

Uniwersalny samochodowy miernik spalania LPG/CNG

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób realizacji samochodowego miernika spalania LPG/CNG. Miernik ma charakter uniwersalny i może współpracować z układami z wtryskiem pośrednim i bezpośrednim. Po przedstawieniu podstaw teoretycznych, uwagę skoncentrowano na sprzętowych i programowych aspektach realizacji urządzenia. Precyzyjnie przedstawiono sposób wyznaczania spalania średniego i chwilowego oraz procedurę kalibracji, zapewniającą możliwość pracy miernika w dowolnym samochodzie. Zaprojektowany i wykonany prototyp miernika został zamontowany w samochodzie Honda Accord, poprawnie realizując wszystkie założone funkcje.

Abstract. The paper presents the implementation of an automotive LPG/CNG combustion meter. The meter is universal in nature and can work with indirect and direct injection systems. After presenting the theoretical backgrounds, attention was focused on the hardware and software aspects of the implementation. The method of determining the average and instantaneous combustion was presented in detail, as well as the calibration procedure, ensuring that the meter can work in any car. The designed and manufactured prototype of the meter was installed in a Honda Accord car, correctly performing all the assumed functions. (**Car Universal LPG/CNG**)

Słowa kluczowe: samochodowy miernik spalania gazu, komputer pokładowy, wyposażenie samochodu

Keywords: car gas combustion meter, on-board computer, car equipment, automotive equipment

Wstęp

Na drogach wielu krajów poruszają się samochody zasilane gazem LPG lub CNG. Instalacje tych pojazdów często są dodatkiem niewystępującym oryginalnie w procesie produkcji, przez co są montowane w specjalistycznych warsztatach. Stwarza to pewien problem, ponieważ takie samochody nie posiadają wskaźników spalania paliwa LPG lub CNG, a oryginalnie występujące w nich wskaźniki spalania benzyny przekłamują pomiar i są często bezużyteczne, w przypadku pracy silnika pojazdu na paliwie gazowym. Wielu użytkowników bacznie kontroluje spalanie paliwa w swoich pojazdach. Ma to oczywiście na celu obserwację zużycia paliwa, celem poszukiwania oszczędności, gdyż pozwala planować i kontrolować wydatki związane z utrzymaniem samochodu. Właścicielom pojazdów często towarzyszy również ciekawość jak spalanie paliwa zmienia się w zależności od warunków i stylu jazdy.

Projektując miernik spalania warto stworzyć możliwość jego interakcji z użytkownikiem i zapewnić integrację z centralną instalacją. Nie bez znaczenia jest łatwy montaż, który można zapewnić minimalizując liczbę niezbędnych połączeń. Ważna jest również prosta procedura kalibracji, zapewniająca wygodne użytkowanie miernika. Większość wykorzystywanych instalacji LPG lub CNG to układy z wtryskiem pośrednim. Ostatnio pojawiają się również układy z wtryskiem bezpośrednim. W związku z powyższym istotną staje się możliwość współpracy miernika z dwoma rodzajami rozwiązań, co zdecydowanie zwiększa uniwersalność urządzenia [3, 5].

Celem artykułu jest kompleksowe przedstawienie uniwersalnego samochodowego miernika spalania LPG/CNG, zaprojektowanego i praktycznie sprawdzonego w ramach projektu inżynierskiego.

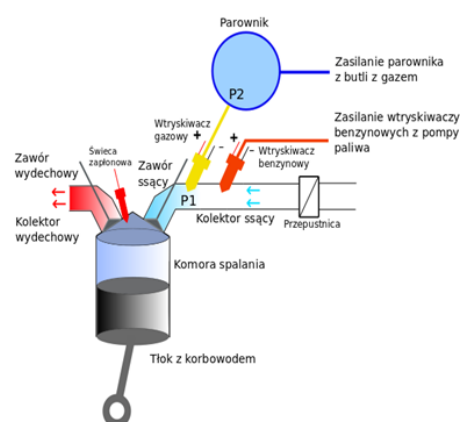
Podstawy teoretyczne, zasada działania

Większość wykorzystywanych instalacji LPG lub CNG to układy z wtryskiem pośrednim. Ostatnio pojawiają się również układy z wtryskiem bezpośrednim. W związku z tym uwagę skupiono na możliwości współpracy projektowanego urządzenia z dwoma rodzajami rozwiązań, co stało się możliwe ze względu na podobieństwo ich działania.

Na Rys. 1 zobrazowano model silnika jednociłokowego z wtryskiem pośrednim, zasilanego paliwem gazowym, w

którym można wyróżnić:

- parownik – regulator ciśnienia zasilania wtryskiwaczy gazowych, utrzymujący stałą różnicę ciśnień $\Delta p = |p_2 - p_1|$, pomiędzy króćcem wyjściowym parownika, a kolektorem ssącym,
- wtryskiwacz benzynowy – zapewnia zasilanie silnika benzyną, jest elementem oryginalnym silnika,
- wtryskiwacz gazowy – zapewnia zasilanie silnika gazem LPG lub CNG.



Rys. 1. Model instalacji LPG z wtryskiem pośrednim

Podczas zasilania pojazdu benzyną sterownik instalacji gazowej umożliwia sterowanie wtryskiwaczami benzynowymi oryginalnemu modułowi ECU (Electronic Control Unit - elektroniczny moduł sterujący dawką paliwa) silnika. Po przełączeniu na paliwo gazowe sterownik instalacji przejmuje kontrolę nad sterowaniem wtryskiwaczami benzynowymi i odłącza je, po czym łączy się na określony czas wtryskiwacze gazowe, zgodnie z ustawieniami sterownika instalacji, który posiada zapisaną w pamięci tablicę mnożnika. W ciągły sposób dokonywany jest odczyt czasów wtrysków z jednostki ECU, dzięki czemu może zostać wyliczona odpowiednia dawka paliwa gazowego lub mieszanka gazowo-benzynowa. Należy zauważyć, że niektóre sterowniki instalacji gazowych umożliwiają dawkowanie mieszanki gazowo-benzynowej, jednak stosowanie takiej mieszanki należy do rzadkich przypadków. Założono więc, że projektowany

miernik będzie działał jedynie w trybie pomiaru spalania zużycia paliwa gazowego, a nie w trybie mieszanym, w którym dawkowana jest mieszanka gazowo-benzynowa. Różnice instalacji z wtryskiem bezpośrednim w stosunku do instalacji z wtryskiem pośrednim są takie, że w instalacji z wtryskiem bezpośrednim nie ma drugiego kompletu wtryskiwaczy gazowych.

Do zasilania gazowego wykorzystuje się zwykle wtryskiwacze benzynowe, a moduł FSU (Fuel Selector Unit - rozdzielacz paliwa) umożliwia przełączanie rodzaju paliwa. Moduł FSU jest zasilany paliwem gazowym z pompy zamontowanej w butli z gazem oraz benzyną z pompy wysokiego ciśnienia. Należy podkreślić, że układy wtrysku bezpośredniego generują w trakcie jednego cyklu sprężania kilka impulsów wyzwalających podawanie dawki paliwa, co sprzyja tworzeniu się mieszanki ułożonej warstwowo. Taki sposób sterowania wtryskiwaczem powoduje pewien problem, ponieważ każdorazowe otwarcie wtryskiwacza wymaga przejścia przez pewien stan nieustalony, w którym nie da się dokładnie wyznaczyć przepływu wtryskiwacza. W przypadku silników z wtryskiem pośrednim efekt ten jest przyczyną większej niedokładności pomiaru, którą można częściowo eliminować w procesie kalibracji.

Pomiary zużycia paliwa przez pojazd zazwyczaj realizowane są w 2 wariantach, sprowadzających się do określania:

1. Spalania chwilowego wyznaczanego na podstawie aktualnej prędkości pojazdu.
2. Spalania średniego wyznaczanego z dłuższego dystansu.

Wartość spalania chwilowego można wyznaczyć zgodnie z zależnością (1).

$$(1) \quad \text{Spalanie}_{\text{chwilowe}} = \frac{\Phi_w * t_w * l_c}{v}$$

gdzie Φ_w oznacza przepływ wtryskiwacza, t_w – łączny czas otwarcia wtryskiwacza w czasie 1 sekundy, l_c – liczbę cylindrów silnika, a v – prędkość pojazdu.

Wzór (1) opisuje określony drogą dedukcji algorytm wyznaczania spalania chwilowego. Dla uproszczenia zakłada się, że przepływ wtryskiwacza Φ_w jest stały dla stałej różnicy ciśnień $\Delta p = |p_2 - p_1|$ między króćcem wyjściowym parownika a kolektorem ssącym. W praktyce wartość różnicy ciśnień Δp mieści się w pewnych granicach i podczas zmiany obciążenia silnika chwilowo się zmienia. W tej sytuacji w procesie określania zużycia paliwa konieczne jest korzystanie z wartości uśrednionych.

W przypadku wyznaczania wartości średniej zużycia paliwa zachodzi potrzeba określenia czasu, w którym będzie odbywać się uśrednianie. Większość producentów samochodu stosują algorytm pomiaru realizujący uśrednianie zużycia od momentu uruchomienia silnika, bądź od momentu wyzerowania poprzedniego pomiaru [3, 5]. W przedstawianym projekcie założono, że wynik będzie określał spalanie średnie z dystansu 1000 ostatnio przebytych kilometrów. Wartość spalania średniego jest wyznaczana zgodnie z zależnością (2).

$$(2) \quad \text{Spalanie}_{\text{średnie}} = \frac{\Phi_w * t_{wc} * l_c}{s}$$

gdzie Φ_w oznacza przepływ wtryskiwacza, t_{wc} – łączny czas otwarcia wtryskiwacza z dystansu 1000 kilometrów, l_c – liczbę cylindrów silnika, a s – założoną drogę, w której wykonywany jest pomiar, równą 1000 km.

Początkowo, podczas pierwszego uruchomienia miernika nie znana jest wartość droga oznaczonej we wzorze jako s , dlatego droga jest mierzona do czasu przebycia 1000km. Po przebyciu tego dystansu miernik

przechodzi w tryb pracy, w którym odejmuje średnią ilość spalonego paliwa z każdego kolejno przebytego odcinka drogi s_k i wyznacza dla niej wartość zużytego paliwa. Taki mechanizm obliczeń pozwala na określenie objętości paliwa zużytego na dystansie 1000km, wykorzystując w obliczeniach czas otwarcia wtryskiwacza (t_{wc}). Czas pracy wtryskiwacza (t_{wc}) można określić jako okres, w którym przepływa przez niego paliwo. Wartość ta jest wyznaczana zgodnie z zależnością (3),

$$(3) \quad t_{wc} = t_{wc} - t_s$$

w której t_s oznacza średni czas otwarcia wtryskiwacza przypadający na stały odcinek drogi s_k .

Część sprzętowa miernika

Po analizie różnych rozwiązań zdecydowano się na realizację miernika z wykorzystaniem 32-bitowego mikrokontrolera STM32 z rdzeniem ARM. Jego możliwości obliczeniowe wystarczają na dokonywanie szybkich obliczeń realizowanych w czasie rzeczywistym, czemu sprzyja wbudowany sprzętowy układ dzielnicy. W module zasilania rozważono zastosowanie przetwornicy DC/DC lub stabilizatora napięcia. Z punktu widzenia strat mocy rozsądniejszym wyborem staje się zastosowanie przetwornicy. Nie da się ukryć, że wprowadza ona zakłócenia, ale nie powinny one niekorzystnie wpływać na pracę mikrokontrolera. Koniecznym staje się niewątpliwie zastosowanie odpowiedniej konstrukcji obwodów drukowanych chroniących mikrokontroler, a dodatkowo czynnikiem korzystnym będzie zastosowanie stabilizatora napięcia. Ważnym elementem projektowanego układu jest też pamięć typu FRAM, potrzebna do przechowywania danych o pracy układu, gdy samochód jest wyłączony. Zaletą pamięci typu FRAM jest zwiększona liczba zapisów, kilkukrotnie większa niż liczba możliwych zapisów do pamięci typu EEPROM. Kolejnym zastosowanym elementem zwiększającym wygodę użytkownika jest wyświetlacz dotykowy, który zapewnia wygodną interakcję miernika z użytkownikiem. Zdecydowano się na wybór niewielkiego wyświetlacza, zapewniającego wygodne wkomponowanie urządzenia w deskę rozdzielczą samochodu. Zdecydowano się na wybór wyświetlacza dotykowego działającego jako panel HMI. Wybrano wyświetlacz firmy Nextoin, przeznaczony do współpracy z mikrokontrolerami poprzez interfejs USART. Przekątna wyświetlacza 2,4", zapewnia dobrą widoczność wyświetlanych danych. W układzie zasilania zdecydowano się na wykorzystanie przetwornicy typu Step-Down, obniżającej napięcie z napięcia 12V do 5V.

Oprogramowanie

Oprogramowanie mikrokontrolera STM32F042K6 stworzono przy użyciu środowiska programistycznego Atollic TrueSTUDIO. Dodatkowo skorzystano z aplikacji STM32CubeMX umożliwiającej konfigurację układów peryferyjnych mikrokontrolera przez interfejs graficzny, a następnie generację kodu konfiguracji. Wybrany mikrokontroler STM32F042K6 posiada pamięć typu Flash o pojemności 32KB oraz pamięć operacyjną typu SRAM o pojemności 6KB, co okazało się wystarczające, jednak stopień wykorzystania pamięci Flash sięgnął aż 97% [4]. Tworząc oprogramowanie mikrokontrolera STM32 wykorzystano szereg układów peryferyjnych, do których należą [2]:

- interfejs USART do komunikacji w panelu HMI,
- interfejs I2C do wymiany danych z pamięcią typu FRAM,
- kontroler DMA do obsługi komunikacji przez I2C w trybie automatycznym,

- przetwornik ADC do odczytu poziomu napięcia informującego o poziomie paliwa gazowego w butli,
- czasomierze:
 - TIM1 – do domierzania interwałów czasowych z czujnika prędkości pojazdu,
 - TIM2 – do odmierzenia czasu otwarcia wtryskiwacza LPG,
 - TIM3 – do odmierzenia innych potrzebnych w programie interwałów czasowych,
 - TIM17 – do odmierzenia interwałów przeladowywania danych do pamięci typu FRAM.

Program został napisany w języku C. Wykorzystano biblioteki HAL [1], które stanowią zbiór funkcji bibliotecznych realizujących pośrednio operacje na rejestrach mikrokontrolera STM32, zapewniających wygodne skonfigurowanie i użycie większości układów peryferyjnych. Nie obyło się bez stworzenia autorskich bibliotek, pozwalających na wykorzystanie specyficznych elementów miernika, takich jak:

- obsługa komunikacji z wyświetlaczem dotykowym HMI Nextion,
- interpretacja danych odczytywanych z wyświetlacza dotykowego Nextion,
- realizacja algorytmu obliczania spalania,
- buforowanie wysyłanych danych pamięci do typu FRAM.

Program oraz grafiki wyświetlacza dotykowego HMI Nextion zostały stworzone w programie Nextion Editor, w którym można definiować elementy wyświetlane na wyświetlaczu takie jak przyciski, pola tekstowe itd. oraz stworzyć prostą logikę dla wyświetlanych elementów w języku niskiego poziomu.



Rys. 2. Prototyp układu podczas montażu podzespołów elektronicznych

Konstrukcja urządzenia

Pierwszy prototyp miernika został skonstruowany wykorzystując nieco inne podejście niż wersja docelowa. Do pozyskiwania danych potrzebnych do poprawnego wyliczenia spalania średniego i chwilowego wykorzystano dane ze sterownika instalacji LPG. Komunikacja ze sterownikiem odbywała się przez interfejs USART. Początkowo należało odczytać ramki danych z komunikacji sterownika z dedykowanym programem diagnostycznym oraz drogą dedukcji określić, które za co odpowiadają. Ostatecznie zaniechano tego rozwiązania, ponieważ każdy model sterownika posiada inaczej skonstruowaną warstwę łącza danych, co znacznie utrudnia implementację wszystkich możliwych algorytmów komunikacyjnych, a co za tym idzie skontrolowanie urządzenia uniwersalnego. Główną zaletą odczytywania danych prosto z interfejsu

komunikacyjnego sterownika była możliwość prezentacji parametrów pracy instalacji, takich jak czasy wtrysków oraz ciśnień w układzie zasilania paliwem.

Rozwiązanie docelowe jest rozwiązaniem, w którym zużycie paliwa wyliczane jest zgodnie z zależnościami (1), (2), (3), przy czym czasy otwarcia wtryskiwaczy są mierzone w okresach 1 sekundowych, określanych bezpośrednio z wtryskiwacza. Wykonany prototyp przedstawiono na Rys. 2. Dogodnym miejscem montażu miernika jest popielniczka, która zwykle jest wielkości porównywalnej w wielkości zastosowanego wyświetlacza. Tego typu montaż zastosowano w samochodzie marki Honda Accord V (Rys. 3). Dobre dopasowanie do dostępnego miejsca zapewniło wykonanie obudowy metodą druku 3D. Wielkość zaprojektowanego miernika jest na tyle mała, że można wykonać uniwersalną obudowę, dającą się wkomponować w odpowiednie dostępne miejsce w większości pojazdów.



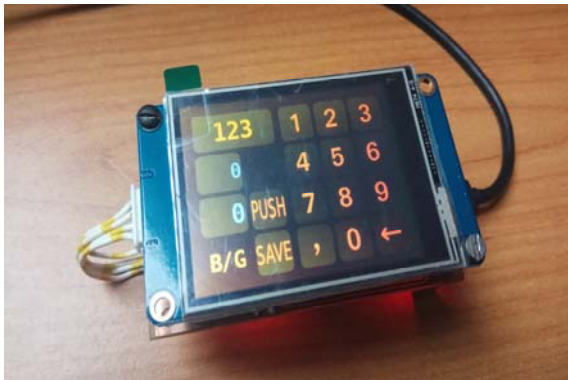
Rys. 3. Prototyp zamontowany w samochodzie

Kalibracja urządzenia

Pojazdy są wyposażone w różne silniki, w których wtryskiwacze różnią się wydajnością. Dodatkowo podczas montażu instalacji montażysta dobiera wtryskiwacze oraz ustawia ich ciśnienie pracy, co powoduje, że nie znana jest dokładna wydajność jaką mają zamontowane wtryskiwacze. W tej sytuacji konieczne staje się wyznaczenie wydajności podczas pracy silnika.

Projektując miernik zakładano, że ze względu na powyższe nieodzownym elementem uruchomienia miernika będzie jego kalibracja. W tym celu opracowano klawiaturę wraz interfejsem do kalibracji miernika (Rys. 4) oraz algorytm kalibracji, który składa się z następujących kroków:

1. Zatankowanie pojazdu paliwem gazowym do pełnego zbiornika
2. Uruchomienie procedury kalibracji - przytrzymanie jednego z dedykowanych przycisków z równoczesnym uruchomieniem zapłonu.
3. Kalibracja prędkości - utrzymując prędkość 40km/h należy nacisnąć na panelu miernika klawisz „PUSH”. Po naciśnięciu przycisku powinna wyświetlić się mierzona prędkość równa założonej tzn. 40km/h. Jeżeli wyświetlona prędkość nie jest właściwa, kalibrację prędkości należy powtórzyć doprowadzając do wskazania właściwej prędkości.
4. Użytkowanie samochodu do zużycia całego lub prawie całego paliwa w zbiorniku.
5. Tankowanie kończące kalibrację - po tankowaniu należy wpisać za pomocą klawiatury numerycznej ilość zatankowanego paliwa, po czym nacisnąć i przytrzymać przez 3 sekundy przycisk „SAVE” kończący kalibrację.



Rys. 4. Klawiaturę wraz interfejsem do kalibracji miernika

W czasie kalibracji układ mikroprocesorowy wyznacza sumaryczny czas otwarcia wtryskiwaczy, dzięki czemu możliwe staje się wyznaczenie ilości paliwa przypadającego na jednostkę czasu otwarcie wtryskiwacza i powiązanie jej z przebyty dystansem. Wzór (4) określa zależność przepływu wtryskiwacza od objętości zużytego paliwa, łącznego czasu otwarcia wtryskiwacza oraz liczby cylindrów silnika

$$(4) \quad \Phi_w = \frac{V_c}{t_{wck} * l_c}$$

gdzie Φ_w oznacza przepływ/wydajność wtryskiwacza, V_c – objętość zużytego paliwa podczas kalibracji, t_{wck} – łączny czas otwarcia wtryskiwacza z okresu pracy silnika podczas kalibracji, l_c – liczbę cylindrów silnika.

Należy w tym miejscu podkreślić, że paliwo gazowe w butli znajduje się w postaci ciekłej, jednak w instalacjach z wtryskiem pośrednim zostaje ono rozprężone do postaci lotnej. Przepływ wtryskiwacza Φ_w nie zawsze jest więc wartością mającą bezpośredni sens fizyczny. W tej sytuacji przepływ wtryskiwacza należy traktować jak pewien współczynnik, który uwzględnia zmianę postaci paliwa w postaci ciekłej do lotnej, która odbywa się w parowniku (Rys. 1). Tego typu podejście określające przepływ wtryskiwacza Φ_w w postaci współczynnika zapewnia uniwersalność miernika, upraszczając jego model matematyczny, który jest niezależny do rodzaju wtrysku (pośredniego lub bezpośredniego). Przyjęte rozwiązanie sprawia, że nie ma znaczenia w jakiej postaci podawane jest paliwo - lotnej, czy ciekłej, skoro model odnosi się do paliwa w butli, które jest w postaci ciekłej.

Kolejnym elementem, który wymaga kalibracji jest kalibracja przebytej drogi. Sposób wyznaczenia drogi s_k , która jest określana dla założonej prędkości i pomiaru czasu pomiędzy kolejnymi impulsami z czujnika umieszczonego w skrzyni biegów, opisuje wzór (5):

$$(5) \quad s_k = v_p * t_p$$

gdzie s_k oznacza odcinek drogi przebyty między dwoma impulsami z czujnika prędkości, v_p - prędkość samochodu (w procesie kalibracji założono prędkość 40km/h), a t_p - interwał czasu między dwoma impulsami z czujnika prędkości umieszczonego w skrzyni biegów. Proponowana metoda kalibracji stanowi istotę metody wyznaczania drogi na podstawie pomiaru czasu impulsów z czujnika prędkości zamontowanego z skrzyni biegów.

Nieodzownym składnikiem realizacji układu pomiarowego jest analiza jego dokładności. W obliczeniach założono, że zakres zmian temperatur paliwa w zbiorniku wynosi nie więcej niż $\Delta t=20^\circ\text{C}$, a błąd pomiaru prędkości podczas kalibracji, wynikający z błędu licznika, nie przekracza 5km/h. Dokładność pomiaru wyznaczona teoretycznie wyniosła 20%.

Obserwacje użytkowania miernika zużycia gazu w zainstalowanym samochodzie, uzyskane po wielu tankowaniach, wskazują na większą dokładność miernika, niż ta, która jest wynikiem analizy teoretycznej. Dokładność pomiaru obserwowana podczas testów wynosi około 5%. Oznacza to, że założone błędy temperatury i pomiaru prędkości są w praktyce znacznie mniejsze.

Podsumowanie

Zaprezentowany w artykule uniwersalny samochodowy miernik spalania LPG/CNG został zrealizowany i w postaci rozwiązania prototypowego i jest obecnie ciągle użytkowany w samochodzie Honda Accord. Spełnia poprawnie wszystkie założone funkcje, stając się bardzo przydatnym urządzeniem pozwalającym na obserwację zużycia paliwa. Obecna wersja miernika jest wynikiem wielu udoskonaleń i doświadczeń zdobytych w latach poprzednich. Pierwotne rozwiązania były prezentowane i doceniane na kilku konkursach. Pierwsza wersja miernika została wyróżniona nagrodą pierwszego miejsca na Ogólnopolskim Konkursie „Elektronika – by żyło się łatwiej”. Kolejna została wyróżniona w Konkursie Konstrukcji Studenckich w kategorii „Joker”. Obecnie planowane są kolejne prace, których celem będzie wyposażenie miernika w dodatkową funkcję pozwalającą na pomiar zużytej benzyny, potrzebnej na rozruch pojazdu i rozgrzanie silnika. Tego typu rozwiązanie dawałoby użytkownikowi możliwość kontroli zużycia obu paliw i pełny wgląd w parametry eksploatacyjne samochodu.

Podsumowując należy podkreślić, że już w obecnej formie opracowany i zrealizowany miernik może być bardzo interesującym urządzeniem dla szerokiego grona pasjonatów motoryzacji, szczególnie tych „jeżdżących na gazie”.

Praca częściowo finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Autorzy: inż. Aleksander Ostrowski, e-mail: alekost727@student.polsl.pl; prof. dr hab. inż. Dariusz Kania, Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, e-mail: dkania@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Galewski M., STM32. Aplikacje i ćwiczenia w języku C z biblioteką HAL, Wydawnictwo BTC, 2019.
- [2] Kalus P., Elektronika i techniki mikroprocesorowe - programowanie mikrokontrolerów STM32F0, Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Raciborzu, 2016.
- [3] Latała D., Mądziel M., Metody ustalania normatywnego zużycia paliwa pojazdów samochodowych eksploatowanych w przedsiębiorstwach, Autobusy, 6, (2017), 854-858.
- [4] Ostrowski A., Miernik spalania LPG, Elektronika Praktyczne, 8, (2018), 72-74.
- [5] Rychlik A., Metody pomiaru zużycia paliwa pojazdów użytkowych, Eksploatacja i niezawodność, 4, (2006), 37-41.