

Mikrosystemy w motoryzacji – laboratorium

Ćwiczenie nr 1

Badanie właściwości szerokopasmowej sondy λ

opracował: dr inż. Paweł Knapkiewicz

Wprowadzenie:

Jak podają źródła w 1976 roku firma *Volvo Cars* wprowadziła trójfazowy reaktor katalityczny z sondą lambda w modelu *Volvo 244*, przeznaczonym na rynek amerykański. Wykorzystano wtedy czujnik tlenowy wyprodukowany przez firmę *BOSCH* (Rysunek 1 a). Był to jednocześnie pierwszy tego typu sensor na świecie. Pozwoliło to na skuteczne zmniejszenie zawartości zanieczyszczeń w spalinach samochodowych. Mimo bardzo rygorystycznych obostrzeń wprowadzonych w 1977 roku w stanie Kalifornia, który stał się wyznacznikiem w zakresie jakości spalin, powyższe rozwiązanie spełniało je z wyraźnym zapasem. Problemem było niestabilne połączenie elektryczne z ujemnym biegunem instalacji realizowane przez układ wydechowy. Zostało to dość szybko wyeliminowane przez wprowadzenie sond dwuprzewodowych. Jednocześnie były one ogrzewane samymi spalinami co uniemożliwiało ich instalację w miejscach bardzo oddalonych od silnika [1-3].

Kolejnym krokiem rozwoju było wyprodukowanie przez firmę *BOSCH* w 1982 roku sondy z grzejnikiem (Rysunek 1 b). Wprowadzenie takiego rozwiązania pozwoliło dwukrotnie zwiększyć jej trwałość. Mogła ona dzięki temu pracować przy przebiegu 160 000 km bez żadnych zarzutów. Jednocześnie wprowadzenie grzałki pozwalało na montaż sondy w miejscach bardziej oddalonych od silnika, można więc było sprawdzać zawartość tlenu w spalinach za katalizatorem. Zdecydowanym atutem był również fakt, że osiągały stan pracy już po 30 sekundach od momentu włączenia zimnego silnika [4,3].

W latach osiemdziesiątych na rynek swój produkt wprowadziła firma *DENSO*. Sonda lambda mieszanki ubogiej (*Lean Burn Sensor*) przeznaczona była do silników *TOYOTA* zasilanych ubogimi mieszankami [3].

W latach dziewięćdziesiątych pojawiły się czteroprzewodowe sondy (Rysunek 1 c), w których grzałka połączona była przewodem ujemnym oraz dodatnim. Uzyskano w ten sposób stabilniejsze połączenie elektryczne w porównaniu do konstrukcji trójprzewodowej. Na uwagę zasługuje również wprowadzenie tytanowej sondy lambda, która umożliwia pracę bez bezpośredniego kontaktu z powietrzem atmosferycznym. Dzięki temu była ona całkowicie szczelna [3].

Rok 1994 przyniósł kolejne warte uwagi rozwiązanie. Do tej pory rynek zdominowany był przez sondy typu kubkowego, natomiast firma *BOSCH* rozwinęła produkcję sond lambda typu planarnego (Rysunek 1 d). Były one również wyposażone w grzałkę. Nagrzewanie sondy do stanu pracy trwało zaledwie 10 sekund dzięki mniejszej masie elementu pomiarowego [4].

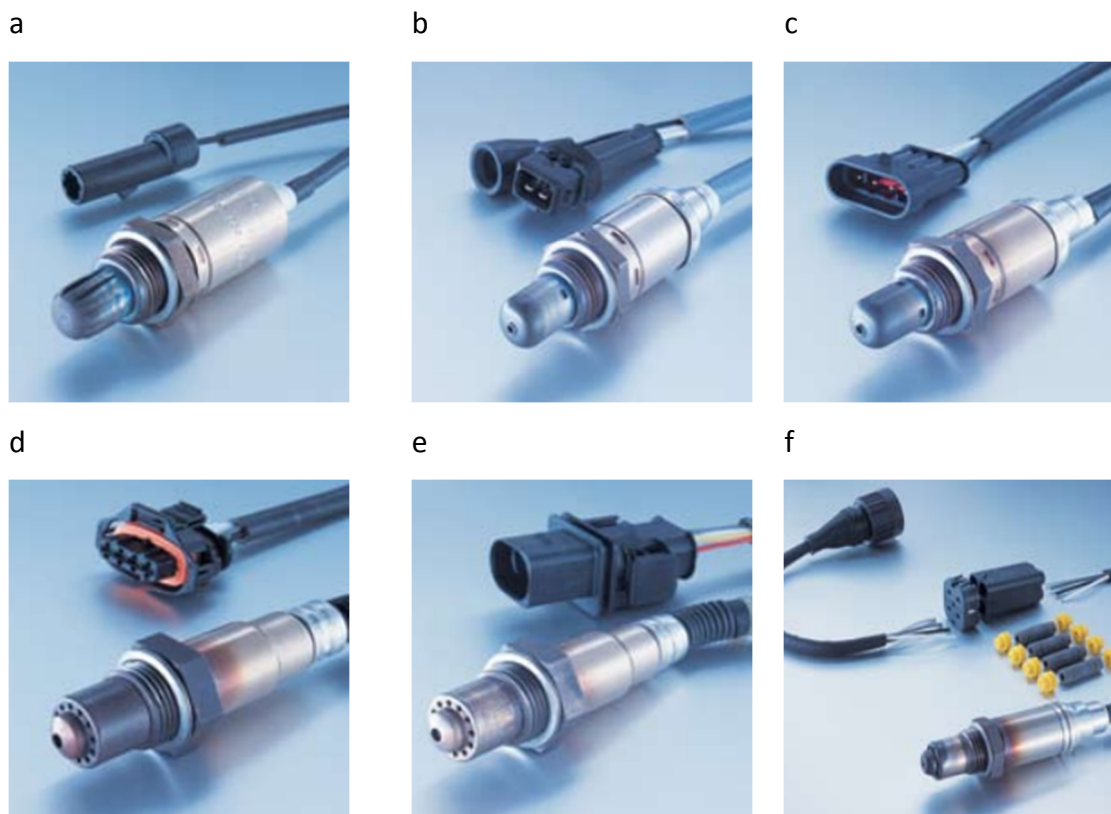
W tym samym dziesięcioleciu wraz z wprowadzeniem kontroli OBD (On-Board Diagnostics) oraz kolejnymi obostrzeniami ekologicznymi zaczęto wykorzystywać większą ilość sond

w układzie. Początkowo były to dwie sondy lambda, przed i za katalizatorem, z czasem zaczęto stosować inne kombinacje jeszcze bardziej usprawniające pracę silnika [5].

Następnie powstała liniowa sonda lambda, której zdecydowaną zaletą był fakt, że wysyłała sygnał liniowy wskazujący dokładny skład spalonej mieszanki. Dotychczasowe sondy dwustanowe informowały jedynie czy mieszanka była uboga czy bogata. Umożliwiło to dużo dokładniejsze oraz szybsze unormowanie ilości wtryskiwanego paliwa [3].

Wraz z rozwojem technologii wytworzono szerokopasmową sondę lambda (Rysunek 1 e), która podobnie jak sonda liniowa pozwala na dokładne określenie składu mieszanki paliwo-powietrze. Przewyższa jednak poprzednie rozwiązanie szerszym zakresem pracy, głównie dla mieszanki ubogiej [3].

Ostatnią z dotychczasowego rozwoju jest uniwersalna sonda lambda (Rysunek 1 f), która dzięki odpowiedniemu podłączeniu może zastąpić dużą liczbę typów oryginalnych czujników [6].

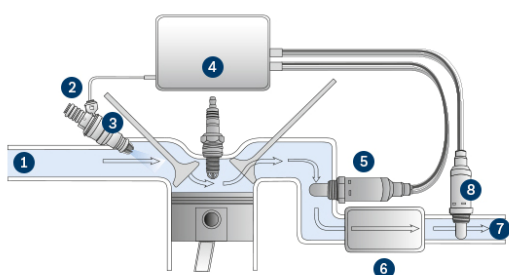


Rysunek 1. a) Jednoprzewodowa sonda lambda typu kubkowego; b) trzyprzewodowa sonda lambda typu kubkowego; c) czteroprzewodowa sonda lambda typu kubkowego; d) czteroprzewodowa sonda lambda typu planarnego; e) szerokopasmowa sonda lambda; f) uniwersalna sonda lambda [6].

Sonda lambda poza rozwiązaniami komercyjnymi swoje zastosowanie znajduje również w motorsporcie oraz rozwiązaniach wojskowych. Dzięki badaniu mieszanki można uzyskać maksymalne osiągi wszystkich jednostek spalinowych. Oprócz konstrukcji, w których sygnał z czujnika umożliwia sterowanie wtryskami, stosuje się je również do silników z gaźnikami. Obserwacje składu mieszanki pozwalają na jego optymalne ustawienie.

Zasada działania i podstawowe parametry sondy lambda

Czujnik tlenowy jest najważniejszą częścią w układzie kontroli spalin. Ponadto we współczesnych rozwiązaniach stanowi podstawę do wtrysku paliwa. Obecnie stosuje się je w dwóch lub więcej miejscach układu wydechowego, standardowo przed i za katalizatorem (Rysunek 2) [7,8].



Rysunek 2. Układ regulacji pracy silnika z sondą lambda [7].

- 1 – powietrze zasysane
- 2 – doprowadzenie paliwa
- 3 – wtryskiwacz
- 4 – sterownik
- 5 – sonda regulacyjna (przed katalizatorem)
- 6 – katalizator
- 7 – spaliny
- 8 – sonda kontrolująca (za katalizatorem)

Podczas procesu spalania powstają szkodliwe związki chemiczne takie jak węglowodory, tlenki azotu czy tlenki węgla. Dąży się do tego by ich zawartość w spalinach była jak najmniejsza. Spaliny po wylocie z komory spalania początkowo docierają do pierwszej sondy umieszczonej przed katalizatorem. Czujnik tlenowy wysyła informacje o składzie mieszanki do urządzenia sterującego ECU (*Electronic Control Unit*), które steruje mieszanką paliwo-powietrze. Pozwala to na utrzymanie maksymalnego dopalania mieszanki oraz obniżenie zawartości toksycznych substancji. Za katalizatorem umieszczona jest sonda kontrolująca, która umożliwia doregulowanie uwzględniając stan katalizatora. W starszych rozwiązaniach stosowany jest jeden czujnik umieszczony za kolektorem wydechowym [8].

Mieszanka stechiometryczna

Sonda lambda może być skutecznym narzędziem, dzięki temu, że jednym ze składników spalania jest tlen, którego zawartość jest mierzona. Ilość niewykorzystanego tlenu w mieszance pozwala określić jej skład a więc pozwala ustalić czy jest uboga, czy bogata. Opisuje to parametr AFR określony wzorem (1).

$$AFR = \frac{\text{masa powietrza}}{\text{masa paliwa}} \quad (1)$$

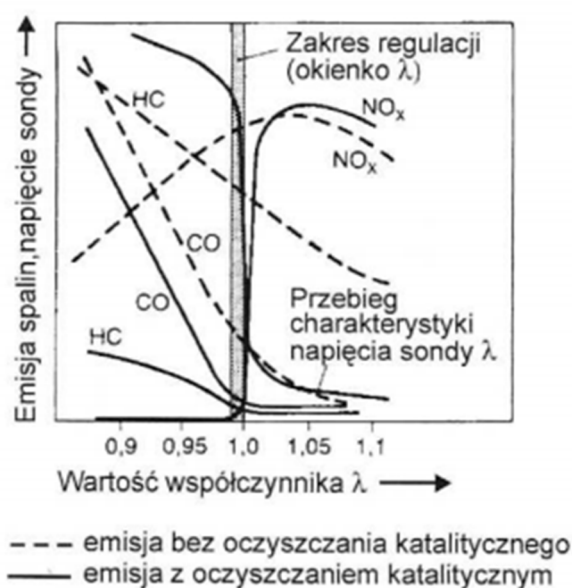
W zależności od zachowania tej proporcji zmieniała się będzie zawartość poszczególnych składników spalin. Mieszanka stechiometryczna zawiera dokładnie tyle powietrza ile jest potrzebne do całkowitego spalania. Na 1 kg paliwa przypada w niej 14,7 kg powietrza. W przypadku gdy udział powietrza będzie mniejszy mamy do czynienia z mieszanką bogatą. Wraz ze zmniejszeniem zawartości tlenu w spalinach będzie wzrastał poziom wodorotlenków i tlenków węgla. Natomiast przy podwyższonym procencie powietrza mieszanka jest uboga. Silnik pracuje ekonomiczniej jednak znacznie podnosi się udział tlenu azotu w spalinach [8].

Współczynnik Lambda

Sonda lambda mierzy ciśnienie parcjale tlenu w spalinach i określa czy w mieszance paliwo-powietrze jest wystarczająca ilość tlenu do całkowitego spalania paliwa. W rzeczywistości sprowadza się to do pomiaru zawartość tlenu w mieszance spalinowej. Jej nazwa pochodzi od greckiej litery λ , którą opisuje się za pomocą wzoru (2).

$$\lambda = \frac{AFR_R}{AFR_S} = \frac{AFR_R}{14,7} \quad (2)$$

Spalanie mieszanki stechiometrycznej daje współczynnik lambda równy 1. Utrzymując tą wartość można maksymalnie zredukować emisję toksycznych substancji. Uzyskuje się tak kompromis pomiędzy szkodliwymi substancjami o niewielkim procencie zawartości w spalinach oraz substancjami, które zostaną zredukowane w katalizatorze. W przypadku gdy mieszanka będzie różna od stechiometrycznej będzie to widziane przez ECU i nastąpi skorygowanie ilości wtryskiwanego paliwa. W rzeczywistości przyjęte jest tak zwane okno lambda, które stanowi granicę błędu [8].



Rysunek 3. Zakres regulacji sondy lambda i zmniejszenie zawartości szkodliwych składników spalin [9].

Rodzaje sond lambda

Obecnie w przemyśle można wyróżnić dwa podstawowe typy sond lambda. Sondę dwustanową oraz sondę szerokopasmową.

Dwustanowa sonda lambda

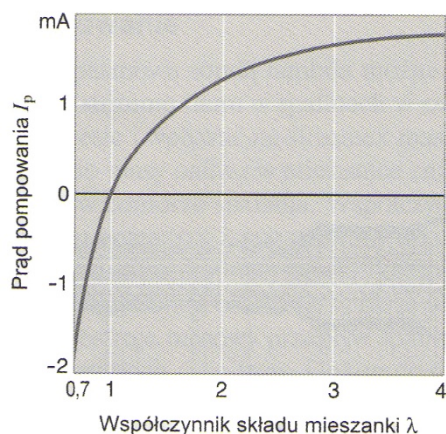
Sondy dwustanowe mają zastosowanie w silnikach z zapłonem iskrowym. Wykorzystywane są do regulacji składu mieszanki. W układzie wydechowym znajdują się między kolektorem a katalizatorem. Wąskopasmowa sonda mierzy zawartość tlenu w spalinach i porównuje z zawartością tlenu w powietrzu atmosferycznym. Wynikiem pomiarów jest wskazanie czy

silnik pracuje na mieszance ubogiej ($\lambda > 1$) czy bogatej ($\lambda < 1$). Korekta składu paliwa realizowana jest na skutek skokowej charakterystyki sondy lambda. Dąży się do utrzymania mieszanki stechiometrycznej ($\lambda = 1$) [10].

Szerokopasmowa sonda lambda

Częściej wykorzystywanym czujnikiem tlenowym jest szerokopasmowa sonda lambda. Jej zdecydowaną zaletą jest fakt, że pozwala określić dokładny skład mieszanki w szerokim zakresie. Dokonuje dokładnego pomiaru składu spalin nie tylko w punkcie stechiometrycznym ($\lambda = 1$). Dzięki wykorzystaniu odpowiedniego układu elektronicznego możliwe jest ciągły i bezbłędny sygnał z zakresu $0,7 < \lambda < \infty$. Dzięki temu można ją wykorzystywać również w jednostkach pracujących na mieszankach bogatych i ubogich. Sonda szerokopasmowa ma zastosowanie w wielu jednostkach komercyjnych, a także w motorsporcie. Najlepsze osiągi silników spalinowych uzyskuje się w określonym przedziale mieszanki bogatej. Wykorzystanie czujnika tlenowego pozwala ustalić odpowiednią mieszankę paliwo-powietrze by zachować maksymalną sprawność silnika [10].

Spaliny przedostają się do przestrzeni pomiarowej ogniwa Nernsta, gdzie porównywane są z powietrzem otoczenia. Dzięki temu ustalana jest aktualna wartość współczynnika składu mieszanki λ . Do platynowych elektrod przyłożone jest napięcie U_p . Tlen oddzielony ze spalin jest pompowany lub wypompowywany ze szczeliny dyfuzyjnej. Moduł sterujący reguluje napięcie U_p żeby gaz w szczelinie dyfuzyjnej był zgodny z mieszanką stechiometryczną. W przypadku mieszanki bogatej tlen pompowany jest do szczeliny dyfuzyjnej, natomiast w przypadku mieszanki ubogiej wypompowywany na zewnątrz. Jeśli $\lambda = 1$ prąd pompy jest zerowy więc tlen nie jest transportowany. Prąd pompy jest proporcjonalny do zawartości tlenu w spalinach i pozwala wyznaczyć skład mieszanki [10].

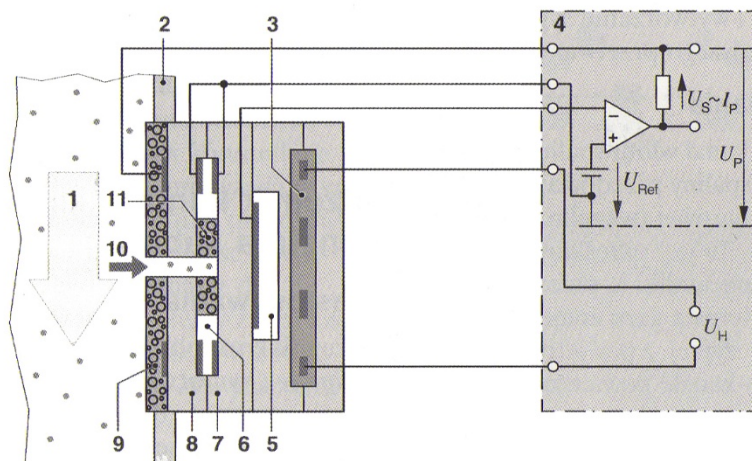


Rysunek 4. Prąd pompowania I_p szerokopasmowej sondy lambda w zależności od współczynnika składu mieszanki lambda [10].

Przez lata budowa sondy zmieniała się wraz z jej rozwojem. W jej strukturze pojawiały się różne udoskonalenia. Wprowadzono do jej budowy grzałkę a w późniejszym etapie zmieniono jej budowę z kubkowej na planarną. W pracy została wykorzystana szerokopasmowa sonda lambda.

Planarna szerokopasmowa sonda lambda jest czujnikiem, którego element pomiarowy wykonany jest z dwutlenku cyrkonu. Jest on połączeniem ogniwa *Nernsta* oraz pompy tlenowej do transportu jonów tlenu. Element pomiarowy posiada szczelinę dyfuzyjną o szerokości ok. 10-50 μm umiejscowioną między ogniwem *Nernsta* i pompą tlenową. Umiejscowione są w niej dwie platynowe elektrody. Szczelina dyfuzyjna ma ciągły kontakt ze spalinami dzięki kanałowi wlotu gazów. Dopływ cząstek gazu ograniczony jest przez porowatą przegrodę dyfuzyjną. Ogniwo *Nernsta* ma kontakt z jednej strony ze szczeliną dyfuzyjną, a z drugiej, z powietrzem atmosferycznym [10].

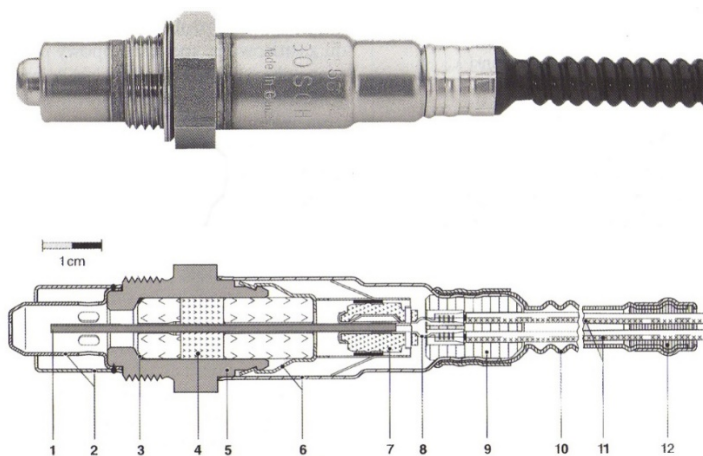
- 1- gazy spalinowe,
 - 2- rura wylotowa,
 - 3- układ podgrzewania,
 - 4- elektronika regulacyjna,
 - 5- komora odniesienia z kanałem powietrza,
 - 6- przestrzeń dyfuzyjna,
 - 7- komora stężeniowa (ogniwo) *Nernsta* z elektrodą pomiarową i elektrodą referencyjną,
 - 8- pompa tlenu z elektroniką pompującą,
 - 9- porowata warstwa ochronna,
 - 10- kanał wlotu gazu,
 - 11- porowata przegroda dyfuzyjna,
- I_p - prąd sterujący,
 U_p - napięcie pompowania,
 U_{Ref} - napięcie referencyjne (450mV, odpowiada $\lambda=1$),
 U_s - napięcie sondy.



Rysunek 5. Budowa elementu pomiarowego Planarnej szerokopasmowej sondy lambda [10].

Układy sterujące regulują wytwarzanie sygnału przez sondę oraz jej temperaturę. Dzięki grzałce sonda może pracować w niedogrzanym środowisku [10].

- 1- element pomiarowy (ogniwo *Nernsta* i pompa tlenu),
- 2- podwójna tuleja ochronna,
- 3- pierścień uszczelniający,
- 4- pakiet uszczelniający,
- 5- korpus sondy,
- 6- tuleja obudowy,
- 7- gniazdo styków,
- 8- styki,
- 9- tulejka z PTFE,
- 10- osłona z PTFE,
- 11- pięć przewodów łączących,
- 12- uszczelka.



Rysunek 6. Widok i przekrój planarnej szerokopasmowej sondy lambda [10].

Cel i zakres ćwiczenia:

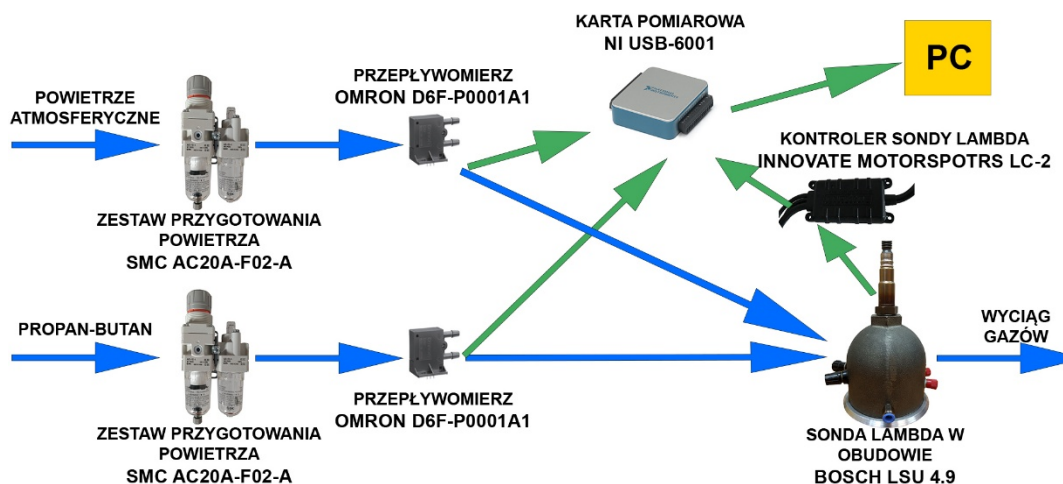
Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynnika AFR sondy tlenowej dla różnego składu mieszaniny powietrza i gazu propan/butan.

Do zadań podczas ćwiczenia należy:

- zadawanie parametrów mieszaniny gazowej przez ustawianie odpowiedniego przepływu powietrza oraz gazu propan/butan,
- odczyt wartości przepływu i przeliczenie do jednostek masy (z cm^3/min na kg/min),
- odpowiednie przedstawienie uzyskanych wyników w postaci tabel lub/i wykresów.

Stanowisko pomiarowe:

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na Rys. 7. Gazy podawane są przez zestawy przygotowania powietrza oraz mieszaniny propan/butan. Przepływ gazów mierzony jest przez przepływomierz OMRON D6F-P0010A1. Mieszanina doprowadzana jest do komory stalowej w której zamontowana jest sonda lambda. Sygnał napięciowy z przepływomierzy oraz sygnał zwrotny z kontrolera sondy lambda rejestrowany jest przez kartę pomiarową National Instruments USB-6001.



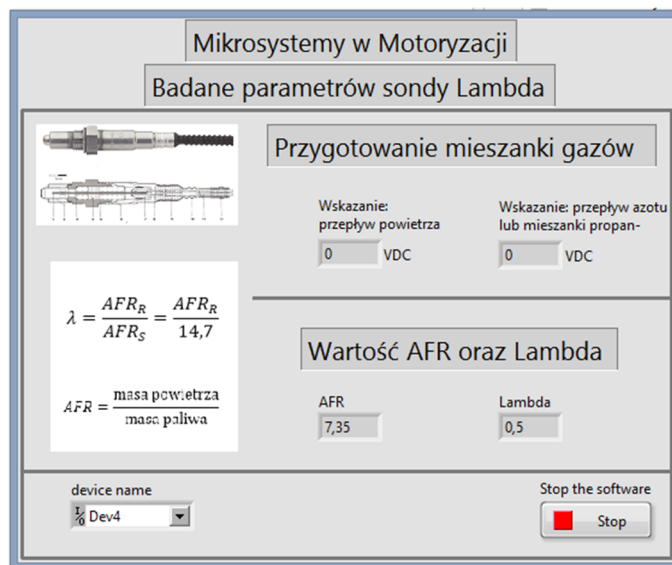
Rysunek. 7. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego.

Na panelu operatora (Rysunek8) znajdują się: odczyty wartości lambda, AFR oraz przepływu powietrza atmosferycznego, przepływu azotu lub mieszaniny propan-butan.



UWAGA:

Podczas pracy z mieszaniną propan-butan należy zachować szczególną ostrożność. Wszelkie nieprawidłowości należy natychmiast zgłaszać prowadzącemu, w tym szczególnie o wyczuwalnej woni gazu propan-butan.



Rysunek 8. Widok panelu operatora w oprogramowaniu LabView.

Przebieg ćwiczenia:



UWAGA:

Przed przystąpieniem do ćwiczenia zapoznaj się z notą katalogową przepływomierza **OMRON D6F-P0010A1**.

- uruchom oprogramowanie Lambda.exe – skrót na pulpicie komputera,
- odkręć dławiki na liniach gazowych,
- otwórz zawory odcinające powietrza i azotu,
- manipulując pokrętkami regulatorów ciśnienia, wyreguluj przepływ tak, aby jego wartość była bliska maksymalnej,
- zakręć dławiki i przystąpić do pomiarów.



UWAGA:

Zmiany medium z azotu na propan-butan dokonuje wyłącznie prowadzący.

Manipulując przepływem gazów (regulacja dławikami), należy odczytać sygnał sondy lambda dla różnych stężeń powietrza. Ilość przygotowanych mieszanin (stężeń) nie powinna być mniejsza niż 20.

Należy pamiętać, że na panelu użytkownika podawana jest wartość wyjściowa, napięciowa z przepływomierza. Sygnał napięciowy należy przeliczyć na przepływ. Uwzględniając przepływy oraz średnią zawartość tlenu w powietrzu atmosferycznym = 18%, należy obliczyć stężenie tlenu.

Wzór tabeli pomiarowej przedstawiono w Tabeli. 1.

Tabela 1. Wartość AFR i Lambda w funkcji zawartości tlenu w mieszaninie gazów.

L.p.	Przepływ powietrza	Przepływ azotu / propan-butan	Przepływ powietrza	Przepływ azotu / propan-butan	Udział objętościowy powietrza w mieszaninie	Stężenie tlenu w mieszaninie
	[V]	[V]	[ml/min]	[ml/min]	[% obj.]	[%]
1	2,8	0			100	18
...	2,8					
...	2,8					
10	2,8	2,8			50	9
11		2,8				
...		2,8				
...		2,8				
20	0	2,8			0	0

* wartość przepływu = 2,8V podana tylko jako przykład wartości bliskiej maksymalnej.

Opracowanie wyników:

Obróbka danych na celu ujawnienie zmian wartości AFR oraz Lambda w funkcji stężenia tlenu.

Konieczne jest zatem odpowiednie przeliczenie przepływu wyrażonego w skali napięciowej, na przepływ w jednostkach ml/min. Dalej konieczne jest obliczenie stężenia objętościowego powietrza w mieszaninie oraz stężenia tlenu.

Pożądane jest przeliczenie udziału masowego (stężenie masowe) zakładając, że powietrze składa się z 82 % azotu i 18 % tlenu, a mieszanina propan-butan 50% propanu i 50% butanu.

Należy wyjaśnić przyczynę, dla której wartość Lambda dla mieszaniny powietrza i azotu nie spada poniżej jedności (dla $C_{N_2} = 100\%$); inaczej niż w przypadku mieszaniny powietrza i gazu propan-butan, kiedy parametr Lambda spada do około 0,6 (dla $C_{C_3H_8/C_4H_{10}} = 100\%$).

Zagadnienia do samodzielnego przygotowania

1. Zasada działania i budowa sondy Lambda.
2. Wyjaśnić pojęcie AFR oraz parametru Lambda.
3. Biegła umiejętność przeliczania stężenia objętościowego i masowego.

Literatura

- [1] 30 years of Volvo's revolutionary Lambda sensor[online], Volvo car group, 2006, [dostęp: 12-12-2017]. Dostęp w internecie: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/5124>
- [2] Piotr Złoty, Uniwersalne sondy lambda Bosch[online], gazeteo.pl, 2013, [dostęp: 12-12-2017]. Dostęp w internecie: <http://gazeteo.pl/poradniki/eksploatacja/Uniwersalne-sondy-lambda-Bosch,artykul,6714.html>

- [3] Ewolucja sond lambda[online], e-autonaprawa.pl, 2011,].dostęp: 12-12-2017]. Dostęp w internecie: <http://www.e-autonaprawa.pl/artykuly/2057/ewolucja-sond-lambda.html>
- [4] Oxygen sensors[online], Service Tech Magazine, 2001, [dostęp: 12-12-2017]. Dostęp w internecie: <http://turbobricks.com/resources/O2sensors.pdf>
- [5] A History of the Oxygen Sensor - On The Line[online], SUPER STREET NETWORK, 2004, [dostęp: 12-12-2017]. Dostęp w internecie: <http://www.superstreetonline.com/features/epcp-0407-history-of-the-oxygen-sensor/>
- [6] Numer 1 od samego początku sondy lambda BOSCH[online], [dostęp: 12-12-2017]. Dostęp w internecie: https://aa-boschap-pl.resource.bosch.com/media/_pl/parts/electrical_systems_accessories__auto_parts/sensors__e_s_a/bosch_lambdasonden_no1.pdf
- [7] Oficjalna strona internetowa BOSCH POLSKA, zakładka Budowa i Funkcje / Lokalizacja w układzie wtryskowym[online], [dostęp: 12-12-2017]. Dostęp w internecie: https://pl.bosch-automotive.com/pl/parts_and_accessories/electrical_system_and_accessories/sensors_17/sondy_lambda/lambda_sensor_2
- [8] Rozdział 5. Elektrochemiczne czujniki gazów[online], [dostęp: 12-12-2017]. Dostęp w internecie: http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/automatyka/c_sensory_gazu/pdf/r5.pdf
- [9] Anton Herner, Riehl Hans-Jurgen, Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych, Wydanie 10, Warszawa: WKŁ, 2013, s.347. ISBN 978-83-206-1921-8
- [10] Robert Bosch GmbH, Informator techniczny, Elektrotechnika i elektronika samochodowa, Czujniki w pojazdach samochodowych, Wydanie 2, Warszawa: WKŁ, 2009, s.139-144. ISBN 978-83-206-1721-4