz 6 deg przed GMP) zaobserwowano duże rozbieżności przebiegu ciśnienia w cylindrze. Skutkuje to znacznym zróżnicowaniem kąta położenia maksymalnej wartości ciśnienia w cylindrze (rys. 12). Miarą tego rozproszenia (wskaźnikiem) są wartości odchylenia standardowego $\sigma(AP_mx)$ wynoszące odpowiednio $0,601$ deg oraz $0,596$ deg. Stanowią one największe wartości odchylenia standardowego w stosunku do innych punktów badawczych (tablica 3). W wyniku tego obserwuje się zanik korelacji między sygnałami AP_mx oraz T_Ion_mx dla skrajnych wartości SOI.



Rys. 12. Zmiany kąta położenia AP_mx przy skrajnych nastawach kąta wyprzedzenia zapłonu (SOI = 19 przed GMP oraz 6 deg przed GMP)

Uwzględnienie powyższych analiz wymusiło ograniczenie liczby danych uwzględnionych do określenia zależności między sygnałami AP_mx a T_Ion_mx, kryterium wyboru punktów badawczych była wartość odchylenia standardowego poniżej 0,5 deg. Ograniczenie to polega więc na nieuwzględnieniu skrajnych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu. Wyniki takich analiz przedstawiono na rys. 13.



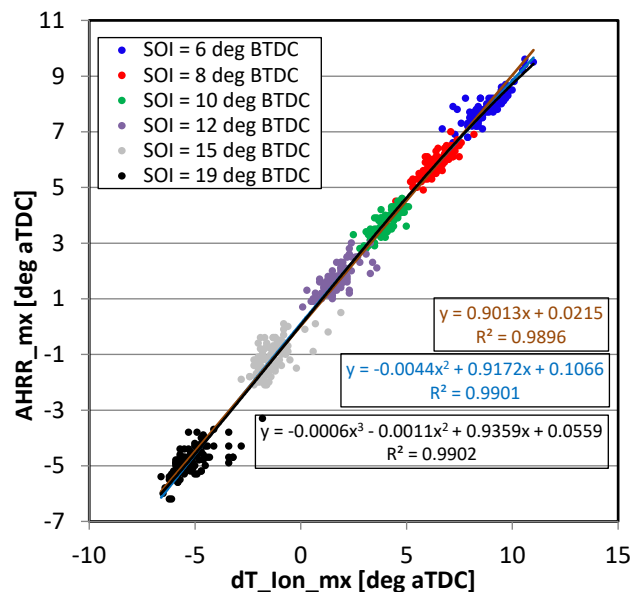
Rys. 13. Zależność kąta położenia maksymalnego ciśnienia (AP_mx) od kąta maksymalnego napięcia jonizacji termicznej (T_Ion_mx) przy zredukowanej liczbie punktów badawczych

Analiza wyników zawartych na rys. 13 wskazuje na uzyskanie wskaźników determinacji na poziomie wynoszącym 0,96 (w granicach błędów o wartości 1%). Wynika z tego, że możliwe jest uwzględnienie ograniczonej liczby danych pomiarowych i przyjęcie dla nich zależności liniowej funkcji $AP_mx = f(T_Ion_mx)$. Współczynnik determinacji o wartości 0,9611 oraz odchylenie standardowe $\sigma(AP_mx)$ poniżej 0,5 deg gwarantują spełnienie warunku liniowości tych zmiennych.

Analiza zależności funkcji $AP_mx = f(T_Ion_mx)$ wskazuje na możliwość korelacji tych wielkości przy uwzględnieniu odchylenia standardowego kąta maksymalnego ciśnienia

w cylindrze o wartości poniżej 0,5 deg. Oznacza to, że w celu uzyskania określonej korelacji tych zmiennych konieczne jest wyznaczenie powyższego odchylenia standardowego i przyjęcie kryterium jego wielkości.

Analiza zależności kąta położenia maksymalnej szybkości wywiązywania się ciepła (AHRR_mx) od położenia kąтового maksymalnej wartości pochodnej fazy termicznej (dT_Ion_mx) wykazuje dużą zależność liniową (rys. 14) w odniesieniu do wszystkich punktów badawczych. W tym przypadku wyznaczono również funkcję liniową, kwadratową oraz trzeciego stopnia. Dla wszystkich tych rozważań uzyskane wskaźniki determinacji są do siebie zbliżone, a rozbieżności wynoszą poniżej 0,1%.



Rys. 14. Zależność kąta maksymalnej szybkości wywiązywania się ciepła (AHRR_mx) od kąta występowania maksymalnej pochodnej fazy termicznej (dT_Ion_mx) z uwzględnieniem wszystkich punktów badawczych

Uzyskane wartości odchylenia standardowego $\sigma(\text{AHRR_mx})$ poniżej wartości 0,6 deg gwarantują możliwość wykorzystania wszystkich punktów badawczych w celu wyznaczenia zależności między grupami wielkości AHRR_mx i dT_Ion_mx.

Wskaźniki determinacji dla zależności $\text{AHRR_mx} = f(\text{dT_Ion_mx})$ świadczą o dużej korelacji sygnałów termodynamicznych z sygnałami napięcia jonizacji z uwzględnieniem wszystkich punktów badawczych. Późniejsze występowanie kąta maksymalnej szybkości wywiązywania ciepła jest liniowo zależne od kąta położenia maksymalnej wartości pochodnej fazy termicznej jonizacji. Ze względu na brak znacznych różnic we współczynnikach determinacji proponuje się wykorzystanie zależności liniowej, co umożliwi szybsze wyznaczenie wskaźnika termodynamicznego (kąta wystąpienia maksymalnej szybkości wywiązywania ciepła) w czasie rzeczywistym.

Analiza odchylenia standardowego obu zależności wskazuje na prawidłowość polegającą na uzyskiwaniu dobrych korelacji przy odchyleniu standardowym poniżej 0,6 deg. Przyjęcie odchylenia AP_mx o wartości 0,596 deg (SOI = 6 deg przed GMP) wskazuje na występowanie ograniczonej korelacji. Przyjęcie natomiast odchylenia AHRR_mx o wartości 0,578 deg pozwala nadal uzyskać dobrą zgodność korelacyjną. Tak małe różnice odchylen standardowych powodują, że konieczne mogą być kolejne badania określające dość precyzyjnie kryterium liczbowe wyznaczania korelacji tych zmiennych.

Przedstawione powyżej analizy wskazują na możliwość zastąpienia wybranych termodynamicznych wskaźników pracy silnika sygnałami napięcia jonizacji, które możliwe są do osiągnięcia znacznie prostszymi metodami, niż ich odpowiedniki termodynamiczne.

6. Wnioski

Analiza wyników badań wskazuje na możliwość wykorzystania sygnału napięcia jonizacji do diagnostyki procesu spalania silnika o zapłonie iskrowym zasilanym gazem ziemnym przy współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1$.

W wyniku badań i analiz stwierdzono, że:

1. Istnieje duża zależność między kątem położenia maksymalnej wartości sygnału jonizacji termicznej oraz kątem maksymalnego ciśnienia spalania – współczynnik determinacji wynosi $R^2 = 0,9611$. Jednakże zależność ta umożliwi odtworzenie kąta maksymalnego ciśnienia spalania na podstawie sygnału napięcia jonizacji z wykorzystaniem liniowej (proporcjonalnej) zależności między sygnałami tylko w ograniczonym zakresie kąta wyprzedzenia zapłonu (8-15 stopni przed GMP).

2. Istnieje duża zależność między kątem położenia maksymalnej wartości pochodnej członu termicznego oraz kątem maksymalnej szybkości wywiązywania się ciepła – współczynnik determinacji wynosi $R^2 = 0,9896$ z uwzględnieniem wszystkich punktów badawczych. Zależność ta umożliwi odtworzenie kąta położenia maksymalnej szybkości wywiązywania się ciepła na podstawie sygnału jonizacji przy przyjęciu liniowej (proporcjonalnej) zależności między sygnałami.

3. Konieczne jest precyzyjne określenie kryteriów pracy silnika spalinowego w celu uzyskania dużej korelacji powyżej przedstawionych sygnałów. Odchylenie standardowe wykorzystane w powyższych analizach może być jednym z takich wskaźników.

Wyniki prac autorów wskazują na potencjalną możliwość wykorzystania sygnału jonizacji w nowoczesnych systemach diagnostycznych silników spalinowych zasilanych gazem ziemnym oraz układach ich sterowania. Sygnał jonizacji uzyskiwany z cyklu na cykl pracy silnika – silnie skorelowany z przebiegiem ciśnienia oraz szybkością wywiązywania się ciepła – umożliwi precyzyjną kontrolę wskazanych parametrów, przyczyniając się do szybkiej detekcji nieprawidłowych cykli oraz poprawy wskaźników pracy silnika spalinowego.

Dalsze prace badawcze w zakresie rozpatrywanej tematyki, będą skoncentrowane na możliwości rozszerzenia użyteczności sygnału jonizacji na pozostałe punkty badawcze oraz wyeliminowania szumu informacyjnego związanego z wyładowaniem elektrycznym na świecy zapłonowej, co umożliwi diagnostykę fazy przedpłomiennej procesu spalania (faza jonizacji chemicznej). Rozwiązanie tego problemu umożliwi rozszerzenie użyteczności sygnału jonizacji o pomiar jakości mieszanki, a także pomiar temperatury w cylindrze. Prace te mogą w istotny sposób przyczynić się do poprawy sterowania procesem spalania w celu uzyskania poprawy wskaźników pracy silników spalinowych o zapłonie iskrowym zasilanych gazem ziemnym oraz zmniejszenia emisji związków toksycznych.

Podziękowania: Badania prezentowane w artykule prowadzono w ramach prac statutowych nr 05/52/DSPB/0261.

Bibliografia

1. Butt R H, Chen Y, Mack J H, Saxena S, Dibble R W, Chen J Y. Improving ion current of sparkplug ion sensors in HCCI combustion using sodium, potassium, and cesium acetates: Experimental and numerical modeling. Proceedings of the Combustion Institute 2014; 35(3), doi: 10.1016/j.proci.2014.06.084.
2. Byttner S, Holmberg U. Closed-loop control of EGR using ion currents. Proceedings of the 27th IASTED International Conference Modelling, Identification and Control 2008; 978-0-88986-711-6.

3. Daniels C F. Mass fraction burned and pressure estimation through spark plug ion sensing. Patent US 6089077 A (2000).
4. Dev S, Sandhu N S, Ives M, Yu S, Zheng M. Ion current measurement of diluted combustion using a multi-electrode spark plug. SAE Technical Paper 2018; 2018-01-1134, doi:10.4271/2018-01-1134.
5. Dong G, Chen Y, Wu Z, Li L, Dibble R. Study on the phase relation between ion current signal and combustion phase in an HCCI combustion engine. Proceedings of the Combustion Institute 2015; 35 (3): 3097–3105, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.08.033>.
6. Eriksson L. Methods for ionization current interpretation to be used in ignition control. Diploma Thesis 1995.
7. Fiedkiewicz Ł, Pielecha I, Wisłocki K. Use of the gas ionization signal for combustion process diagnostics in the cylinder of a spark ignition engine. Combustion Engines 2017; 171(4): 196-200. doi: 10.19206/CE-2017-433.
8. Filipek P, Wendeker M, Kamiński T, Mitraszewska I, Nowacki G. Opinion of ionization signal to estimating composition of mixture in combustion process about engine SI. Journal of KONES Powertrain and Transport 2008; 15 (3): 121–127.
9. Gao Z, Wu X, Man C, Meng X, Huang Z. The relationship between ion current and temperature at the electrode gap. Applied Thermal Engineering 2012; 33–34: 15–23, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.014>.
10. Hellring M, Holmberg U. An ion current based peak-finding algorithm for pressure peak position estimation. SAE Technical Paper 2000; 2000-01-2829, <https://doi.org/10.4271/2000-01-2829>.
11. 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; 2008-32-0028, <https://doi.org/10.4271/2008-32-0028>.
12. Koszałka G. Model of operational changes in the combustion chamber tightness of a diesel engine. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2014; 16 (1): 133–139.
13. Kruczyński S, Ślęzak M, Gis W, Orliński P. Evaluation of the impact of combustion hydrogen addition on operating properties of self-ignition engine. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2016; 18 (3): 343–347, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.3.4>.
14. Kusuhara T, Shinkai T, Yoshida K, Langley D. Development on internal EGR feedback control based on ion current. SAE Technical Paper 2017; 2017-01-0793, doi:10.4271/2017-01-0793.

15. Lagana A A M, Lima L L, Justo J F, Arruda B A, Santos M M. Identification of combustion and detonation in spark ignition engines using ion current signal. *Fuel* 2018; 227: 469–477, doi: 10.1016/j.fuel.2018.04.080.
16. Mikulski M, Wierzbicki S, Piętak A. Zero-dimensional 2-phase combustion model in a dual-fuel compression ignition engine fed with gaseous fuel and a divided diesel fuel charge. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 17 (1): 42–48.
17. Phan T, Mack J H, Butt R H, Dibble R. A comparison of three ion sensing circuits in a homogeneous charge compression ignition engine. *Combustion Science and Technology* 2017; 189 (8), <https://doi.org/10.1080/00102202.2017.1294587>.
18. Pielecha I, Pielecha J, Skowron M, Mazanek A. The influence of diesel oil improvers on indices of atomisation and combustion in high-efficiency engines. *Polish Maritime Research* 2017; 24 (3): 99–105, <http://doi.org/10.1515/pomr-2017-0094>.
19. Pielecha I, Skowron M, Mazanek A. Evaluation of the injectors operational wear process based on optical fuel spray analysis. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20 (1): 83–89, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.1.11>.
20. Pielecha I, Wisłocki K, Cieślik W, Bueschke W, Skowron M, Fiedkiewicz Ł. Application of IMEP and MBF50 indexes for controlling combustion in dual-fuel reciprocating engine. *Applied Thermal Engineering* 2018; 132: 188–195, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.089>.
21. Piernikarski D, Hunicz J, Komsta H. Detection of knocking combustion in a spark ignition engine using optical signal from the combustion chamber. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15 (3): 214–220.
22. Rao R, Honnery D. A simplified mechanism for the prediction of the ion current during methane oxidation in engine-like conditions. *Combustion and Flame* 2015, 162 (7): 2928–2936, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.03.011>.
23. Rivara N, Dickinson P B, Shenton A T. A transient virtual-AFR sensor using the in-cylinder ion current signal. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2009; 23 (5): 1672–1682, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.01.004>.
24. Wendeker M. Sterowanie wtryskiem w silniku samochodowym. Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 1999.