

ZEPWN Jerzy Czerwiński i wspólnicy – Spółka Jawna

Wybrane zagadnienia związane z cechami metrologicznymi systemu kontroli zużycia paliwa

Rozwój techniki i wzrost cen paliwa spowodowały rozpowszechnienie montowanych w pojazdach urządzeń i systemów do kontroli zużycia paliwa. W kraju jest wiele firm produkujących takie urządzenia – wielu przewoźników, zajmujących się transportem samochodowym i kolejowym, ma je zainstalowane w swoich pojazdach.

Pomysł odniesienia się do zagadnień metrologicznych, występujących w tego rodzaju urządzeniach, narodził się w wyniku doświadczeń, firmy związanych z opracowaniem, produkcją oraz serwisem takich systemów oraz wiedzy uzyskanej podczas wieloletniej produkcji przetworników i systemów pomiarowych wielkości nielektrycznych, w tym wzorców siły, stosowanych przez laboratoria Okręgowych Urzędów Miar. Z problematyką rozliczania zużycia paliwa przez lokomotywy spalinowe związani jesteśmy od 1990 r. w którym rozpoczęliśmy produkcję liczników energii prądu stałego i czasu pracy silnika spalinowego. Urządzenia te umożliwiły indywidualne rozliczanie zużycia paliwa metodą opracowaną przez Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa [7]. W wielu zakładach są one nadal eksploatowane. Właściwości metrologiczne licznika, uzyskiwane w warunkach pracy występujących w pojazdach trakcyjnych, były przedmiotem badań laboratoriów CNTK. Deklarowana dokładność pomiarów potwierdzona została świadectwem kwalifikacyjnym CNTK.

Wiedzę z zakresu konstrukcji i problemów eksploatacyjnych układów napędowych lokomotyw spalinowych nasi specjaliści uzyskali w trakcie projektowania, realizacji i serwisowania systemów pomiarowych, służących do ich diagnostyki.

Wprowadzenie

Kontrola zużycia paliwa w pojazdach napędzanych silnikami spalinowymi odnosi się do określonego przedziału czasu pracy pojazdu i wymaga zmierzenia ilości pobranego w tym czasie paliwa ze zbiornika pojazdu oraz ustalenia, czy ma ono uzasadnienie w pracy urządzeń pojazdu. Kontrola ta powinna się więc opierać o pomiar jeszcze innych wielkości fizycznych, umożliwiających na dokładne ustalenie ilości paliwa zużytego przez urządzenia lokomotywy. Uwzględniając prawną i moralną odpowiedzialność producenta systemu kontroli zużycia paliwa za skutki działania systemu, a także jego użytkownika, niezwykle ważna dla obu partnerów jest ocena i weryfikacja jego działania. Instalacja systemu powinna umożliwiać wykrywanie nadużyć w gospodarce paliwem, zatem na podstawie wyników działania systemu – traktowanych jako dowód – podejmowane będą działania dyscyplinarne, a sprawy sporne mogą być przedmiotem rozpraw sądowych. Zgodnie z Kodeksem Cywilnym „ciężar udowodnienia faktu spoczywa na

osobie, która z faktu tego wywodzi skutki prawne”, co oznacza, że to użytkownik systemu musi udowodnić nie budzące wątpliwości działanie systemu (cechy jego konstrukcji i eksploatacji) stanowiące bezsporny dowód. Trudność przeprowadzenia takiego dowodu oraz znajomość „słabych stron” oferowanych systemów służących do rozliczania zużycia paliwa sprawiają, że niektórzy producenci przestrzegają użytkowników przed przytaczaniem wyników uzyskiwanych z tych urządzeń jako dowodów w sprawach dyscyplinarnych. Warto zwrócić uwagę, że w takich przypadkach ocenie ekspertów pod względem formalnym i technicznym podlega również system eksploatacji urządzenia.

Trudność dowodu wiąże się z uwarunkowaniami wynikającymi z konstrukcji pojazdu i związanymi z nią właściwościami urządzeń zasilanych paliwem, a także cechami systemu, wykorzystywanego do kontroli rozchodu paliwa. Cechy te wpływają na rozchód paliwa i dokładność pomiarów, muszą więc mieć odzwierciedlenie w zastosowanej metodzie i kryteriach wykrywania nadużyć, a także w konstrukcji i właściwościach metrologicznych systemu pomiarowego.

Nie wnikając w szczegóły można stwierdzić, że zużycie paliwa przez silnik spalinowy układu napędowego lokomotywy, poza oczywistym związkiem z wytwarzanym przez niego momentem napędowym, zależy od stałych lub przejściowych innych czynników, jak na przykład:

- warunki środowiskowe,
- temperatura układów silnika i maszyn elektrycznych,
- docieranie i zużywanie się części silnika,
- usterki i uszkodzenia części zespołów oraz układów silnika.

Podczas pracy silnika występują jego stany przejściowe wywołane nie tylko sterowaniem, ale również zmianami obciążenia układu napędowego, wytworzonymi warunkami trakcyjnymi, bocznikowaniem napędowych silników elektrycznych, rozruchem i pracą urządzeń pomocniczych. Wiązą się z tym chwilowe, nadmierne ilości pobieranego paliwa – praktycznie odpowiadające często źle ustawionym ogranicznikom dawki paliwa [6].

Podobną listę wpływu na dokładność kontroli rozchodu paliwa można stworzyć również w odniesieniu do zastosowanego systemu i jego układów. Jako przykłady można wyliczyć [10]:

- dokładność pomiaru poszczególnych wielkości, związaną z konstrukcją i dokładnością przetworników pomiarowych i ich stanem technicznym oraz wpływami wynikającymi z warunków pracy;
- odporność na przypadkowe lub świadome uszkodzenie zespołów i obwodów systemu;
- podatność systemu przechowywania wyników pomiarów i ich transmisji na przypadkowe lub świadome fałszowanie.

Rozważania dotyczące dokładności pomiarów

Skupimy się na uwarunkowaniach związanych z dokładnością pomiarów, a w szczególności pomiarach rozchodu paliwa.

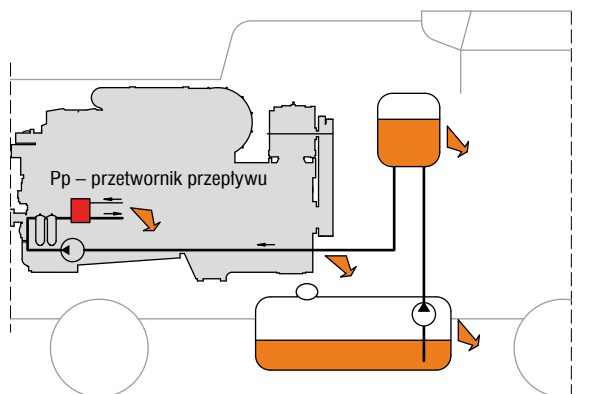
Już na wstępie należy zaznaczyć że producent urządzenia powinien zadeklarować dokładność pomiaru poszczególnych wielkości, tak aby możliwa była ocena, jak duży ubytek paliwa mieści się w błędzie pomiaru i nie może być podstawą postępowania dyscyplinarnego – nie wymaga uzasadniania, że w ocenie ekspertów brak takiej deklaracji dyskwalifikuje wyniki pomiarów.

Podana dokładność pomiarów powinna odnosić się do całego toru pomiaru i przetwarzania poszczególnych wielkości, lub umożliwiać ich obliczenie. Jeszcze lepiej gdy określona jest niepewność pomiaru. Poszczególne wielkości muszą być mierzone w legalnych jednostkach miary.

Pomimo, że mierzone wielkości najczęściej nie występują w rozporządzeniu „w sprawie rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych”, to musi być potwierdzenie metrologiczne deklarowanej dokładności pomiarowej. Zgodnie z zasadami metrologii potwierdzenie musi być uzyskane w wyniku fizycznego sprawdzenia i mieć odzwierciedlenie w protokole sprawdzenia. W dokumentacji urządzenia musi być podany przewidywany termin ponownego sprawdzenia dokładności pomiarów, natomiast użytkownik, tworząc system eksploatacji urządzenia, musi określić procedury oraz kryteria bieżącej oceny dokładności pomiarów i okresowego sprawdzenia działania urządzenia, z zachowaniem wymagań określonych przez producenta urządzenia. W tym procesie można wykorzystywać wzajemne relacje, występujące między wielkościami mierzonymi przez system kontroli zużycia paliwa i wynikami analiz, jednak zgodnie z zasadami metrologii nie mogą one zastąpić procesu wzorcowania.

Pomiar zużycia paliwa w oferowanych systemach dokonywany jest różnymi metodami. Początkowo stosowano do tego celu przepływomierze. Aby uniknąć zwiększonych oporów ssania pompy podającej paliwo, przepływomierz montowano na jej wylocie za filtrami paliwa (rys. 1). Rozwiązanie to cechowała mała dokładność, wynikająca z:

- niedoskonałej konstrukcji przepływomierzy, produkowanych w latach 80. XX w., kiedy to oferowano pierwsze urządzenia pomiarowe;
- występującego podczas pracy silnika spalinowego szerokiego zakresu natężenia przepływu paliwa ($>1:30$);
- narażenia przepływomierzy na wysokie ciśnienie paliwa powracającego z pomp wtryskowych, występującego w niektórych rozwiązaniach układów paliwowych.



Rys. 1. Pomiar zużycia paliwa za pomocą przepływomierza

W zastosowaniach kolejowych, z uwagi na konieczność zapewnienia niezawodnej pracy silnika spalinowego lokomotywy, nie dopuszczano stosowania dokładniejszych przepływomierzy tłoczkowych.

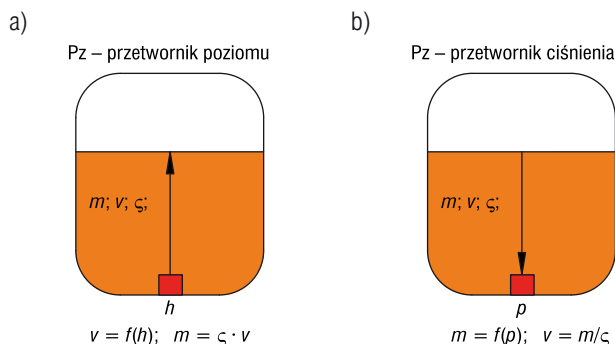
Zasadniczą wadą tego rozwiązania był brak kontroli nad rzeczywistą ilością paliwa, znajdującą się w zbiorniku pojazdu. Strzałki na rysunku 1 pokazują możliwe miejsca poboru paliwa. W zależności od miejsca poboru paliwa będzie ono, lub nie, odmierzone przez przepływomierz, a zatem jego wskazania nie odzwierciedlają ubytku paliwa ze zbiornika i stwarzają problemy z interpretacją uzyskanych wyników.

Występowały również problemy techniczne, wynikające z konstrukcji układów paliwowych silników spalinowych lokomotyw, zwłaszcza warunków zasilania pomp wtryskowych. Skutkiem omówionych uwarunkowań było powstanie systemów, w których mierzona jest ilość paliwa w zbiornikach pojazdu [1, 3, 4, 8].

Do określania ilości paliwa w zbiorniku stosowane są dwie metody:

- 1) starsza, w której ilość paliwa w zbiorniku określana jest na podstawie pomiaru poziomu paliwa [2];
- 2) nowsza – wykorzystująca pomiar ciśnienia hydrostatycznego, wytwarzanego przez paliwo; należy zwrócić uwagę, że w pomiarze musi być uwzględniona wartość ciśnienia w zbiorniku ponad lustrem paliwa.

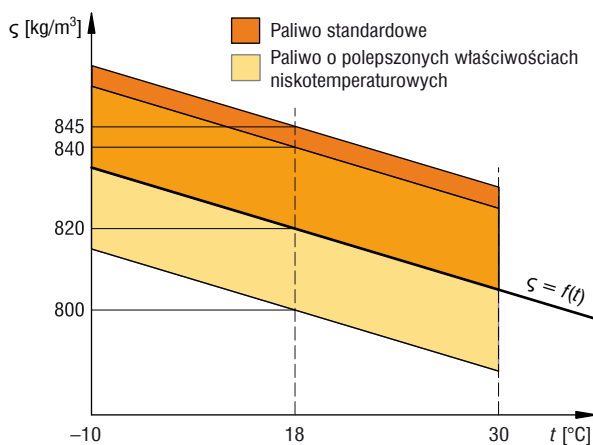
Na rysunku 2 pokazano związki między objętością paliwa, jego masą i gęstością, występujące w pomiarach przetwornikami zarówno poziomu, jak i ciśnienia hydrostatycznego. Związek masy paliwa z jego objętością wynika z gęstości paliwa i dokładność jej określenia decyduje znacząco o dokładności obliczanej wielkości. Elektroniczne przyrządy do pomiaru gęstości, których wyniki mogły by być wykorzystane przez elektroniczny system kontroli zużycia paliwa, są przyrządami bardzo drogimi, wymagającymi spełnienia określonych warunków pomiaru, trudnych do zapewnienia bezpośrednio w pojeździe – tak więc gęstość paliwa w temperaturze odniesienia wprowadzana jest arbitralnie przez jego producenta lub też może być modyfikowana przez użytkownika. System dokonuje natomiast korekty gęstości paliwa, odpowiednio do jego zmierzonej temperatury.



Rys. 2. Metody pomiaru ilości paliwa w zbiorniku

a) objętościowa, b) masowa, v – objętość paliwa, m – masa paliwa, ζ – gęstość paliwa

Na rysunku 3 pokazano zależność gęstości paliwa od jego temperatury. Zgodnie z dokumentami normatywnymi gęstość paliwa odnoszona jest do temperatury 15°C . Rozporządzenie Ministra Gospodarki [9] dopuszcza gęstości standardowych olejów napędowych w przedziale $820\text{--}845\text{ kg/m}^3$, a dla olejów o polepszonych właściwościach niskotemperaturowych minimalna gę-



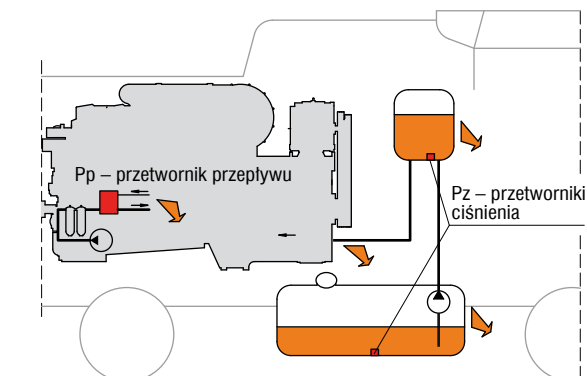
Rys. 3. Gęstość paliwa

stość może wynosić nawet 800 kg/m³. Wynika z tego, że różnica gęstości poszczególnych partii dostarczanego oleju napędowego może przekroczyć nawet 5%.

Uwzględniając mogące wystąpić różnice gęstości paliwa oraz związki matematyczne między objętością i masą paliwa, występujące w poszczególnych metodach pomiaru, dokładność ich obliczeń może wynosić $\pm 2,5\%$ jeżeli założyc, że w systemie przyjęto jego średnią wartość. Odnosząc tylko tą wartość do pojemności zbiorników paliwa np. lokomotywy SM48, wynoszącą 5400 kg/6350 l, okazuje się, że ilość paliwa w zbiorniku (objętość lub masa, obliczane na podstawie gęstości paliw) będzie określana z błędem około ± 135 kg/ ± 160 l. Taka dokładność nie zostanie zaakceptowana przez żadnego użytkownika, a przecież nie uwzględnia ona wielu innych błędów, wynikających z konstrukcji torów pomiarowych i ich wzorcowania. Występuje również błąd wynikający z korekcy związanej z temperaturą paliwa – chociaż pomiar temperatury może być wykonywany bardzo dokładnie, to wewnątrz zbiornika może występować zjawisko nierównomiernego rozkładu temperatury paliwa – temperatura mierzona czujnikiem najczęściej zintegrowanym z czujnikiem poziomu lub ciśnienia hydrostatycznego i umieszczonym na dnie zbiornika przestaje być miarodajna. To zjawisko ma szczególnie duży wpływ podczas pracy silnika spalinowego na biegu jałowym podczas postoju lokomotywy.

Powracając do zbiornika znaczna ilość pogrzanego paliwa powoduje jego miejscowe podgrzanie i wówczas można zaobserwować przyrastanie objętości paliwa.

Z przedstawionego wywodu wynika wniosek, że nawet jeżeli w praktyce uzyskuje się mniejsze od podanych błędy wielkości pochodnych (objętości lub masy obliczanych na podstawie gęstości), co jest spowodowane zbliżoną gęstością poszczególnych partii dostarczanego paliwa to liczyć się trzeba ze znacznie większymi błędami dla paliw o skrajnych wartościach gęstości. Aby więc zagwarantować dobrą dokładność kontrolowania zużycia paliwa należy zastosować te jednostki które nie będą wymagały określania gęstości paliwa. Biorąc pod uwagę że przy rozliczaniu zużycia paliwa w jednostkach objętości będzie ono wymagało jej korygowania do ustalonej temperatury, np. 15°C, omówione problemy z określaniem miarodajnej temperatury paliwa oraz konieczność uwzględnienia w rachunku błędu dodatkowej dokładności pomiaru dodatkowej wielkości, wydaje się niezaprzeczalnie korzystniejsze rozwiązanie z zastosowaniem jednostek masy. Do-



Rys. 4. Rozmieszczenie przetworników w systemie kontroli zużycia paliwa

datkowym uzasadnieniem jest bezpośredni związek energii dostarczanej w paliwie z jego masą.

Takie rozwiązanie pokazano na rysunku 4, na którym pokazano również występujący w niektórych rozwiązaniach przetwornik przepływu Pp (przepływomierz) choć jego zastosowanie w kontekście wcześniejszych rozważań jest co najmniej dyskusyjne, a w pewnych przypadkach – przy formalnym potraktowaniu problemu – może dyskredytować uzyskane wyniki.

Jak to pokazano na rysunku 2 masa paliwa w zbiorniku lokomotywy jest funkcją ciśnienia hydrostatycznego określoną przez kształt i wymiary zbiornika. Ten związek w rozwiązaniach o większej dokładności jest określany indywidualnie dla poszczególnych zbiorników, a przy mniejszej dokładności przyjmowany jako typowy dla zbiorników poszczególnych serii pojazdów, ustalony na podstawie wyników uzyskanych z miarodajnej liczby wzorcowanych zbiorników. W naszej ocenie, to drugie rozwiązanie, z uwagi na skutki eksploatacji zbiorników – powstające deformacje, wykonywane naprawy czy nagromadzenie zanieczyszczeń może prowadzić do znaczących błędów. Jak duży jest to problem może świadczyć fakt, że na przykład w lokomotywach serii SM48 różnica poziomu paliwa w zbiorniku wynosząca 1 mm przekłada się na około 7 l paliwa.

Najwyższą dokładność wzorcowania toru pomiaru masy paliwa w zbiorniku lokomotywy można uzyskać odmierzając kolejne dawki (porcje) dolewane paliwa przy pomocy wagi. Wielkość dawki uzależniona jest od kształtu i pojemności zbiornika. Taka operacja jest jednak bardzo kłopotliwa pod względem technicznym i organizacyjnym. Wiąże się także z kilka godzinnym czasem trwania tego procesu. Z tego względu najczęściej wzorcowanie wykonuje się podczas tankowania lokomotywy, odmierzając poszczególne dawki paliwa za pomocą dystrybutora. Dystrybutor odmierza paliwo w jednostkach objętości i aby określić masę dołanego do zbiornika lokomotywy paliwa musi być zmierzona jego gęstość. Urządzenie odmierzające dystrybutora i termodensymetr muszą mieć potwierdzoną wymaganą dokładność.

Po zakończeniu wzorcowania, dla naszych urządzeń, przeprowadzamy sprawdzenie dokładności pomiaru przez pobranie ze zbiornika lokomotywy i ponowne dołanie dawki paliwa odmierzonej wagą o udokumentowanej dokładności i niepewności pomiaru. Protokół z takiego sprawdzenia dokumentuje uzyskaną dokładność pomiaru masy paliwa.

Na dokładność wyników pomiarów, poza własnościami metrologicznymi przetwornika pomiarowego, mają również wpływ inne uwarunkowania. W przypadku pomiaru ilości paliwa, zwią-

szy pod uwagę podłużne i poprzeczne pochylenia torów kolejowych, istotne znaczenie ma kształt zbiornika paliwa. Jeżeli ma on poprzeczną i podłużną oś symetrii, to wystarczy jeden przetwornik, umieszczony na przecięciu osi. Przy innych rozwiązaniach, na przykład w lokomotywach serii SM42, w których składa się on z dwóch połączonych zbiorników o różnych wysokościach, optymalne rozwiązanie wymaga analitycznej oceny wpływu liczby i położenia przetworników. Dążąc do uzyskania dużej dokładności pomiaru należy uwzględnić miejsca poboru i powrotu paliwa, które zaburzają powierzchnię paliwa, a zatem jego poziom i ciśnienie hydrostatyczne. Istotne jest posadowienie przetwornika na dnie zbiornika, gdyż nawet jego minimalne przemieszczenie będzie oddziaływać na mierzoną wielkość. Z zasady działania mierzone jest paliwo znajdujące się ponad przetwornikiem, dlatego powinien on znajdować się jak najbliżej dna zbiornika, a to naraża go na oddziaływanie zanieczyszczeń, znajdujących się w paliwie.

Wracając do zaburzeń powierzchni paliwa to jest oczywiste, że będą one występować podczas ruchu pojazdu, ale także wskutek jego drgań spowodowanych pracą silnika spalinowego. Ich oddziaływanie na wskazania jest niwelowane różnymi metodami, w tym filtracją, która jednak nie pozostaje bez wpływu na wynik pomiaru. Problem z dokładnością pomiaru może pojawić się również przy niedostatecznym lub nadmiernym napełnieniu zbiornika, przy czym pojęcia te nie dotyczą parametrów zbiornika, a uwarunkowań wynikających z metody pomiaru. Wydaje się, że na rysunku 5 pokazano to w sposób nie wymagający komentarza.

W przypadku nadmiernego napełnienia zbiornika występuje niebezpieczeństwo wptynięcia paliwa do przewodu, który łączy przestrzeń nad lustrem paliwa z przetwornikiem ciśnienia. Paliwo to zmieni wielkość ciśnienia odniesienia i może być zinterpretowane jako ubytek paliwa ze zbiornika. Prawidłowa konstrukcja tej części instalacji przetwornika paliwa powinna być odporna na zalanie paliwem w przypadku:

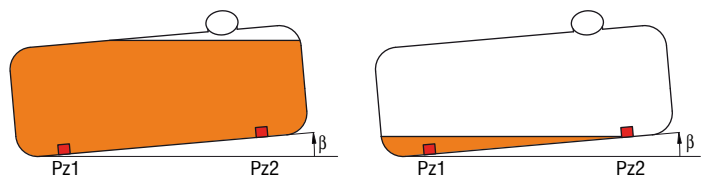
- znacznego napełnienia zbiornika paliwa;
- powstania fali paliwa na skutek uderzenia lokomotywy o jakąś przeszkodę, np. stojące wagony;
- dużego pochylenia lokomotywy, powstałego na przykład po jej wykolejeniu.

Podsumowanie

Zagadnienia przedstawione w artykule nie opisują wszystkich czynników, jakie wpływają na dokładność pomiaru ilości paliwa w zbiorniku. Nie rozpatrywano pomiaru innych wielkości, wykorzystywanych do kontroli zużycia paliwa.

Z przedstawionych rozważań wynika, że urządzenia i systemy przeznaczone do kontroli zużycia paliwa:

- są konstrukcjami o dużym stopniu złożoności;
- wymagają:
 - zachowania reżimu technologicznego produkcji, gwarantującego niezawodną pracę;



Rys. 5. Wpływ pochylenia zbiornika na pomiar masy paliwa

- instalacji urządzeń w pojeździe zgodnej z warunkami technicznymi;
- wzorcowania torów pomiarowych z zachowaniem zasad metrologii;
- sprawdzenia działania systemu;
- eksploatacji zgodnej z dokumentacją techniczno-ruchową.



Literatura:

- [1] Adamczyk M., Smolnik M., Aksel sp. z o.o.: *Zawansowana telemetria dla taboru szynowego. Na przykładzie systemu telemetrii i pomiaru zużycia paliwa dla lokomotyw SM42*. Konferencja nowoczesne rozwiązania dla taboru szynowego. Radiokomunikacja kolejowa. Gdańsk 19–20 lutego 2008 r.
- [2] Chodorowski W., Górski Z., Wnęk K.: *System analizy zużycia paliwa opis programu*. Technika Transportu Szynowego 11-12/1995.
- [3] ENTE Sp. z o.o. METRONIX: *System monitorowania zużycia paliwa i wspierania procesów logistycznych przewoźnika kolejowego*. Konferencja nowoczesne rozwiązania dla taboru szynowego. Radiokomunikacja kolejowa. Gdańsk 19–20 lutego 2008 r.
- [4] Hejłasz M., Sałkowski J.: *Ultradźwiękowe urządzenie pomiaru paliwa UUPP1*. Technika Transportu Szynowego 11-12/1995.
- [5] Reducha W.: *Niektóre aspekty gospodarki paliwowej w eksploatacji lokomotyw spalinowych*. Technika Transportu Szynowego 9/2005.
- [6] Rzepiejewski H.: *Diagnostyka agregatów prądotwórczych – zużycie paliwa i właściwości trakcyjne lokomotyw spalinowych*. Technika Transportu Szynowego 9/2005.
- [7] Szymański A.: *System indywidualnego rozliczania zużycia paliwa dla lokomotyw spalinowych*. Technika Transportu Szynowego 4/1994.
- [8] ZEPWN J. Czerwiński i wspólnicy - Spółka Jawna: *System CL 400 produkcji ZEPWN do pomiaru i kontroli zużycia paliwa w lokomotywach spalinowych*. Seminarium Modernizacja pojazdów kolejowych. Nowe podzespoły, materiały i technologie. Warszawa 7–8 lutego 2008 r.
- [9] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z 19 października 2005 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw ciekłych*. Dz.U. 2005 nr 216 poz. 1825, ze zmianami w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z 8 września 2006 r., zmieniające rozporządzenie sprawie wymagań jakościowych dla paliw ciekłych. Dz.U. 2006 nr 167 poz. 1185.
- [10] PN-EN ISO 10012: 2004 r. *Systemy zarządzania pomiarami. Wymagania dotyczące procesów pomiarowych i wyposażenia pomiarowego*.