

**dr inż. Andrzej Borawski**

Katedra Budowy i Eksploatacji Maszyn – adiunkt  
Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok, Polska  
E-mail: a.borawski@pb.edu.pl

## **Modyfikacja instalacji LPG IV generacji poprawiająca jakość procesu zasilania silnika o zapłonie iskrowym**

**Słowa kluczowe:** *wtryskiwacze LPG, modelowanie wtryskiwaczy, modyfikacja instalacji LPG, badania instalacji gazowej, sterowanie pracą wtryskiwaczy*

**Streszczenie:** Instalacje LPG IV generacji są układami paliwowymi, które oprócz oczywistych zalet, mają liczne wady. Jednym ze słabych punktów takiej instalacji są wtryskiwacze, w właściwie ich nieprawidłowa praca. Wobec powyższego podjęto próbę opracowania modyfikacji alternatywnego układu zasilania, usprawniającą jego pracę. Modyfikację poprzedzono szeregiem badań stanowiskowych i drogowych. Opracowano model matematyczny wtryskiwacza, na podstawie którego przeprowadzono badania symulacyjne. Wyniki pozwoliły na wykonanie projektu modyfikacji układu paliwowego. Zmiany polegały na wprowadzeniu dodatkowych wtryskiwaczy oraz układu sterującego ich pracą. Całość zamontowana została w pojeździe testowym, a wpływ wprowadzonej modyfikacji na jakość procesu zasilania pokazują wyniki przeprowadzonych badań.

### **1. Wstęp**

Instalacja LPG, podobnie jak inne układy zasilania, jest układem mającym liczne zalety i wady. Podstawowe zalety owego układu paliwowego (głównie zmniejszenie kosztów eksploatacji) są powszechnie znane użytkownikom pojazdów. Wady cieszą się mniejszym rozgłosem, choć są równie, albo nawet bardziej istotne.

Zauważono, że w ostatnim czasie bardzo zmalała intensywność badań nad instalacją gazową IV generacji, głównie z racji postępu technicznego w budowie pojazdów (masowe wprowadzenie bezpośredniego wtrysku benzyny). Nowe konstrukcje silników spalinowych wymusiły opracowanie nowych rozwiązań instalacji gazowych, wykorzystujących paliwo w stanie ciekłym (LPLi) [5].

Montaż alternatywnego układu zasilania wiąże się zazwyczaj ze spadkiem wskaźników użytecznych silnika (mocy i momentu obrotowego). Zjawisko te zniwelowane może być odpowiednim zaprojektowaniem układu dolotowego. Ciepło, niezbędne do zmiany stanu skupienia LPG, pobierane może być z powietrza zasysanego do silnika, dzięki czemu paliwo się ogrzewa, a powietrza ochładza, zwiększając swoją gęstość. Poprawia się wówczas sprawność objętościowa silnika [11]. W rezultacie silnik generuje większą moc i moment obrotowy.

Wtrysk każdego rodzaju paliwa (również LPG) wiąże się ze spadkiem jego ciśnienia (ciśnienie LPG znajdującego się przed wtryskiwaczem jest o około 1 bar większe niż tego w przewodach dolotowych silnika [2]). Rozprężające się paliwo pobiera energię w postaci ciepła z najbliższego otoczenia (dyszy wylotowej oraz powietrza zasysanego przez silnik), co w skrajnych przypadkach powodować może oblodzenie dyszy wtryskiwacza i odcięcie dopływu LPG. Występowanie takiej sytuacji uzależnione jest od geometrii wtryskiwacza (głównie od średnicy dyszy wylotowej) oraz parametrów pracy silnika. O parametrach pracy

silnika decyduje użytkownik pojazdu, konstruktorzy natomiast mogą, np. poprzez optymalizację, zmieniać geometrię podzespołów układu zasilania zapobiegając tym samym zbyt niemu wychładzaniu dysz wtryskiwaczy [6].

Grupa naukowców z Korei zauważyła, że skład mieszanki paliwowo-powietrznej ma znaczący wpływ na prędkość płomienia spalającego się LPG, to z kolei znacząco wpływa na skład spalin. Wyniki badań pokazały, że najkorzystniejsza prędkość spalania ma miejsce dla mieszanki stechiometrycznej. Najgorsze wyniki badacze uzyskali przy zasilaniu mieszanką ubogą. Niezwykle istotne jest więc precyzyjne dawkowanie paliwa [7]. W wielu przypadkach, aby uzyskać mieszankę stechiometryczną w pełnym zakresie prędkości obrotowej silnika stosuje się dodatkowy sterownik nadzorujący zasilanie na biegu luzem lub stosuje się metodę H-nieskończoności do sterowania pracą silnika [4]. W latach '90 w niektórych rozwiązaniach montowano również dodatkowy wtryskiwacz aktywujący się przy dużych prędkościach obrotowych [15].

Prawidłowy skład mieszanki paliwowo-powietrznej zapewnia niską zawartość szkodliwych dla człowieka węglowodorów i tlenków węgla. Istotnym składnikiem spalin są również tlenki azotu, których powstawanie spowodowane jest wysoką temperaturą panującą wewnątrz komory spalania. Zastosowanie układu recyrkulacji spalin (EGR) skutkuje zmniejszeniem zawartości tlenków azotu. Sterowanie takim układem odbywa się na podstawie danych zakodowanych w ECU, które w większości przypadków, fabrycznie opracowane zostały do paliwa konwencjonalnego (benzyny). Podczas zasilania alternatywnego (np. paliwem LPG) pojawia się problem z prawidłową pracą systemu EGR (recyrkulowana jest zbyt duża lub zbyt mała dawka spalin [3]). Zastosowanie dodatkowego, automatycznie dostrajającego się układu sterowania może wyeliminować powyższy problem. Sterownik taki zapewnia prawidłowe działanie układu recyrkulacji spalin, nawet w przypadku bardzo dynamicznych zmian zachodzących w silniku [3].

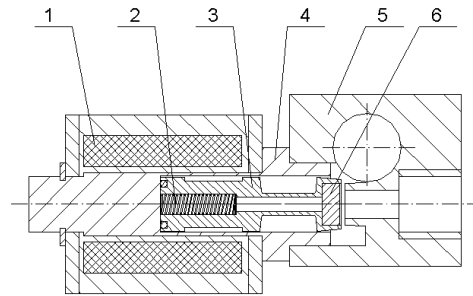
Istotna jest również równomierność dawkowania paliwa, mierzona zarówno pomiędzy poszczególnymi cylindrami, jak też pomiędzy następującymi po sobie cyklami pracy silnika. Duży wpływ ma tu jakość wykonania wtryskiwaczy LPG, która często jest niewystarczająca (mając na uwadze kryteria oceny jakości producentów silników spalinowych) [8]. Od równomierności dawkowania LPG zależą proporcje związków chemicznych w gazach wylotowych. Zawartość tlenków azotu rośnie wprost proporcjonalnie, a tlenków węgla i węglowodorów odwrotnie proporcjonalnie do wartości różnic dawkowania LPG przez poszczególne wtryskiwacze. Różnice te, dla fabrycznie nowych wtryskiwaczy, sięgają nawet 15% [8].

Wielokrotnie przeprowadzone badania emisji spalin silnika spalinowego pokazują, że silniki z układem zasilania LPG mają przewagę nad jednostkami zasilanymi paliwami konwencjonalnymi [12, 14]. Mając na uwadze fakt, że w dalszym ciągu bardzo duża liczba pojazdów zasilana jest instalacjami gazowymi IV generacji (szczególnie w krajach afrykańskich), to w przekonaniu autora, prace nad poprawą konstrukcji takowego układu paliwowego powinny być kontynuowane. Postanowiono przyjrzeć się bliżej problemom związanym z zasilaniem silnika paliwem LPG, gdyż każde, nawet niewielkie usprawnienie poprawiające osiągi lub zmniejszające zużycie paliwa, w skali globalnej może mieć ogromne znaczenie.

Podczas wykonywanych wstępnych badań drogowych zauważono, że w trakcie przyspieszania następuje wyłączanie instalacji gazowej na pewien okres czasu [2]. Obserwacje podobnego zachowania się układu zasilania w innych pojazdach potwierdziły przypuszczenia, że w określonych warunkach takowy problem nie był odosobnionym przypadkiem. Wstępne badania stanowiskowe oraz liczne konsultacje pozwoliły stwierdzić, że jedną z przyczyn nieprawidłowego przebiegu procesu zasilania są wtryskiwacze, a dokładniej ich konstrukcja. Zdobywane kolejno doświadczenia pokazały, iż wtryskiwacze nie

są jedynym źródłem występowania wyżej opisanej sytuacji. Przyczyny takiego stanu rzeczy upatrywać można również w reduktorze, a dokładnie w jego ograniczonej wydajności [9].

Wtryskiwacz LPG jest elektrozaworem otwierającym i zamykającym dopływ paliwa. Budowa wtryskiwacza gazowego znacznie różni się od budowy wtryskiwacza benzyny. LPG w fazie lotnej ma większą objętość niż benzyna w fazie ciekłej, zatem gabaryty wtryskiwacza gazu muszą być większe. Zwiększenie rozmiarów wiąże się niestety ze zwiększeniem sił bezwładności elementów ruchomych [9]. Podstawowymi elementami składowymi badanego wtryskiwacza gazowego są: iglica, cewka, sprężyna, elementy uszczelniająco-tłumiące oraz kilkuczęściowa obudowa. Główny element obudowy (listwa) jest jednocześnie przewodem dostarczającym paliwo do wtryskiwacza. Spełnia również rolę gniazda iglicy wtryskiwacza (rysunek 1).



**Rys. 1.** Schemat budowy wtryskiwacza LPG przeznaczonego do instalacji IV generacji: 1-cewka, 2-sprężyna, 3-iglica, 4-cylinder, 5-listwa wtryskiwaczy, 6-element uszczelniająco-tłumiący

Przemieszczająca się wewnątrz wtryskiwacza iglica otwiera lub zamyka przepływ paliwa. Ruch zamykający powodowany jest działaniem sprężyny, otwierający – siłą elektromagnetyczną generowaną przez cewkę wtryskiwacza. Siłę tą wywołuje impuls elektryczny powstały w układzie sterowania. Sterownik LPG wykorzystuje w tym celu impulsy generowane przez ECU silnika, dedykowane wtryskiwaczom benzyny, na podstawie danych zebranych z czujników monitorujących pracę silnika (temperatury cieczy chłodzącej, ilości zasysanego powietrza, położenia pedału przyspieszenia i innych). Mając te podstawowe dane sterownik instalacji gazowej dobiera z „mapy” wgranej do jego pamięci odpowiedni przebieg impulsu, koryguje go uwzględniając temperaturę i ciśnienie LPG, a następnie przesyła do wtryskiwacza gazowego.

Większość produkowanych obecnie wtryskiwaczy LPG podzielić można na dwie grupy: charakteryzujące się dużą precyzją lub dużą wydajnością. Kosztowną alternatywę stanowi trzecia grupa wydajnych wtryskiwaczy, charakteryzujących się zarazem krótkim czasem otwierania i zamykania.

W warunkach biegu jałowego, przy niskim stopniu zasilania, wymagana jest precyzja odmierzenia małych dawek paliwa. Znaczący wpływ na precyzję dawkowania ma dokładność odmierzenia czasu trwania wtrysku. Precyzyjny wtryskiwacz, charakteryzujący się małą wydajnością, musi mieć odpowiednio długi czas otwarcia. Wówczas precyzja dawkowania rośnie. Problem pojawia się w warunkach dużych obciążeń (przy dużym stopniu zasilania i przy dużej prędkości obrotowej) [17]. Wciąż mała wydajność wtryskiwacza powoduje, że czas trwania wtrysku gazu jest zbyt długi i przekracza czas trwania cyklu silnikowego. Silnik zaczyna być zasilany zbyt ubogą dawką paliwa. Zmodyfikowanie budowy wtryskiwacza w taki sposób, aby nastąpiło zwiększenie jego wydajności, pozwala na wystarczające zasilanie w warunkach dużego obciążenia, lecz powoduje niedokładne odmierzenie dawki gazu w warunkach małego obciążenia i krótkiego czasu otwarcia wtryskiwaczy.

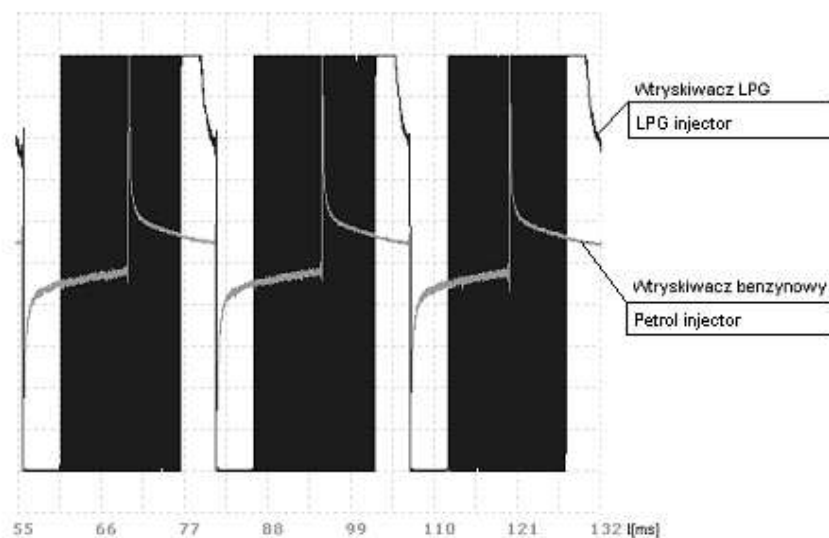
Prawidłowo zaprojektowana (skonfigurowana), zamontowana i wyregulowana instalacja, wyposażona we wtryskiwacze szybko otwierające się i szybko zamykające się,

gwarantuje dokładność uzyskania złożonego składu mieszanki paliwowo-powietrznej w każdych warunkach pracy. Wiąże się to jednak ze zwiększeniem kosztów produkcji, a więc również zakupu alternatywnego układu zasilania (instalacje uniwersalne są znacznie tańsze niż instalacje dedykowane). Zauważono, iż dla zdecydowanej większości użytkowników jedynym kryterium oceny przydatności układów LPG są aspekty ekonomiczne [10]. Dlatego też wiele instalacji tego typu jest montowanych, a później serwisowanych przez ludzi niekompetentnych lub niedoświadczonych, ale przychylniej wyceniających swoje usługi. Analiza zachowania się klientów wybranej stacji obsługi pokazała, że ok. 90% użytkowników serwisuje swoje auta w autoryzowanych punktach tylko w okresie gwarancji. Później użytkownicy szukają tańszej alternatywy.

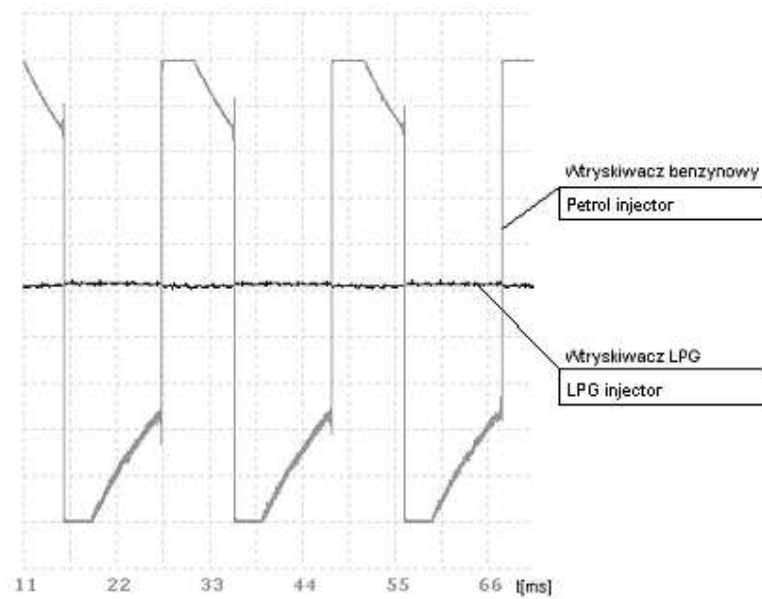
## 2. Badania układu zasilania przed modyfikacją

Operację modyfikacji układu zasilania rozpoczęto od identyfikacji problemu. Jak wspomniano we wstępie, instalacja gazowa w pewnych, określonych warunkach pracy wyłącza się. Dzieje się tak przy dużym stopniu zasilania silnika (gdy czas trwania impulsu zasilającego wtryskiwacz wydłuża się) i przy dużej prędkości obrotowej (przy której skróceniu ulega czas trwania cyklu silnikowego).

W celu potwierdzenia powyższych stwierdzeń dokonano pomiarów przebiegów napięć sygnałów sterujących wtryskiwaczami benzynowymi oraz gazowymi. Jako narzędzia pomiarowe posłużyły: komputer przenośny oraz oscyloskop HD-Scope 9.0. Napięcie na wtryskiwaczach mierzono co 1000 obr/min (od 1000 do 5000 obr/min). Pomiar polegał na zapisie fragmentów przebiegów sygnałów trwających około 10 sekund, trzykrotnie dla każdej prędkości obrotowej. Jeden kanał pomiarowy oscyloskopu podłączony został do złącza zasilającego wtryskiwacz benzyny, drugi natomiast - do złącza zasilającego wtryskiwacz LPG.



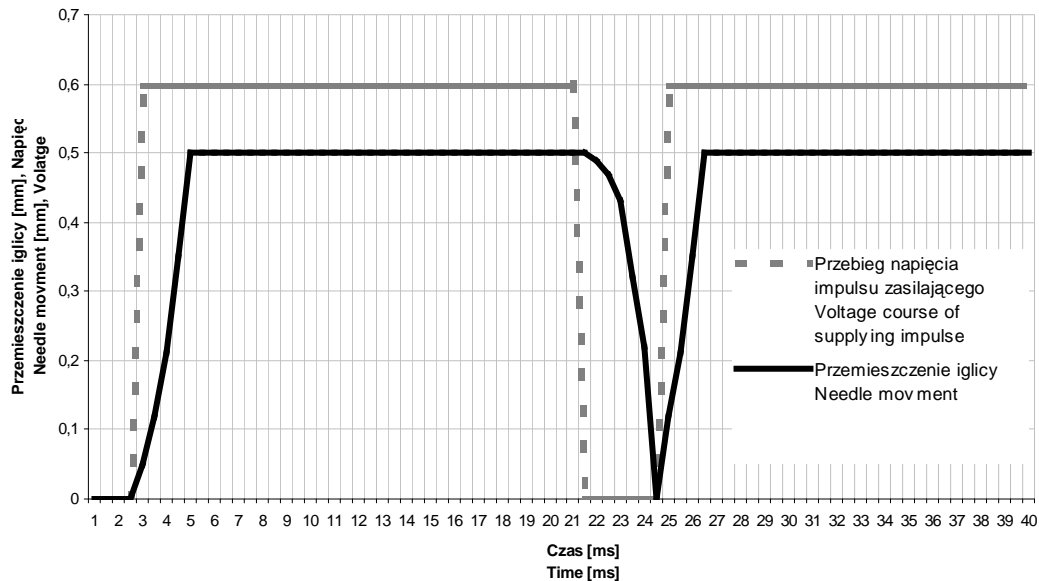
**Rys. 2.** Przebieg napięcia na wtryskiwaczu benzynowym (kolor szary) i LPG (kolor czarny) przy maksymalnym stopniu zasilania silnika i prędkości obrotowej 5000 obr/min [2]



**Rys. 3.** Przebieg napięcia na wtryskiwaczu benzynowym (kolor szary) i LPG (kolor czarny) przy maksymalnym stopniu zasilania silnika i prędkości obrotowej 6000 obr/min [2]

Przeprowadzone badania, których obiektem był samochód BMW 520i, wyposażony w sześciocyldrowy silnik M50B25 (o pojemności 1991 cm<sup>3</sup> i mocy 110 kW) oraz alternatywny układ zasilania LPG IV generacji (w skład którego wchodziły m.in.: układ sterowania Vector 6, reduktor Zavoli Zeta-N, czujnik ciśnienia PS-01 oraz listwa wtryskowa Valtek 3Ω), pozwoliły na bliższe określenie warunków występowania niepożądanego zjawiska [2]. Dla niewielkich prędkości obrotowych oraz przy niskim stopniu zasilania, instalacja gazowa pracuje prawidłowo. Problem pojawia się gdy zwiększymy prędkość obrotową i stopień zasilania. Jak pokazano na rysunku 2, przy prędkości obrotowej wynoszącej około 5000 obr/min, napięcie na wtryskiwaczu nie spada do wartości zerowej. Odstępy pomiędzy poszczególnymi cyklami pracy są bardzo małe (rzędu kilku ms), co uniemożliwia zamknięcie wtryskiwacza [16]. Silnik jest więc w takim przypadku zasilany w sposób ciągły. Po dalszym zwiększeniu prędkości (do 6000 obr/min, rysunek 3) zauważyć można, że nastąpiło wyłączenie instalacji gazowej (zanik impulsowego sygnału sterującego pracą wtryskiwaczy) przy jednoczesnym uruchomieniu konwencjonalnego, benzynowego układu paliwowego (pojawienie się impulsów sterujących wtryskiwaczami benzyny).

Symulacja numeryczna ruchu iglicy wtryskiwacza, wykonana na podstawie opracowanego modelu matematycznego [1] pokazała, że już przy prędkości obrotowej wynoszącej 4600 obr/min rozpoczyna się zjawisko niedomykania wtryskiwacza gazowego (rysunek 4).

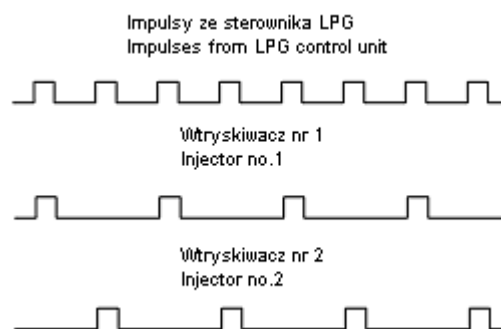


Rys. 4. Symulacja ruchu iglicy wtryskiwacza dla prędkości obrotowej równej 4600 obr/min

Wiedza na temat okoliczności występowania wyżej opisanego zjawiska pozwoliła stwierdzić, że występowanie nieprawidłowości w procesie zasilania zależne jest ściśle od indywidualnego stylu jazdy kierowcy, i oczywistym jest, że w niektórych przypadkach może nie występować wcale.

### 3. Modyfikacja układu zasilania

Zjawisko niedomykania się wtryskiwaczy ma zdecydowanie negatywny wpływ na wskaźniki służące ocenie układu zasilania (moc i moment obrotowy, zużycie paliwa oraz wskaźniki ekonomiczne). Dlatego też zdecydowano się opracować modyfikację umożliwiającą zasilanie silnika paliwem gazowym w pełnym zakresie pracy. Spośród wielu pomysłów wybrano ten, polegający na podwojeniu liczby wtryskiwaczy w taki sposób, że każdy z cylindrów docelowo będzie zasilany dwoma wtryskiwaczami działającymi naprzemiennie. Schemat zasilania takiego układu pokazano na rysunku 5.

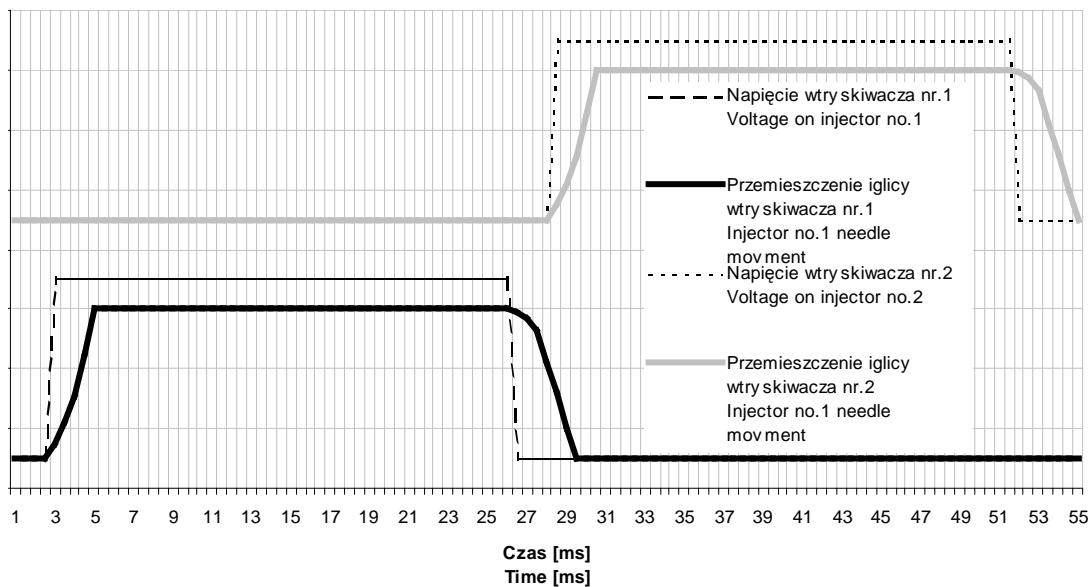


Rys. 5. Schemat zasilania wtryskiwaczy zmodyfikowanej instalacji gazowej IV generacji

Proponowane rozwiązanie ma sprawić, że każdy z wtryskiwaczy otwierać się będzie z częstotliwością dwukrotnie mniejszą niż było to fabrycznie przywidziane (czyli raz na cztery obroty wału korbowego). Zwiększenie odstępu czasu pomiędzy poszczególnymi cyklami pracy powinno pozwolić na swobodne domknięcie się iglicy i odcięcie dopływu paliwa, jak

również umożliwić dozowanie większych niż dotychczas porcji LPG. Dlatego też alternatywny układ paliwowy, po wprowadzeniu zmian konstrukcyjnych, powinien być w stanie działać poprawnie w pełnym zakresie prędkości obrotowych silnika, niezależnie od stopnia zasilania.

Przed rozpoczęciem projektowania zmodyfikowanego układu paliwowego wykonano symulację jego działania dla prędkości obrotowej silnika wynoszącej 5000 obr/min. Do symulacji wykorzystano opracowany model matematyczny o którym wspomniano wcześniej. Wynik symulacji przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Symulacja działania rozdzielacza

Aby możliwe było uruchomienie nowego układu zasilania, oprócz zdublowania wtryskiwaczy, konieczne było opracowanie układu sterującego, który rozdzieli pierwotny sygnał ze sterownika LPG na dwa podsygnały zasilające wtryskiwacze.

Zasada działania takiego układu powinna opierać się na wykorzystaniu zbocza opadającego. Oznacza to, że układ powinien wyłapywać zmianę napięcia ze stanu wysokiego na niski, i na tej podstawie przełączać tor po którym „biegnie” sygnał pierwotny, w tym wypadku generowany przez sterownik LPG. Rozdzielacz nie powinien więc zmieniać kształtu sygnału, tylko wysyłać go do odpowiednich przyłączy.

Znając ogólne założenia opracowano konstrukcję rozdzielacza, która bazuje na kilku układach scalonych (2x 7414N, 4013N, 2x TC4422AVPA), dwóch tranzystorach (IRF520 N-FET 100V 8A 40W), oraz opornikach, kondensatorach i diodach. Całość osadzona została na wykonanej specjalnie pod ten układ płytce. Wszystkie sygnały wchodzące oraz wychodzące przechodzą przez złącza precyzyjne, zamontowane na obu końcach płytki. Pierwsze dwa służą do podłączenia zasilania o napięciu 12V, dwa następne do przechwycenia sygnału generowanego przez sterownik LPG. Pozostałe cztery styki są wyjściami sygnałów sterujących wtryskiwaczami LPG w zmodyfikowanym układzie paliwowym.

Układ taki został zbudowany, i wraz z dodatkową listwą wtryskową zamontowany w pojeździe testowym. Pojazdem tym był samochód osobowy BMW 316i, wyposażony w czterocylindrowy silnik M40 (o pojemności 1596 cm<sup>3</sup> i mocy 75 kW) oraz sekwencyjną instalację gazową, której głównymi elementami były: układ sterowania ZENIT JZ, reduktor Zavili Zeta-S, czujnik ciśnienia ZENIT AA-612 oraz wtryskiwacze Valtek 3Ω.

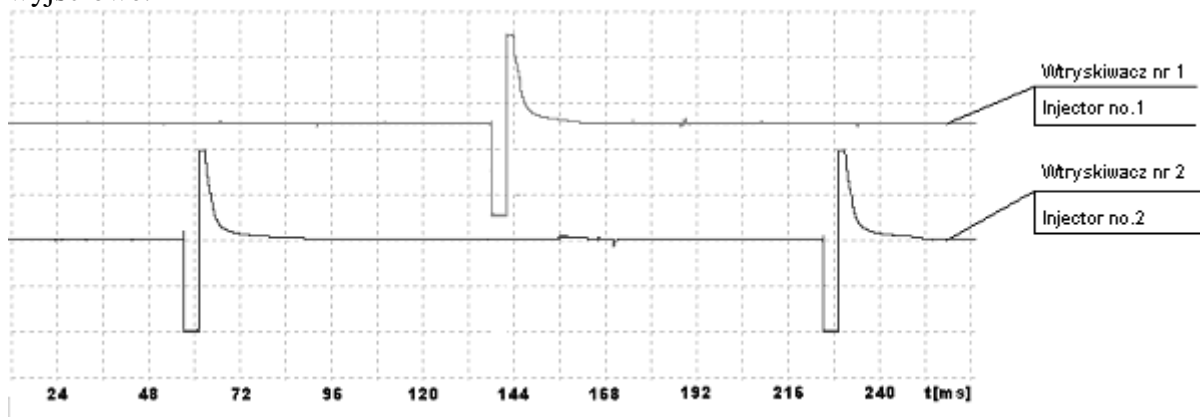
Podłączenie elektryczne rozdzielacza sygnału sterującego ogranicza się do wpięcia pomiędzy przewody wychodzące ze sterownika LPG a złącza wtryskiwaczy, natomiast

przewody paliwowe wymagają zastosowania dodatkowych rozdzielaczy. Metoda podłączenia jest więc metodą nieinwazyjną, pozwalającą na szybki powrót do fabrycznej konfiguracji w przypadku niezadowolenia użytkownika.

#### 4. Wpływ modyfikacji alternatywnego układu paliwowego na jakość procesu zasilania

Po zamontowaniu dodatkowych elementów, podłączeniu i skalibrowaniu, postanowiono zbadać wpływ wprowadzonych modyfikacji na przebieg procesu zasilania. Pierwsza jazda testowa wykazała znaczną poprawę w zakresie dużych prędkości obrotowych. Zauważono, że podwojona liczba wtryskiwaczy przyczyniła się do zniwelowania spadku mocy dla tychże prędkości, oraz wyeliminowała zjawisko przełączania się na konwencjonalny, benzynowy układ paliwowy.

Wykorzystując oscyloskop dokonano pomiarów napięcia na złączach wtryskiwaczy, co pozwoliło na sprawdzenie poprawności rozbicia jednego sygnału wejściowego na dwa wyjściowe.

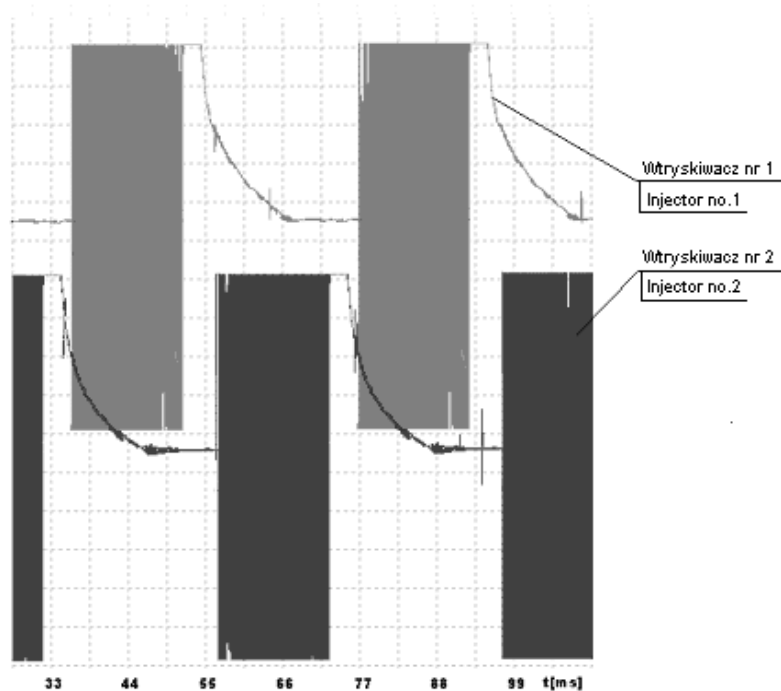


**Rys. 7.** Przebieg impulsów na wtryskiwaczach jednego cylindra, w zmodyfikowanej instalacji gazowej, dla prędkości obrotowej około 700 obr/min

Wyniki przedstawione na rysunku 7 pokazują wyraźnie, że osiągnięto zamierzony efekt. Zamontowane urządzenie elektryczne rozdzieliło sygnał generowany przez sterownik LPG na dwa wtryskiwacze, które działają naprzemiennie. Pozytywny efekt modyfikacji pozwolił na przeprowadzenie dalszych badań: przebiegu napięcia dla większych prędkości obrotowych.

Napięcie na wtryskiwaczach mierzono co 1000 obr/min (od 1000 do 5000 obr/min). Pomiar polegał na zapisie przebiegów sygnałów sterujących trwających około 10 sekund, trzykrotnie dla każdej prędkości obrotowej. Wykorzystano w tym celu wspomniany wcześniej oscyloskop i komputer przenośny. W każdym badanym przypadku sygnał rozdzielany był prawidłowo, a wtryskiwacze zasilające ten sam cylinder działały na zmianę. W instalacji zmodyfikowanej, przy 5000 obr/min (rysunek 8), czyli prędkości dla której wtryskiwacz pozostawał otwarty (w układach przed modyfikacją), zauważyć można, że napięcie na każdym z wtryskiwaczy spada do wartości zerowej, a odstępy pomiędzy następującymi po sobie cyklami pracy są na tyle duże, że iglica zdąży wrócić do pozycji zamkniętej [16] (dla wtryskiwacza nr.1 zanik impulsu sterującego następuje w około 70 ms pomiaru, a pojawienie się kolejnego impulsu - około 78 ms; przedział czasowy jest więc wystarczająco duży do całkowitego zamknięcia wtryskiwacza [16]).





**Rys. 8.** Przebieg impulsów na wtryskiwaczach zmodyfikowanej instalacji gazowej dla prędkości obrotowej około 5000 obr/min

Podwojenie liczby wtryskiwaczy sprawiło również, że przy każdej prędkości obrotowej oraz dla każdego stopnia zasilania układ paliwowy jest w stanie dostarczyć wymaganą ilość paliwa (maksymalna wydajność wzrosła dwukrotnie). Instalacja gazowa przestała więc się wyłączać i prawidłowo realizuje proces zasilania w każdych warunkach pracy.

## 5. Podsumowanie

Polska, pod względem popularności paliw alternatywnych, w szczególności LPG, oraz liczby pojazdów zasilanych nimi, zajmuje miejsce w czołówce państw europejskich. Instalując systemy zasilania LPG użytkownicy pojazdów czynią to w większości z powodów czysto ekonomicznych, godząc się z wieloma mankamentami cechującymi pracę instalacji gazowych. Ciągły rozwój konstrukcji alternatywnych układów zasilania zmniejsza owe mankamenty, jednak jak dotąd nie jest w stanie całkowicie ich usunąć. Przy masowej skali zastosowania pojazdów w transporcie osób i towarów, nawet niewielki wkład w poprawę systemów zasilania silników spalinowych ma istotne znaczenie dla gospodarki i środowiska naturalnego.

Propozycja modyfikacji instalacji LPG, przedstawiona w niniejszej pracy, znacząco wpływa na przebieg procesu zasilania silnika. Zbudowany układ elektroniczny rozdziela sygnał sterujący, generowany przez sterownik LPG, na dwa podsygnały sterujące pracą wtryskiwaczy danego cylindra. Rozwiązanie takie sprawia, że silnik zasilany jest precyzyjnie przy niewielkich prędkościach obrotowych oraz niskich stopniach zasilania, jak też wystarczająco wydajnie przy dużych prędkościach obrotowych i stopniach zasilania. Dwukrotne zmniejszenie częstotliwości pracy wtryskiwaczy sprawia, że są one mniej obciążone cieplnie, oraz zmniejsza ryzyko wystąpienia zjawiska nasycenia magnetycznego [13]. Dzięki temu proces dawkowania paliwa charakteryzuje się większą powtarzalnością, a wtryskiwacze - większym rezersem.

Wprowadzona modyfikacja wyeliminowała również problem wyłączenia się alternatywnego układu paliwowego przy dużej prędkości obrotowej i dużym stopniu zasilania. Zmiana ta owocuje m.in.:

- zmniejszeniem kosztów eksploatacyjnych z racji mniejszego zużycia benzyny, która jest droższym paliwem niż LPG;
- poprawieniem wskaźników użytecznych silnika, gdyż każda zmiana źródła zasilania powoduje konieczność „uczenia się” na nowo mapy zasilania przez komputer sterujący (ECU), przez co silnik generuje mniejsza moc i moment obrotowy [16];
- zmniejszeniem poziomu emisji szkodliwych związków zawartych w spalinach poprzez ograniczenie emisji tlenu i dwutlenku węgla, zgodnie z panującym w środowisku motoryzacyjnym trendem (w procesie spalania LPG powstaje mniejsza ilość szkodliwych dla środowiska związków chemicznych niż w procesie spalania benzyny [12]).

Zaletą opisywanego rozwiązania jest również koszt związany z wprowadzeniem modyfikacji (szacowany na podstawie kosztów poniesionych przez autora związanych ze zbudowaniem oraz montażem urządzenia), który waha się w granicach 10% kosztu przystosowania pojazdu do zasilania paliwem alternatywnym. Jest on więc niewielki biorąc pod uwagę korzyści płynące z usprawnionej konstrukcji.

## Literatura

1. Borawski A, Siemieniako F. Model matematyczny pracy wtryskiwacza LPG. *Pneumatyka* 2011; 2: 52-55.
2. Borawski A, Siemieniako F. Wpływ prędkości obrotowej i obciążenia silnika na przebieg impulsu sterującego wtryskiwaczami płynnego gazu ropopochodnego. *Acta Mechanica et Automatica* 2010; 4(2): 25-28.
3. Cui H. Exhaust Gas Recirculation Control in a Spark-Ignition LPG Engine Using Neural Networks. *Intelligent Control and Automation* 2006; 2: 6332 - 6335.
4. Cui H. The Fuel Control System and Performance Optimization of a Spark-Ignition LPG Engine. *Measuring Technology and Mechatronics Automation* 2009; 1: 901-904.
5. Danardono D, Kim K S, Roziboyev E, Kim C U. Design and optimization of an LPG roller vane pump for suppressing cavitation. *International Journal of Automotive Technology* 2010; 11(3): 323-330.
6. Hosek M, Beroun S, Dittrich A. Pressure in nozzle canal for injection of LPG. *XLII International Scientific Conference Of Czech And Slovak University Departments And Institutions Dealing With The Research Of Combustion Engines* 2011; 1-31
7. Lee K, Ryu J. An experimental study of the flame propagation and combustion characteristics of LPG fuel. *Fuel* 2005; 84: 1116-1127.
8. Majerczyk A, Radzimirski S. Effect of LPG gas fuel injectors on the properties of low emission vehicles. *Journal of KONES* 2012; 19(4): 401-410.
9. Majerczyk A, Taubert S. Układy zasilania gazem propan-butan. Warszawa: WKŁ, 2006.
10. Merksiz J, Pielacha I. Alternatywne paliwa i układy paliwowe pojazdów. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2004.
11. Mohamad T I, Jermy M, Harrison M. Experimental Investigation of a Gasoline-to-LPG Converted Engine Performance at Various Injection and Cylinder Pressures With Respect to Propane Spray Structures. *Applied Mechanics and Materials* 2013; 315: 20-24.

12. Mustafa K F, Gitano Briggs H W. Liquefied petroleum gas (LPG) as an alternative fuel in spark ignition engine: Performance and emission characteristics. *Energy and Environment* 2009; 189 - 194.
13. Rawa H. Elektryczność i magnetyzm w technice. Warszawa: PWN, 2001.
14. Ristovski Z D, Jayaratne E R, Morawska L, Ayoko G A, Lim M. Particle and carbon dioxide emissions from passenger vehicles operating on unleaded petrol and LPG fuel. *Science of the Total Environment* 2005; 345: 93-98.
15. Sunwoo M, Sim H, Lee K. Design and development of an ECU anti its air-fuel ratio control scheme for an LPG engine with a bypass injector. *Vehicle Electronics Conference* 1999;. 508-513.
16. Szpica D. Analiza możliwości adaptacyjnych silnika spalinowego do zasilania paliwem alternatywnym na przykładzie LPG. Białystok 2013.
17. Wendeker M. Badania algorytmów sterujących samochodowym silnikiem benzynowym. Warszawa: PWN, 2000.