

Wpływ wybranych parametrów strony pierwotnej układu zapłonowego na ograniczenie poziomu emisji i toksyczności spalin

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę wpływu stanu naładowania akumulatora jako parametru strony pierwotnej układu zapłonowego na zawartość toksycznych związków w spalinach. Przeprowadzono również analizę wpływu wybranego parametru układu zapłonowego na wartość energii wyładowania iskrowego. Badania eksperymentalne zawartości toksycznych związków w spalinach przeprowadzono na stanowisku badawczym bateryjnych układów zapłonowych.

Abstract. Analysis of the impact battery state of charge as a parameter on the primary side of the ignition system on content of toxic substances in the exhaust has been presented in the paper. Impact of the selected parameter to the value of the ignition system spark discharge energy has been analysed. Experimental studies the content of toxic substances in exhaust gases was carried out on a test battery ignition systems. **Analysis of the impact battery state of charge as a parameter on the primary side of the ignition system**

Słowa kluczowe: układy zapłonowe, układ nieliniowy, wyładowanie iskrowe, energia, spaliny .

Keywords: ignition systems, nonlinear system, spark discharge, energy, fumes.

doi:10.12915/pe.2014.12.16

Wstęp

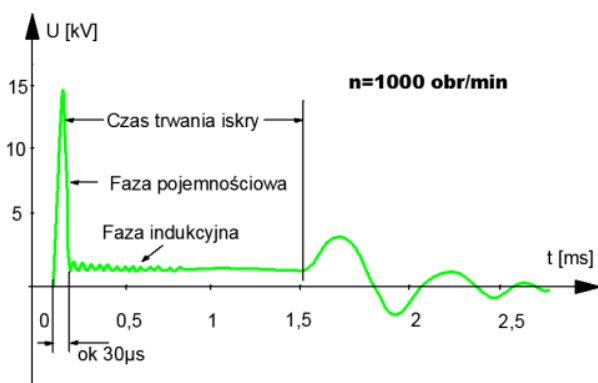
Układ zapłonowy silnika spalinowego ma za zadanie zapoczątkować proces spalania mieszanki paliwowo powietrznej przez wyładowanie elektryczne między elektrodami świecy zapłonowej.

Wyładowanie nastąpi, gdy napięcie przyłożone do elektrod świecy zapłonowej spowoduje jonizację gazu w stopniu umożliwiającym przepływ prądu elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej. Ponadto wyładowanie iskrowe następuje, gdy wartość energii jest wystarczająco duża.

Wyładowanie iskrowe składa się z dwóch faz:

- fazy pojemnościowej - bardzo krótkiego impulsu prądowego o dużym natężeniu,
- fazy indukcyjnej - długiego wyładowania łukowego o małej wartości natężenia prądu.

Przebieg napięcia na elektrodach świecy zapłonowej przy stałej prędkości obrotowej silnika spalinowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Wyidealizowany przebieg napięcia na elektrodach świecy zapłonowej w cylindrze pracującego silnika. [1]

Pewność zapłonu zależy natomiast od parametrów wyładowania iskrowego, a mianowicie:

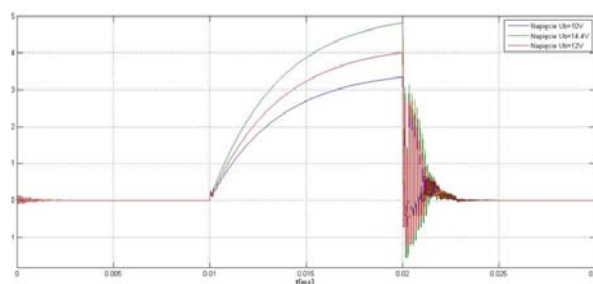
- zapasu napięcia, czyli różnicy między napięciem wytwarzanym przez układ zapłonowy, a największym napięciem przeskoku,
- energii wyładowania iskrowego,
- stromości narastania wysokiego napięcia,
- czasu trwania fazy indukcyjnej wyładowania,
- kształtu wyładowania iskrowego.

Jak wykazują dotychczasowe badania [3,7] parametry wyładowania iskrowego - głównie wielkość energii wyładowania iskrowego - w istotny sposób wpływają na przebieg spalania mieszanki paliwowo powietrznej.

Wpływ wybranych parametrów układu zasilania na wartość energii wyładowania iskrowego

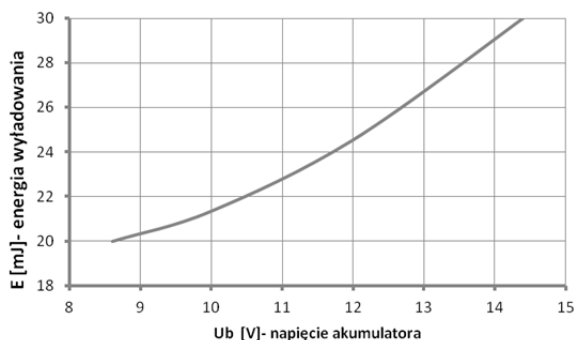
Energia wyładowania iskrowego jest zależna od wielu czynników, między innymi od parametrów obwodu pierwotnego układu zapłonowego. Do parametrów obwodu pierwotnego mających wpływ na wartość energii wyładowania iskrowego należy zaliczyć stan napięcia akumulatora.

Ocenę wpływu wartości napięcia akumulatora (przy zmianie napięcia akumulatora od 8,6V do 14,4V) na wartość energii wyładowania iskrowego dokonano przeprowadzając badania: symulacyjne oraz na obiekcie rzeczywistym. Dla powyższego zakresu zmienności napięcia akumulatora obliczono energię zgromadzoną w cewce zapłonowej oraz energię wyładowania iskrowego. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rys.2,3.



Rys. 2. Przebiegi prądu strony pierwotnej dla wybranych wartości napięcia zasilania obwodu pierwotnego [3].

Dla przeprowadzonej symulacji (rys.2) czas narastania prądu i_1 przy różnych wartościach napięcia zasilania (pozostałe parametry układu są stałe) nie zmienia się i wynosi około 0,01ms. Natomiast istotnie różnią się wartości prądu. Przy napięciu obniżonym do 10V względem napięcia znamionowego 12V prąd osiąga wartość 3,2A, a dla wyższych napięć, np. 14,4V prąd osiąga wartość 4,85A. Konsekwencją tych zmian są zmiany wartości energii wyładowania iskrowego rys.3.



Rys.3. Zmiany wartości energii wyładowania iskrowego w funkcji zmian napięcia akumulatora

Uzyskane wyniki badań (rys.3) wskazują, że wraz ze zmianą wartości napięcia akumulatora zmienia się wartość energii wyładowania, lecz zmiany te nie zachodzą według zależności liniowej, wynika to z charakteru przebiegu prądu (rys.2). Energia zawarta w wyładowaniu iskrowym jest w przybliżeniu równa energii zgromadzonej w polu magnetycznym lub w pojemności obwodu głównego, pomniejszonej o straty powstałe w transformatorze wysokiego napięcia.

Dla poprawnej i efektywnej pracy silnika spalinowego oprócz optymalnej energii wyładowania iskrowego koniecznym jest także, aby mieszanka paliwowa powietrzna posiadała odpowiedni skład. Skład ten określany jest za pomocą współczynnika nadmiaru powietrza jako stosunek ilości powietrza L [kg, m³] zawartego w mieszance, do ilości powietrza L_0 [kg, m³] teoretycznie niezbędnej do pełnego spalania paliwa zawartego w tej mieszance [8,9,11].

$$\lambda = \frac{L}{L_0}$$

Współczynnik ten jest równy jedności wtedy, gdy ilość paliwa i powietrza odpowiadają tzw. składowi stechiometrycznemu, a paliwo zawarte w danej ilości powietrza może ulec pełnemu spalaniu na dwutlenek węgla i parę wodną. Do całkowitego spalania 1 kg paliwa potrzeba 14,7kg powietrza. Jeżeli ilość powietrza jest zbyt mała do całkowitego spalania ($\lambda < 1$), to mieszankę nazywa się bogatą, a jeżeli jest odwrotnie ($\lambda > 1$) mówimy o ubogiej mieszance. W warunkach wyidealizowanych, gdy między elektrodami świecy znajduje się jednorodna mieszanka o składzie stechiometrycznym ($\lambda = 1$), do zapoczątkowania spalania wystarczy iskra o energii 0,1÷1mJ trwająca przez 1µs, a więc składowa pojemnościowa wyładowania. W warunkach rzeczywistych, gdy w cylindrach znajduje się mieszanka niejednorodna, często źle rozpylona i rozcieńczona spalinami, do zapłonu potrzebna jest energia 20mJ. Przy zasilaniu mieszanką zubożoną ($\lambda = 1,2 \div 1,5$) należy wydłużyć fazę wyładowania. Wydzielanie ciepła w dłuższym czasie przyspiesza reakcje chemiczne w fazie inicjacji, co sprzyja zmniejszeniu nierównomierności cykli roboczych. Dłuższa składowa indukcyjna umożliwia odparowanie mieszanki, co powoduje odczuwalną poprawę rozruchu i skrócenie czasu nagrzewania silnika. W konsekwencji, wydłużenie czasu trwania wyładowania iskrowego powoduje zwiększenie mocy, zmniejszenie zużycia paliwa i toksyczności spalin [5,6].

Sterowanie układów zapłonowych

Obecnie w produkowanych i eksploatowanych pojazdach samochodowych stosuje się najczęściej dwa rozwiązania układów zapłonowych, stykowe lub bezstykowe. Każde z tych rozwiązań posiada zalety i wady. W nowszych konstrukcjach dominują rozwiązania bezstykowe.

W skład układu sterowania bezstykowego wchodzi czujnik wytwarzający sygnał elektryczny w punkcie zapłonu oraz układ formujący, przekształcający sygnał z czujnika na impuls zdolny doysterowania tranzystora mocy lub tyrystora. W układach zapłonowych najczęściej stosuje się następujące rodzaje czujników:

a) czujniki generacyjne, w których wielkością wyjściową jest siła elektromotoryczna:

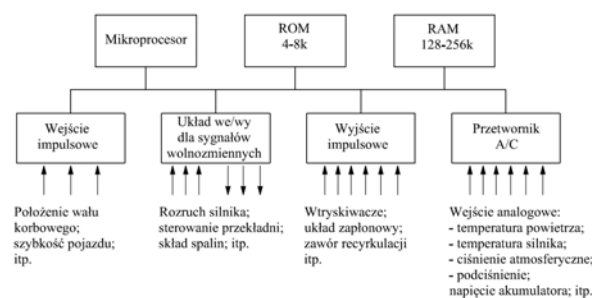
- magnetoindukcyjne w dwóch odmianach: elektrodynamiczne (z wirującym magnesem) i reluktancyjne (ze zmienną szczeliną powietrzną),
- fotoelektryczne,
- halotronowe,
- z efektem Wieganda.

b) czujniki parametryczne, w których wielkością wyjściową jest zmiana parametrów obwodu (rezystancji, indukcyjności, indukcyjności wzajemnej):

- transformatorowe,
- magnetorezystancyjne.

Ze względu na dobre parametry eksploatacyjne najczęściej stosowane są w pojazdach samochodowych czujniki magnetoindukcyjne oraz fotoelektryczne [12,13].

Ocena wpływu rozwiązania układu zapłonowego na parametry silnika (proces spalania) jest zagadnieniem bardzo złożonym. Proces spalania w silniku, a w konsekwencji moc, moment obrotowy, zużycie paliwa i toksyczność spalin zależą od wielu zmiennych. Pomiary i sterowanie procesem spalania mieszanki paliwowo-powietrznej zostały znacznie udoskonalone, dzięki zastosowaniu w układach sterowania układów mikroprocesorowych. Schemat blokowy mikroprocesorowego systemu sterującego pracą silnika przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Schemat poglądowy mikroprocesorowego systemu sterującego pracą silnika.

Samochodowy system mikroprocesorowy sterowania pracą silnika realizuje następujące funkcje:

- przetwarza analogowe sygnały z czujników na postać cyfrową i przesyła je do procesora,
- analizuje na podstawie sygnałów wejściowych stan regulowanego obiektu i posługując się pamięcią określa optymalne wartości sygnałów wyjściowych dla wszystkich funkcji objętych sterowaniem,
- przetwarza wszystkie wyjściowe sygnały cyfrowe na odpowiednie dla danego elementu wykonawczego wielkości sterujące.

Powyższy cykl powtarza się z częstotliwością niezbędną do uzyskania prawidłowej pracy obiektu.

Możliwości ograniczenia zużycia paliwa i toksyczności spalin.

Zmniejszenie zużycia paliwa powinno być zrealizowane przy minimalizacji poziomu toksycznych związków w spalinach, ograniczeniu poziomu hałasu oraz przy zachowaniu dobrych parametrów trakcyjnych pojazdów.

Zmniejszenie zużycia paliwa i toksyczności spalin można uzyskać poprzez:

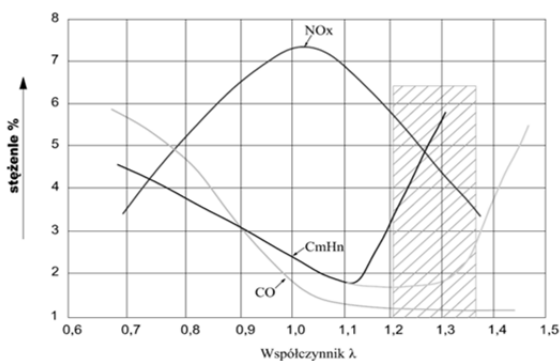
- optymalizację procesu spalania,
- kontrolę dawkowania paliwa,
- regulację parametrów iskry zapłonowej w zależności od stanu pracy silnika,
- recyrkulację spalin,
- dopalanie katalityczne,
- optymalizację sterowania silnikiem i skrzynią przekładniową,
- automatyzację funkcji sterowniczych układu napędowego.

Najlepsze wyniki osiąga się stosując wszystkie wymienione wyżej czynniki. Takie rozwiązanie stosuje się w zespolonych systemach sterowania układem napędowym. W silnikach spalinowych źródłem toksycznych związków mogą być:

- przedmuchi ze skrzyni korbowej,
- pary paliwa ze zbiornika paliwa i innych elementów układu paliwowego,
- spaliny z układu wydechowego.

Dwa pierwsze źródła powstawania związków toksycznych są wynikiem stanu technicznego skrzyni korbowej i układu paliwowego pojazdu. Natomiast na zużycie paliwa oraz ilość i jakość związków toksycznych w spalinach może wpływać wiele parametrów, np.: wartość energii wyładowania iskrowego, skład mieszanki paliwowo powietrznej, prędkość obrotowa itd. Utrzymanie minimalnych ilości związków toksycznych w spalinach przy zachowaniu optymalnych parametrów trakcyjnych pojazdu wymaga stałej kontroli stanu technicznego układu napędowego pojazdu. Jedną z podstawowych metod oceny stanu technicznego układu napędowego pojazdu jest pomiar toksycznych związków w spalinach.

W spalinach kontroli powinien podlegać poziom CO, C_mH_n, NO_x oraz poziom sadzy w silnikach wysokoprężnych. Tlenki węgla i węglowodory powstają w wyniku niepełnego procesu spalania, przy czym CO zależą od współczynnika λ. Tlenki azotu są naturalnymi produktami chemicznymi reakcji w procesie spalania, wpływ składu mieszanki na zawartość toksycznych składników w spalinach przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Zawartość toksycznych składników w spalinach w funkcji składu mieszanki [4].

Istnieje kilka możliwości zmniejszenia toksyczności spalin drogą oddziaływania na skład mieszanki. Jedną z metod polega na zasileniu silnika mieszanką zubożoną (λ=1,2÷1,3). Powoduje to obniżenie zawartości tlenków azotu NO_x, lecz równocześnie podnosi się wtedy poziom węglowodorów C_mH_n. Wymagania dotyczące precyzyjnego dawkowania paliwa są bardzo duże, bowiem mieszanka jest zubożona do granicy palności. Ta metoda ograniczania NO_x okazuje się niekorzystna, gdyż silnik rozwija mniejszą moc, a zwiększa się zużycie paliwa. W przypadku zasilania silnika mieszanką bogatą (λ=0,7÷0,55) zawartość NO_x jest

również stosunkowo niewielka. Zwiększoną emisję C_mH_n i CO można ograniczyć stosując dopalacz w układzie wydechowym. Wadą tego rozwiązania jest wzrost zużycia paliwa, nawet o 30%. Przeprowadzone badania wykazały, że najkorzystniej jest zasilić silnik mieszanką o składzie stechiometrycznym (λ=1). Natomiast przy zasilaniu bogatą mieszanką niska obecność CO i NO_x zostaje zredukowana do wolnego azotu N₂. Wtedy dopalacz nie powoduje zmniejszenia zawartości tlenków azotu, ponieważ nadmiar tlenu i zbyt mała zawartość CO uniemożliwiają redukcję NO_x do N₂ [7-9].

Bardzo dobre wyniki w ograniczeniu NO_x można osiągnąć przez zastosowanie recyrkulacji spalin. Recyrkulacja spalin polega na doprowadzeniu pewnej części gazów wylotowych silnika do kanału dolotowego. Korzystne warunki uzyskuje się, jeśli udział spalin w mieszance nie przekracza 20%. Przy większych wartościach współczynnika recyrkulacji obserwuje się zmniejszenie średniego ciśnienia w cylindrze i wzrost zużycia paliwa.

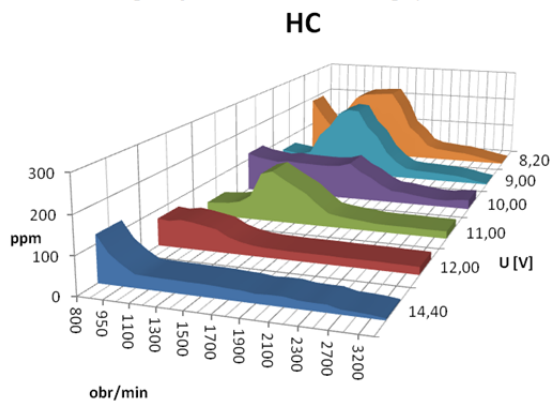
Jak wykazują przeprowadzone badania symulacyjne, (rys.5.) najkorzystniejszą mieszanką paliwowo powietrzną zasilającą silnik spalinowy jest mieszanka o składzie stechiometrycznym (λ=1).

Przy recyrkulacji obecność spalin w cylindrze powoduje zmniejszenie: średniego ciśnienia w cylindrze, szczytowych temperatur w czasie spalania oraz emisji NO_x. Tlenki azotu powstają właśnie w wysokich temperaturach. Obecność spalin w cylindrze powoduje również spowolnienie reakcji występujących bezpośrednio przed zapłonem, co umożliwia stosowanie paliwa o niższej liczbie oktanowej.

Pomiary parametrów spalin na stanowisku badawczym

Ocenę wpływu zmian wartości napięcia akumulatora (przy zmianie napięcia akumulatora od 8,6V do 14,4V) na wartość energii wyładowania iskrowego dokonano przeprowadzając badania: symulacyjne oraz na obiekcie rzeczywistym.

Dla powyższego zakresu zmienności napięcia akumulatora obliczono zmienność energii zgromadzonej w cewce zapłonowej, oraz energii wyładowania iskrowego rozdział (Wpływ wybranych parametrów układu zasilania na wartość energii wyładowania iskrowego).



Rys.6. Zawartość węglowodorów w spalinach funkcji napięcia oraz obrotów silnika uzyskane na stanowisku badawczym.

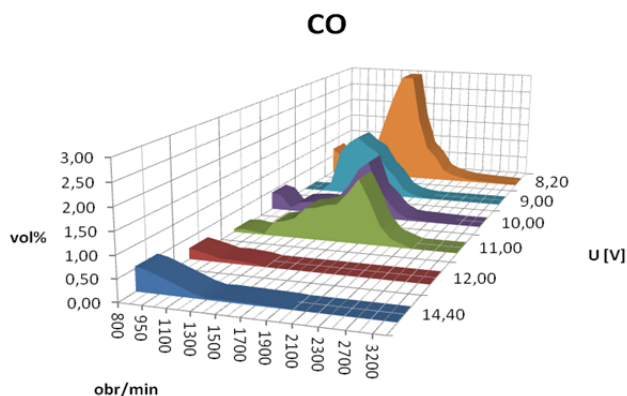
Przykładowe wyniki badań uzyskane na stanowisku badawczym zawartości wybranych związków (węglowodorów i tlenku węgla) w spalinach przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Wyniki z przeprowadzonych badań (rys.6, 7) zawartości toksycznych związków w spalinach w funkcji zmian napięcia zasilania obrotu pierwotnego układu zapłonowego wskazują, że istotne różnice w ilości zawartości toksycznych związków w spalinach przedostających się do

atmosfery występują w zakresie prędkości obrotowej silnika od 1000obr/min do 2200 obr/min. Największe ilości toksycznych związków w spalinach występują przy małych wartościach energii wyładowania iskrowego, związane jest to z niepełnym spalaniem. Wraz ze zmianą napięcia zasilania obwodu pierwotnego (zmiana energii wyładowania iskrowego) ulega zmianie zawartość w spalinach węglowodorów C_mH_n . W przypadku pogorszonego stanu naładowania akumulatora lub nieprawidłowo działającego regulatora napięcia zawartość węglowodorów w spalinach znacznie wzrasta (rys.6). Wraz ze wzrostem wartości energii wyładowania ilość toksycznych związków w spalinach maleje. Również zawartość tlenku węgla CO (rys.7) przy niższych wartościach napięcia zasilania wzrasta do poziomu nawet 3% w zakresie prędkości obrotowych silnika utrzymywanych w czasie normalnej eksploatacji pojazdu. Natomiast przy napięciu zasilania 12V i większym toksyczność spalin znacznie maleje, do poziomu dopuszczalnych wartości.

Przy prędkościach obrotowych silnika powyżej 2200 obr/min nie zauważa się różnic w ilości toksycznych związków w spalinach przy zmianie wartości energii wyładowania iskrowego, związane jest to ze zwiększeniem się częstości wyładowań.

Brak jest jakiegokolwiek prawidłowości występujących różnic (są one przypadkowe) w ilości toksycznych związków w spalinach przy prędkościach obrotowych do 1000 obr/min. Występujące wartości są trudne do interpretacji, należy sądzić są efektem niejednorodności mieszanki paliwowo powietrznej (ładunku) oraz nierównomierności i czasu trwania napełnienia cylindrów.



Rys. 7. Zawartość tlenku węgla w spalinach funkcji napięcia oraz obrotów silnika uzyskane na stanowisku badawczym.

Podsumowanie

Parametry układu zapłonowego w sposób istotny wpływają na wartość energii wyładowania iskrowego. Energia wyładowania iskrowego zależy od wielu czynników, między innymi od parametrów obwodu pierwotnego układu zapłonowego. Istotny wpływ na wartość

energii wyładowania iskrowego ma wartość napięcia akumulatora.

Przeprowadzone badania eksperymentalne i symulacyjne pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- negatywną cechą układów zapłonowych z gromadzeniem energii w pojemności jest wrażliwość układu na spadki napięcia zasilania oraz krótki czas wyładowania,
- wzrost prędkości obrotowej silnika powoduje zmniejszenie energii gromadzonej w cewce zapłonowej, a to jednocześnie zmniejsza energię wyładowania iskrowego,
- zły stan naładowania akumulatora w sposób istotny wpływa na wzrost zawartości toksycznych związków w spalinach w zakresie eksploatacyjnych prędkości obrotowych,

- przy podwyższonych prędkościach obrotowych silnika (powyżej 2200obr/min) zawartość węglowodorów i tlenku węgla obniża się do znikomych wartości.

Przyszłość konstrukcji samochodowych musi być ściśle powiązana z rozwojem i coraz szerszym stosowaniem techniki mikroprocesorowej do sterowania podstawowymi funkcjami pojazdu. Jej wykorzystanie jest szczególnie ważne w świetle coraz większych wymagań stawianych konstruktorom odnośnie emisji szkodliwych substancji, zmniejszenia zużycia paliwa oraz poprawy bezpieczeństwa i komfortu jazdy.

LITERATURA

- [1] Pomykalski Z.: Elektrotechnika samochodów WKŁ 1978
- [2] Trzeciak K.: Diagnostyka samochodów osobowych, WKŁ 2013.
- [3] Różowicz S.: Analiza wpływu rozwiązań konstrukcyjnych i parametrów układu zapłonowego na wartość energii wyładowania iskrowego, Rozprawa doktorska, PŚK 2012,
- [4] Konopiński M.: Elektronika w technice motoryzacyjnej WKŁ 1977.
- [5] Herner A., Riehl H.J. Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych, Warszawa 2003.
- [6] Herner A.: Elektronika w samochodzie, WKŁ, Warszawa 2001.
- [7] Kubiak P., Zalewski M.: Pracownia diagnostyki pojazdów samochodowych WKŁ 2012
- [8] Niziński S.: Eksploatacja obiektów technicznych, ITeE, Radom 2002.
- [9] Dziubiński M.: Badania elektronicznych urządzeń pojazdów samochodowych Wydaw. Naukowe Gabriel Borowski 2004.
- [10] Pacholski K.: Elektryczne i elektroniczne wyposażenie pojazdów samochodowych. Część 1. Wyposażenie elektryczne i elektromechaniczne, WKŁ 2009.
- [11] Kaniewski J., Fedyczak Z., Modeling and analysis of dynamic properties of the hybrid transformer with MRC, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr.1, 45-50
- [12] Schneehage G., tłumacz: Trzeciak K.: Czujniki układu sterowania silnika w praktyce warsztatowej, WKŁ 2012.
- [13] Szulborski A.: Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym. WKŁ Warszawa 2004.

Autor: dr inż. Sebastian Różowicz, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Ergoelektroniki, Aleja. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: s.rozowicz@tu.kielce.pl