

METODY POMIARU ZUŻYCIA PALIWA POJAZDÓW UŻYTKOWYCH

COMMERCIAL VEHICLES FUEL CONSUMPTION MEASUREMENT METHODS

Racjonalna eksploatacja silników spalinowych jest źródłem oszczędności surowców, energii i nakładów kapitałowych, podstawową strategią uzyskania zysku. W pracy zaprezentowano wybrane metody pomiaru zużycia paliwa przez tłokowe silniki spalinowe pojazdów użytkowych, dokonano ich prezentacji oraz określono możliwości zastosowania do monitoringu zużycia paliwa.

Słowa kluczowe: pomiar zużycia paliwa, bilans węglowy, krzywe Willansa

Rational operation of combustion engines is the source of savings on raw materials, energy and capital outlays, the basic strategy of generating profit. The paper presents selected methods for fuel consumption measurement in piston combustion engines of utility vehicles. Such methods have been discussed and their potential use for fuel consumption monitoring has been determined.

Keywords: fuel consumption measurement, carbon balance, Willans curves

1. Wprowadzenie

Pomiar zużycia paliwa jest jednym z ważniejszych czynników umożliwiających racjonalną eksploatację floty drogowej. Nadmierne zużycie paliwa wpływa negatywnie zarówno na szeroko rozumianą ekonomię transportu jak także na środowisko naturalne. Te nadmierne zużycie paliwa przez silnik w porównaniu z wartościami nominalnymi, może być ponadto informacją diagnostyczną, mogącą pomóc w określeniu aktualnego stanu technicznego silnika lub jego układów. Wczesne zidentyfikowanie takiego stanu, może uchronić silnik przed uszkodzeniem, ale przede wszystkim umożliwia planową realizację procesu transportowego. Inną istotną przesłankę określającą konieczność kontroli zużycia paliwa należy upatrywać w aspekcie ochrony środowiska. Ograniczenie emisji szkodliwych związków powstałych w wyniku funkcjonowania silnika, jest możliwe poprzez ciągły rozwój konstrukcji silników jak także poprzez stosowanie zasady im mniejsze zużycie paliwa przez silnik tym – mniejsze zanieczyszczenie środowiska naturalnego przy zachowaniu reżymu „czystości spalin”. Ta zasada przyświeca przyszłościowym normom europejskim, które jednocześnie ograniczają wartości emisji związków szkodliwych do atmosfery, a także określają zużycie paliwa przez silnik na przejechany kilometr lub wykonaną pracę [1].

2. Metody pomiarów zużycia paliwa

W literaturze problemu odnajduje się szereg metod pomiaru zużycia paliwa. Możliwość ich zastosowania uzależniona jest od wielu czynników m.in.: żądanej dokładności pomiaru, możliwości zastosowania do konkretnych układów zasilania, możliwości ingerencji w układ zasilania czy choćby kosztu takiego układu pomiarowego. Ogólnie metody pomiaru zużycia paliwa możemy podzielić na dwie grupy: laboratoryjne i trakcyjne (drogowe).

Główną grupę metod pomiaru zużycia paliwa stanowią metody laboratoryjne, są to metody które stosuje się w laboratoriach (badania hamowniane) lub podczas np. badań homologacyjnych pojazdów. Metody te charakteryzują się dużą dokładnością pomiaru (ok. $\pm 0,5\%$), lecz mogą być ze względów konstrukcyjno – metodycznych stosowane w ograniczonym zakresie. Zakres stosowania tego typu aparatury to laboratoria, tory pomiarowe, lub odpowiednio do tego przystosowane pojazdy. Wadą tych

1. Introduction

Fuel consumption measurement is one of the factors allowing rational operation of a fleet of vehicles. Excessive fuel consumption has a negative influence on widely understood economy of transport as well as the natural environment. The excessive fuel consumption as compared with nominal values can also provide diagnostic information that can be helpful in determining the actual technical status of the engine or its systems. Early identification of that status can protect the engine against damage, but first of all, it allows planned performance of the transport process. The environment protection aspect is another important premise necessitating fuel consumption control. Limitation of emissions of harmful substances produced during engine operation is possible through continuous development of engine designs and by applying the principle that the lower the fuel consumption the lower the natural environment pollution when the regime of “clean exhaust” is observed. That principle is the bases for the future European standards that simultaneously limit the values of emissions of harmful substances to atmosphere and define the engine fuel consumption per kilometer or work performed [1].

2. Fuel consumption measurement methods

The subject literature presents numerous fuel consumption measurement methods. The potential for applying them depends on many factors such as the required measurement precision, possibility of application for specific supply systems, possibility of integration in the supply systems or costs of the measurement system. Generally, fuel consumption measurement methods can be divided into two groups: laboratory methods and traction (road) methods.

The laboratory methods that are applied in laboratory tests (engine test beds) or during homologation of vehicles are the main group of fuel consumption measurement methods. Those methods are characterized by high precision (ca. $\pm 0.5\%$), but for design and methodology considerations they can be applied to a limited extent. That type of devices can be applied in laboratories, on test tracks or in appropriately adapted vehicles. The

metod jest brak możliwości zastosowania do typowych pojazdów roboczych (tzn. permanentny pomiar zużycia paliwa w toku eksploatacji) poprzez: duży koszt aparatury pomiarowej, konieczność okresowej kalibracji, trudne warunki eksploatacji którym nie jest w stanie sprostać precyzyjna aparatura laboratoryjna, konieczność ingerencji w układ zasilania, itd..

Metody trakcyjne (drogowe) są to metody które umożliwiają monitorowane zużycia paliwa przez silnik, w każdych warunkach jego eksploatacji poprzez urządzenia lub procedury zaimplementowane na eksploatowanym obiekcie. Metody te są stosowane od połowy lat siedemdziesiątych lecz do dnia dzisiejszego traktuje się je jako pomiar orientacyjny, o dużym błędzie pomiarowym. Uzyskiwana tu dokładność pomiaru, jest wypadkową kosztów poniesionych na wyprodukowanie przepływomierza, trwałości oraz zastosowanych metod określania zużycia paliwa (np.: linie Willansa, charakterystyka wtryskiwacza itp.).

Metod objętościowa - „pełnego zbiornika”

W metodzie tej zużycia paliwa określa się na podstawie zużytej objętości lub masy paliwa. W obu przypadkach odnosi się ja do przejechanej drogi lub wykonanej pracy.

Metoda ta jest stosunkowo dokładna jednakże zastosowanie jej do pojazdów w warunkach rzeczywistych jest dość kłopotliwe. Powodem jest konieczność zaangażowania dodatkowych pracowników w celu kontroli i uzupełniania paliwa, lub konieczność wyposażenia pojazdu w specjalny zbiornik paliwa z możliwością pomiaru masy paliwa znajdującego się w zbiorniku przed pomiarem i po nim. Stosowanie tej metody odnajduje się w przedsiębiorstwach w których pojazdy funkcjonują w trybie „wahadłowym” (np. zakłady komunikacji miejskiej) lub dla silników stacjonarnych (np. silniki generatorów prądowców). Metoda ta jest powszechnie stosowana przez koncerny samochodowe w celu określenia norm zużycia paliwa podczas badań trakcyjnych pojazdu czy pomiarów oporów toczenia np. opon itp., jednakże tylko dla wcześniej przygotowanych pojazdów oraz określonej drodze, najczęściej torze pomiarowym.

Poszukiwanie niezawodnych i dokładnych układów pomiarowych w ostatnim czasie zaowocowało nową metodą kontroli objętościowego zużycia paliwa - pomiar „lustra” paliwa w zbiorniku. Przykładem tego rozwiązania może być System Kontroli Transportu SKT, opracowany przez firmę SOFIBA [6]. Prezentowany system jest bardzo precyzyjny ($\pm 1\%$ pojemności baku dla pojedynczego tankowania – dane producenta). Ogólnie system ten opiera się na ciągłym monitorowaniu poziomu paliwa w zbiorniku za pomocą sondy pomiarowej umieszczonej w zbiorniku paliwa.

Wadą tego systemu jest konieczność ingerencji w konstrukcję zbiornika paliwa w celu montażu sondy paliwowej. Metoda ta może być stosowana dla wszystkich typów układów zasilania jak także rodzaju silników (ZI, ZS) w połączeniu z bezprzewodowym systemem pozycjonowania pojazdu GPS i przesyłem danych staje się coraz częściej stosowanym systemem kontroli zużycia paliwa przez flotę drogową.

Bilans węglowy

Metoda bilansu węglowego jest stosowana do określania zużycia paliwa w oparciu o ilość węgla znajdującego się w zebranych gazach wydechowych. Nawet przy złożonych przekształceniach chemicznych, zachodzących w silnikach o spalaniu wewnętrznym, zależność między zużycie paliwa a emisją węgla może być

negative aspect of those methods is the impossibility of using them in standard utility vehicles (i.e. permanent fuel consumption measurement during operation) as a consequence of high costs of measurement devices, need for periodic calibration, difficult operation conditions the precise laboratory equipment is unable to sustain, the necessity of integration with supply system and other.

Traction (road) methods allow fuel consumption monitoring in any conditions of operation using a device or procedures implemented in the operated vehicle. Those methods have been in use since mid-1970s but up to date they are treated as indicative measurements with high measurement error. The measurement precision is the consequence of costs incurred in production of the flow meter, its durability and the methods used for determining the fuel consumption (e.g. Willans curves, injector characteristics, etc.).

Voluminous method of “full tank”

According to this method, fuel consumption is determined on the basis of fuel volume or mass consumed. In both cases it is linked to the distance covered or work done.

That method is relatively accurate but applying it in vehicles under conditions of actual operation is rather cumbersome. The reason is the need to involve additional employees to control and refill the fuel or the necessity of equipping the vehicle with a special fuel tank with the possibility of measuring the mass of fuel in the tank before and after the measurement. That method is used in companies where vehicles operate according to the shuttle regimes (e.g. municipal transport companies) or for stationary engines (e.g. engines of power generators). The method is commonly used by automotive companies for determination of fuel consumption standards during road tests of vehicles or measurements of driving resistance of tyres, etc., however, only for earlier prepared vehicles and on the defined road, most frequently the test track.

The search for reliable and precise measurement systems has recently resulted in a new method for voluminous fuel consumption control – the measurement of fuel level in the tank. The Transport Control System SKT developed by SOFIBA [6] is an example of such a solution. The presented system is highly accurate ($\pm 1\%$ tank capacity for single refueling – manufacturer’s data). Generally the system is based on continuous monitoring of fuel level in the tank using the measurement probe positioned in the fuel tank.

The negative aspect of the system is the necessity of intervention in the fuel tank design to install the fuel probe. That method can be used for all types of supply systems and all types of engines (spark, compression) in combination with the wireless vehicle location system GPS and data transmission it becomes more and more frequently used as fuel consumption control system for fleets of vehicles.

Carbon balance

The carbon balance method is used for determination of fuel consumption on the basis of the content of carbon in collected exhaust gas. Even in case of complex chemical transformations occurring in the internal combustion engine the relation between fuel consumption and carbon emissions can be determined in a re-

stwierdzona w stosunkowo prosty sposób. Stosowane są aktualnie cztery główne rodzaje paliwa składające się prawie wyłącznie z węglowodorów nasyconych (węglowodory nasycone są zbudowane tylko z węgla (C) i wodoru (H) w znanych proporcjach). Gdy zachodzi proces spalania, cały węgiel z paliwa jest wydany w gazach wydechowych, które składają się z tlenu pochodzącego z powietrza w postaci dwutlenku węgla (CO₂), tlenku węgla (CO) lub z niespalonych węglowodorów (HC, nazywane również VOC – Volatile Organic Compounds – lotne związki organiczne).

Możemy założyć, że silnik wydała tyle węgla, ile go zużywa w postaci paliwa. Stąd ilość zużywanego paliwa można określić w oparciu o ilość węgla zebranego w gazach spalinowych (wydechowych). Wzory do obliczeń zużycia paliwa można odnaleźć [2].

Chociaż dokładna ilość CO₂ produkowana przez jeden litr paliwa zależy od wielu czynników takich jak temperatura, ciśnienie atmosferyczne i jakość paliwa, poniższe wartości mogą być uważane za typowe:

- 1 litr benzyny wytwarza 2,35 kg (CO₂), tj. 0,64 kg węgla (C);
- 1 litr oleju napędowego wytwarza 2,66 kg (CO₂), tj. 0,72 kg węgla (C).

Stosunek CO₂/C wynosi 3,67 i jest stosunkiem masy cząsteczkowej CO₂ (12 + (2 x 16) = 44) i masy atomowej węgla (C) (która wynosi 12).

Prezentowana metoda ma zastosowanie do badań laboratoryjnych określających zużycie paliwa przez silniki spalinowe zarówno nisko-, jak i wysokoprężne. Zastosowanie jej do badań drogowych na dzień dzisiejszy jest bardzo trudne a zaadoptowanie do permanentnego pomiaru zużycia paliwa – praktycznie niemożliwe, ze względu na zasadę działania (gromadzenie gazów spalinowych).

Przepływomierze pomiarowe

Do pomiarów zużycia paliwa wykorzystywane są także przepływomierze, które określają zużycie paliwa w czasie rzeczywistym w toku eksploatacji. Stosowanie tej metody jest bardziej skomplikowane w porównaniu z metodą objętościową („pod korek”) ze względu na konieczność oprzyrządowania pojazdu i kalibrację przepływomierzy pomiarowych, chcąc uzyskiwać dużą dokładność pomiaru.

W zależności od konstrukcji można wyróżnić dwa główne typy mechanizmów pomiarowych odpowiedzialnych za określenie wielkości przepływu. Są to układy oparte na zasadzie pompki z wirującym tłokiem np. moduł pomiarowy CONTOIL VZO4-8 firmy Magnum [5], lub układ tłoczkowy oparty na koncepcji czterech tłoczków np. Flowtronic firmy QUICKLI AG [4].

Urządzenie VZO4-8 przeznaczone jest do dokonywania pomiarów metodą różnicową, tzn. występują w układzie dwa mierniki jeden na linii ssawnej układu zasilania a drugi na linii przelewowej. Wielkość konsumpcji paliwa przez silnik jest różnicą wskazań obu przepływomierzy.

Coraz częściej stosuje się paliwomierze wyposażone w wewnętrzny zbiornik paliwa. W zbiorniku tym gromadzone i chłodzone jest paliwo które ponownie wprowadza się do linii ssania układu zasilania. W ten sposób producenci eliminują drugi paliwomierz obniżając koszt i konstrukcję instalacji pomiaru paliwa, jednocześnie podnosząc ich dokładność pomiarową [3, 4].

Średnia dokładność pomiarowa przepływomierzy dostępnych na rynku waha się w granicach ±1% zarejestrowanego przepływu

relatywnie prosty sposób. Obecnie cztery główne typy paliwa składające się prawie wyłącznie z węglowodorów nasyconych (węglowodory nasycone są zbudowane tylko z węgla (C) i wodoru (H) w znanych proporcjach). In case of combustion process the entire carbon is exhausted in exhaust gas that consists of oxygen from the air and carbon in the form of carbon dioxide (CO₂), carbon oxide (CO) or incombustible hydrocarbons (HC, also called the VOC – Volatile Organic Compounds).

It can be assumed that the engine exhausts as much carbon as it consumes in the form of fuel. As a consequence the quantity of fuel consumed can be determined based on the quantity of carbon in exhaust gas. Formulas for fuel consumption calculation can be found in [2].

Although the exact quantity of CO₂ produced from one liter of fuel depends on numerous factors such as temperature, atmospheric pressure and fuel quality, the following values can be considered standard:

- 1 liter of petrol produces 2.35 kg (CO₂), i.e. 0.64 kg carbon (C);
- 1 liter of diesel oil produces 2.66 kg (CO₂), i.e. 0.72 kg carbon (C).

The ratio CO₂/C is 3.67 as a ratio of molecular weight of CO₂ (12 + (2 x 16) = 44) and the atom weight of carbon (C) (which is 12).

The presented method is applicable in laboratory tests determining fuel consumption by both low and high-pressure combustion engines. Applying it in road tests as for today is very difficult and adapting it for permanent fuel consumption measurement is practically impossible as a consequence of its basic concept (collection of exhaust gas).

Flow meters for measurement

Flow meters are also used for fuel consumption measurement as they determine fuel consumption in real time during operation. Application of that method is more complicated than the voluminous method (“top up”), as it requires equipping the vehicle with and calibration of the flow meters if we want to obtain high measurement accuracy.

Depending on design, two major types of measurement mechanisms responsible for determining the flow volume can be identified. Those are systems based on a rotating piston pump, e.g. measurement module CONTOIL VZO4-8 by Magnum [5], or a system of pistons based on a four pistons setup, e.g. Flowtronic by QUICKLI AG [4].

VZO4-8 device is based on measurements using the differential method, i.e. there are two measuring devices in the system – one on the suction line and one on the overflow line. Fuel consumption is the difference between the indications of those two flow meters.

Increasingly frequently fuel meters equipped with in internal fuel tank are used. That tank collects and cools fuel that is introduced again into the suction line of the fuel supply system. In this way the manufacturers eliminate the second meter decreasing the costs and simplifying the fuel measurement system design at the same time increasing the measurement precision [3, 4].

The average measurement precision of flow meters available in the market is within ±1% of the registered flow (manufacturers’ data). However, in case of differential measurement system

(dane producentów). Jednakże uwzględniając różnicowy układ pomiarowy dokładność ta wynosić nawet $\pm 19\%$! [3]. Właśnie ze względu na tak małą dokładność oraz dość ograniczona trwałość tych paliwomierzy stosowane są one tylko okresowo, w celu określenia normatywów lub średniego zużycia paliwa przez pojazdy, nie znajdując szerszego zastosowania we flocie drogowej jako monitory ciągłe zużycia paliwa.

Linie Willansa

Kolejną spotykaną metodą określania zużycia paliwa przez silnik jest identyfikacja zużycia na podstawie „mapy silnika”. Mapę dla konkretnego silnika uzyskuje się na stanowisku hamownianym. W mapie tej każda krzywa łączy punkty pracy silnika o takiej samej sprawności. Jest to swoista mapa trójwymiarowa sprawności silnika, lecz nie dająca bezpośredniej informacji o ilości zużycia paliwa w każdej chwili czasu przez pojazd.

Na podstawie takiej mapy, można zbudować inny mniej złożony model, znany jako linie Willansa, który dla danego silnika daje prostą zależność pomiędzy mocą pobraną (w postaci zużytego paliwa) a mocą użyteczną (uzyskaną na stanowisku hamownianym). Metoda linii Willansa jest słuszna tylko dla normalnego zakresu pracy silnika co przedstawiono na rys. 1a za pomocą linii ciągłych. Linie kreskowane odpowiadają szybkiemu spadkowi sprawności w przypadku szybkiego wzrostu mocy użytecznej (kierowca naciska na pedał gazu, podczas gdy obroty silnika nie są odpowiednie do prędkości jazdy – odpowiada to gwałtownemu zużyciu paliwa, przy braku zauważalnego przyspieszenia przez pojazd).

W celu uzyskania zużycia paliwa na odcinku 100 km, należy powiązać ze sobą obroty silnika i przełożenie całkowite układu napędowego. Po uwzględnieniu charakterystycznego przełożenia danego pojazdu na poszczególnych biegach linie Willansa wyglądają jak na rysunku 1b.

Należy podkreślić iż metoda linii Willansa jest słuszna jedynie dla normalnego zakresu pracy silnika. W najbardziej złożonym, lecz jednocześnie najbardziej realistycznym przy-

that accuracy can reach even $\pm 19\%$! [3]. Because of that low accuracy and limited life of those flow meters, they are applied only periodically to determine the standard or average fuel consumption in vehicles and they find no wider application in fleets for continuous fuel consumption monitoring.

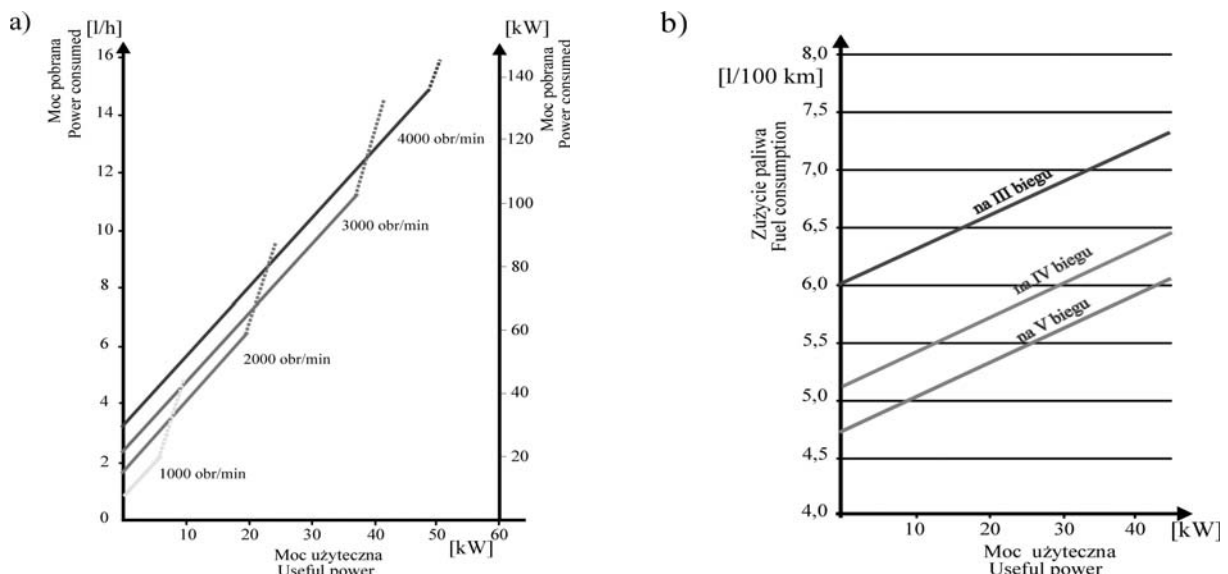
Willans lines

Identification of fuel consumption on the basis of the “engine map” is another method for determination of fuel consumption by the engine. The map for a specific engine is obtained on the engine test bed. In that map each curve connects engine work points with the same efficiency. That is a specific 3D map of engine efficiency, which, however, does not provide direct information on fuel consumption at each moment.

On the basis of that map another, less complex model can be constructed known as Willans lines which, for a given engine, defines a simple relation between power consumed (in the form of fuel consumed) and the useful power (obtained at the test bed). Willans lines are correct only for the ordinary operational range of the engine, which I presented in fig. 1a as continuous lines. Dotted lines correspond to quick loss of efficiency in case of fast increase of useful power (driver presses the accelerator when the engine revolutions are inappropriate for driving speed – that corresponds to rapid fuel consumption with no noticeable acceleration of the vehicle).

To obtain fuel consumption on a distance of 100 km, the engine revolutions and total gearing of the drive system should be linked. After considering the characteristic gearing of the vehicle in each gear the Willans lines look as in fig. 1b.

It should be highlighted that Willans lines are correct only for the normal operation range of the engine. In the most complex but at the same time most realistic case where the vehicle moves at variable speed, calculation of fuel consumption requires knowledge on the momentary engine efficiency and useful power at each moment. The obstacle that limits common application of that



Rys. 1. Linie Willansa (a) dla hipotetycznego silnika oraz linie Willansa (b) po uwzględnieniu przełożeni całkowitego na poszczególnych biegach
 Fig. 1. Willans lines (a) for a hypothetical engine and (b) after considering the total gearing in individual gears

padku, gdzie pojazd porusza się ze zmienną prędkością, aby obliczyć zużycie paliwa musimy znać chwilową sprawność silnika i moc użyteczną w każdym momencie. Wadą która ogranicza powszechne zastosowanie tego typu metody do określania zużycia paliwa jest brak uwzględnienia degradacji stanu technicznego silnika w toku jego eksploatacji jak także mała dokładność pomiarowa.

3. Podsumowanie

Aspekt kontroli zużycia paliwa należy rozpatrywać na kilku płaszczyznach: konsumpcji paliwa przez silnik, ochrony środowiska naturalnego jak także kontroli stanu technicznego silnika która jest bezpośrednio powiązana z wcześniej wymienionymi przesłankami.

Ekonomiczno-ekologiczne podejście do zużycia paliwa wymaga konieczność opracowania nowoczesnego monitora zużycia paliwa. Monitor ten winien być odporny na trudne warunki eksploatacji silników użytkowych przy jednoczesnym braku ingerencji w układ zasilania czy sterowania silnika oraz winien posiadać względnie dużą dokładność pomiarową. Istnieje zatem potrzeba szukania nowych metod pomiaru zużycia paliwa które wykorzystywałyby informacje pozyskane np. z urządzenia sterującego w postaci procesów resztkowych, jednocześnie

method for determination of fuel consumption is that it does not take into account the degradation of engine technical condition during operation as well as its low measurement precision.

3. Conclusion

The issue of fuel consumption control should be viewed in a number of aspects such as fuel consumption by the engine, natural environment protection and control of technical status of the engine directly related to the earlier mentioned aspects.

Economic-ecologic approach to fuel consumption requires developing a modern fuel consumption monitor. That monitor should be resistant to difficult operational conditions of utility engines and avoid intervention in the supply or engine control systems while offering a relatively high precision of measurement. As a consequence, there is the need to search for new fuel consumption measurement methods using, e.g. information from the control devices in the residue process format combining the above specified features with relatively low device purchase and installation costs.

4. References

- [1] Chłopek Z.: *Tendencje rozwojowe w napędach autobusów miejskich*. Eksploatacja i Niezawodność, Nr 1(29)/2006.
- [2] Dyrektywa 1999/1000/EC.
- [3] Podstawický I, Liščák Š, Droždziel P.: *Nowoczesna metoda pomiaru zużycia paliwa w transporcie samochodowym*. Eksploatacja i Niezawodność, Nr 1(25)/2005.
- [4] www.flowtronic.de - strona internetowa producenta.
- [5] www.magnum.pl - strona internetowa producenta.
- [6] www.sofiba.pl - strona internetowa producenta.

Dr inż. Arkadiusz RYCHLIK

Katedra Budowy Eksploatacji Pojazdów i Maszyn
Wydział Nauk Technicznych
Uniwersytet Warmińsko – Mazurski
ul. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn
e-mail: rychter@uwm.edu.pl
