



**Stanisław GAD, Radosław GAD, Agnieszka PAWLAK**

## **WPŁYW KONFIGURACJI UKŁADU ZAPŁONOWEGO NA SKUTECZNOŚĆ WYŁADOWANIA ISKROWEGO I TOKSYCZNOŚĆ SPALIN**

### *Streszczenie*

*W pracy przedstawiono krótką charakterystykę i rozwiązania bateryjnych układów zapłonowych współpracujących z silnikami spalinowymi. Dokonano badań wpływu parametrów konstrukcyjnych układów rozdzielaczowych na wartość napięcia przeskoku, natężenia prądu wyładowania oraz poprawność pracy świecy zapłonowej. Przedstawiono również wpływ rozdzielacza zapłonu na niezawodność pracy układu zapłonowego oraz toksyczność produktów spalania.*

### **1. ANALIZA WSPÓŁPRACY UKŁADU ZAPŁONOWEGO Z SILNIKAMI SPALINOWYMI**

Praca silnika spalinowego uzależniona jest od poprawnej pracy układu zapłonowego, bowiem proces spalania w silniku a w konsekwencji moc, moment obrotowy, zużycie paliwa i toksyczność spalin zależą od energii wyładowania iskrowego oraz kąta wyprzedzenia zapłonu.

Prowadzone badania mają na celu optymalizację parametrów wyładowania iskrowego, dla uzyskania założonych efektów pracy silnika. W wyniku przeprowadzonych w tym zakresie prac konstrukcyjnych powstało wiele rozwiązań układów zapłonowych z wykorzystaniem elementów elektronicznych, jak również sterowników jako centralnej jednostki komputerowej nadzorującej i sterującej procesem spalania mieszanki paliwowo powietrznej.

Wykonanie elektronicznego rozdzielacza zapłonu z uwagi na ograniczone możliwości elementów elektronicznych, które pracowałyby w obwodach o napięciu 30÷40kV jest z ekonomicznego punktu widzenia nieopłacalne.

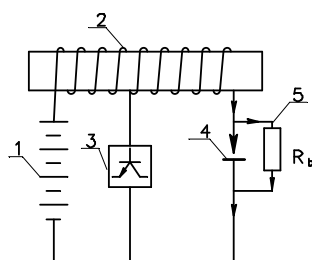
W rozwiązaniach praktycznych stosujemy, więc układy z rozdzielaczami mechanicznymi lub układy wielocewkowe, z których wysokie napięcie doprowadzone jest bezpośrednio do świec zapłonowych.

Stosowanie klasycznych (mechanicznych) rozdzielaczy zapłonu jest uzasadnione, ponieważ:

- są stosunkowo niezawodne ze względu na prostą konstrukcję;
- ograniczają prądy upływnościowe, co zmniejsza straty energii podczas wyładowania;
- zwiększają niezawodność pracy świecy zapłonowej poprzez wyeliminowanie wpływu produktów spalania gromadzących się na jej izolatorze;
- są wielokrotnie tańsze od układów elektronicznych.

Stosowanie domieszek antydetonacyjnych do paliwa związane jest ze stopniem sprężania, powoduje odkładanie się produktów spalania na izolatorze świecy zapłonowej bocznikując przerwę międzyelektrodową. Bocznik ten zmniejsza energię wyładowania a niekiedy może powodować „wypadania zapłonów”, co zwiększa zużycie paliwa i toksyczność spalin.

Niekorzystny wpływ tego bocznika można skompensować poprzez zwiększenie mocy układu zapłonowego lub stosowanie dodatkowej przerwy w obwodzie wysokiego napięcia. Tę dodatkową przerwę zapewnia rozdzielacz zapłonu. Schemat bateryjnego układu zapłonowego obrazujący zjawisko gromadzenia nagaru przedstawiono na rys.1.



**Rys. 1.** Zjawisko upływności prądu przy zanieczyszczonej świecy zapłonowej, gdzie: 1– akumulator, 2 – cewka zapłonowa, 3 – tranzystorowy blok sterowania w obwodzie pierwotnym cewki zapłonowej, 4 – świeca zapłonowa, 5 – rezystancja symulująca zjawisko nagaru.

Zanieczyszczenia świecy zapłonowej nagarem oznaczają w schemacie na rys. 1. zbocznikowanie przerwy międzyelektrodowej rezystancją  $R_b$ . Rezystancje ta przy odtwarzaniu w laboratorium podobnych warunków pracy świecy przyjmuje się  $R_b = 0,5 \text{ M}\Omega$  [2] Spadek napięcia powstający na takiej rezystancji podczas przepływu prądu jest zbyt mały, aby na równoległe załączonej świecy mogło powstać wyładowanie iskrowe. W rezultacie świeca przestaje pracować. Jeżeli w przewodzie WN zasilającym świecę zapłonową wytworzymy przerwę ograniczającą prąd upływnościowy wysokie napięcie powstające w cewce wzrasta do wartości napięcia przeskoku i po jej przebiciu pojawi się na elektrodach świecy powodując przeskok iskrowy.

Do podstawowych metod zmniejszania zużycia paliwa i toksyczności spalin zalicza się:

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

Najlepsze wyniki osiąga się stosując kompleksowo wszystkie metody. Takie rozwiązanie zastosowano w układach MOTRONIC (BOSCH) lub ECC (FORD). W silniku spalinowym wyróżnia się trzy źródła toksycznych związków:

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

W spalinach kontroli podlega poziom  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$ ,  $\text{NO}_x$  oraz w silnikach W.P. zawartość sadzy w spalinach. Tlenki węgla i węglowodory powstają w wyniku niepełnego spalania, przy czym poziom  $\text{CO}$  zależy od współczynnika  $\lambda$ . Tlenki azotu są naturalnymi produktami chemicznych reakcji w procesie spalania.

Istnieje kilka możliwości zmniejszenia toksyczności spalin drogą oddziaływania na skład mieszanki. Jedna metoda polega na zasilaniu silnika mieszanką zubożoną ( $\lambda=1,2-1,3$ ).

Powoduje to obniżenie zawartości tlenków azotu  $\text{NO}_x$  lecz równocześnie wrasta poziom węglowodorów  $\text{C}_m\text{H}_n$ . Wymagania dotyczące precyzji dawkowania paliwa są bardzo duże, bowiem mieszanka jest zbliżona do granicy zapalności. Taka metoda ograniczania  $\text{NO}_x$  nie jest korzystna, bowiem silnik rozwija mniejszą moc a zużycie paliwa jest większe. W innym systemie stosuje się zasilanie silnika mieszanką bogatą ( $\lambda=0,7-0,55$ ). W tym zakresie zawartość  $\text{NO}_x$  jest również stosunkowo niewielka. Zwiększoną emisję  $\text{C}_m\text{H}_n$  i CO można ograniczyć stosując dopalacz w układzie wydechowym. Wadą jest wzrost zużycia paliwa, nawet do 30%. Badania wykazały, że najkorzystniejszy sposób polega na zasilaniu silnika mieszanką o składzie stechiometrycznym ( $\lambda=1$ ).

Niską zawartość  $\text{NO}_x$  przy zasilaniu bogatą mieszanką tłumaczy się tym, że wskutek obecności CO,  $\text{NO}_x$  zostaje zredukowany do wolnego azotu  $\text{N}_2$ . Dopalacz nie powoduje zmniejszenia zawartości tlenków azotu, ponieważ nadmiar tlenu i zbyt mała zawartość CO uniemożliwiają redukcję  $\text{NO}_x$   $\text{N}_2$ .

Bardzo dobre wyniki w ograniczaniu  $\text{NO}_x$  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 mi wzrost zużycia paliwa. Korzystny wpływ recyrkulacji spalin tłumaczy się tym, że obecność spalin w cylindrze powoduje zmniejszenie szczytowych temperatur w czasie spalania a tym samym zmniejszenie emisji  $\text{NO}_x$ . 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. Wielkość dawki podawanego paliwa powinna być dostosowana do chwilowych wartości parametrów silnika. Znaczne zmniejszenie toksyczności spalin uzyskuje się jeżeli zastosujemy ujemne sprzężenie zwrotne od składu spalin.

## 2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Dla przeprowadzenia analizy wpływu parametru rozdzielacza zapłonu na prace układu zapłonowego przeprowadzono badania w zakresie:

- określenia napięcia przeskoku dla wybranych grubości elektrod palca rozdzielczego w funkcji odległości między elektrodami;
- określenia napięcia przeskoku dla obwodu współpracy rozdzielacza zapłonu ze świecą zapłonową;
- badania parametrów wyładowania iskrowego: napięcia, natężenia prądu oraz czasu trwania wyładowania w funkcji odległości między elektrodami.

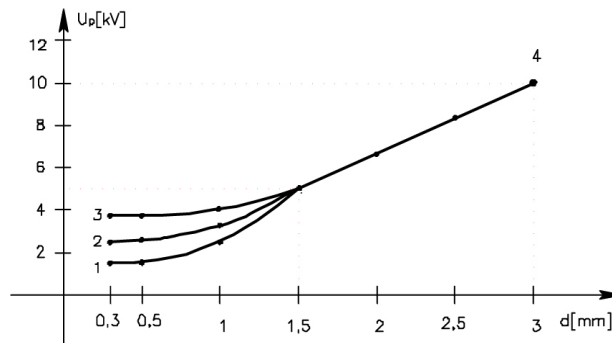
Badania dla realizacji założonego zakresu badań wykonano eksperymentalny model rozdzielacza umożliwiający instalowanie elektrod o założonych grubościach i odległościach między elektrodą centralną a elektrodami bocznymi. Wpływ parametrów konstrukcyjnych na wartość napięcia przeskoku przedstawiono na rys. 2. Wartość napięcia przeskoku zależy od wielkości przerwy między elektrodami, natężenia pola elektrycznego, ciśnienia i składu gazu w obszarze między elektrodowym, materiału oraz kształtu elektrod oraz temperatury. Wartość napięcia przeskoku określa wzór Paschena [3].

$$U_p = \frac{B}{\ln \frac{A}{\ln 1 + \frac{1}{\gamma}}} \quad (1)$$

gdzie: A,B – współczynniki zależne od energii jonizacji i temperatury;

$\gamma$  - drugi współczynnik Townsenda, zależny od materiału katody oraz warstw tlenkowych na powierzchni elektrod.

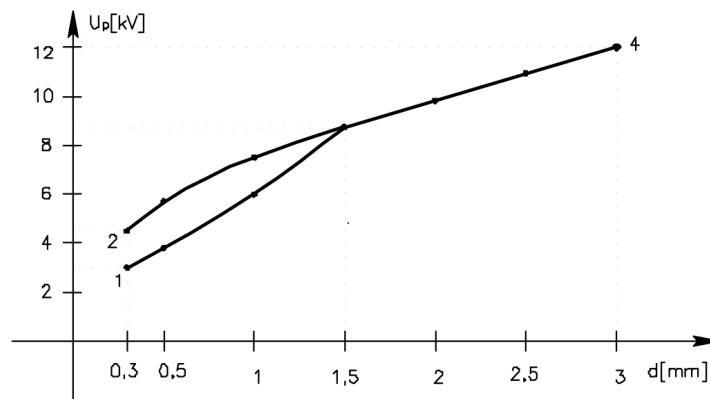
Dla ciśnienia atmosferycznego można przyjąć  $\gamma = 10^{-8}$ .



**Rys. 2.** Zależność napięcia przeskoku od przerwy między elektrodami i grubości elektrod palca rozdzielczego, gdzie:  $d$  – odległość między elektrodami rozdzielacza zapłonu, 1-4 grubość elektrody 0,1 mm, 2-4 grubość elektrody 1,5 mm, 3-4 grubość elektrody 3,0 mm.

Jak widać na rysunku 2 napięcie przeskoku zależy od odległości i rozkładu pola elektrycznego. Dla pola silnie niejednostajnego ( $g=0,1$  mm) napięcie przeskoku oraz średnie natężenie  $\frac{U_f}{d}$  są mniejsze niż w polu elektrycznym bardziej jednostajnym ( $d=3$ mm).

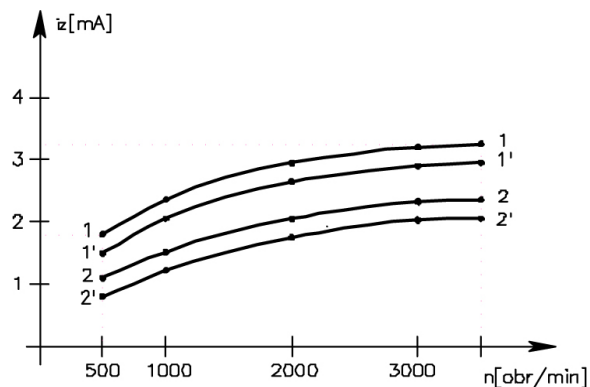
Dla określenia wpływu rozdzielacza zapłonu na prace świecy zapłonowej dokonano pomiarów dla świecy bez nagaru oraz świecy zbocznikowanej rezystancją  $R_b=0,5$  M $\Omega$ . Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 3.



**Rys. 3.** Zależność napięcia przeskoku od warunków pracy świecy zapłonowej, gdzie: 1-3 świeca czysta, 2-3 świeca z bocznikiem 0,5 M $\Omega$ .

Dla wywołania przeskoku podczas zbocznikowania świecy rezystancją  $R_b=0,5$  M $\Omega$  (nagar) konieczne jest wyższe napięcie (krzywa 2-3 na rys. 3.). Zwiększenie przerwy ogranicza prąd upływnościowy.

Na rys.4. przedstawiono zależność uśrednionego natężenia prądu wyładowania dla wybranych grubości elektrody palca rozdzielczego w funkcji prędkości obrotowej silnika.

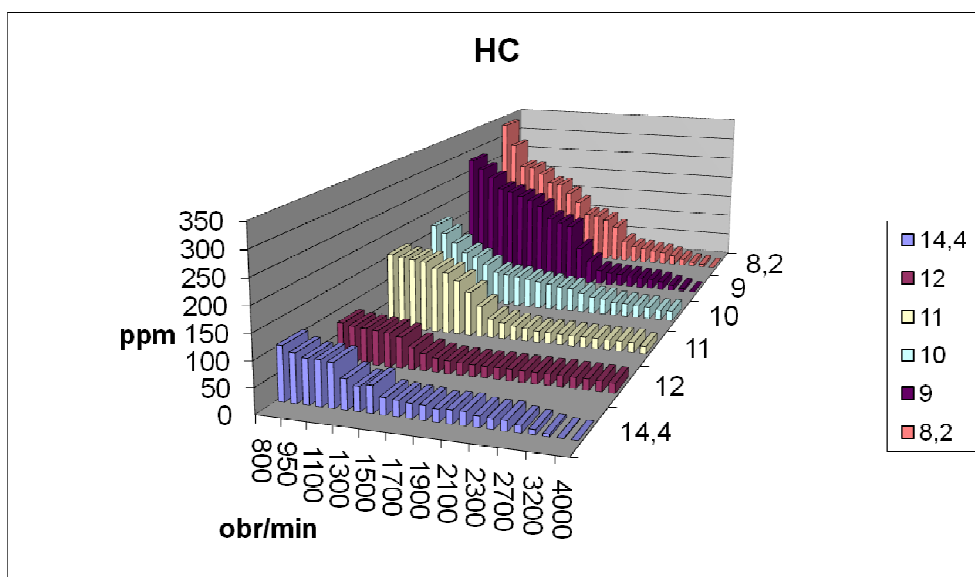


**Rys. 4.** Uśredniona wartość prądu wyładowania iskrowego w funkcji prędkości obrotowej rozdzielacza dla wybranych wielkości przerwy i grubości elektrody palca rozdzielczego, gdzie: 1-1 d=0,5mm, g=0,1mm, 1'-1' d=0,5mm, g=3,0mm, 2-2 d=3,0mm, g=0,1mm, 2'-2' d=3,0mm, g=3,0mm.

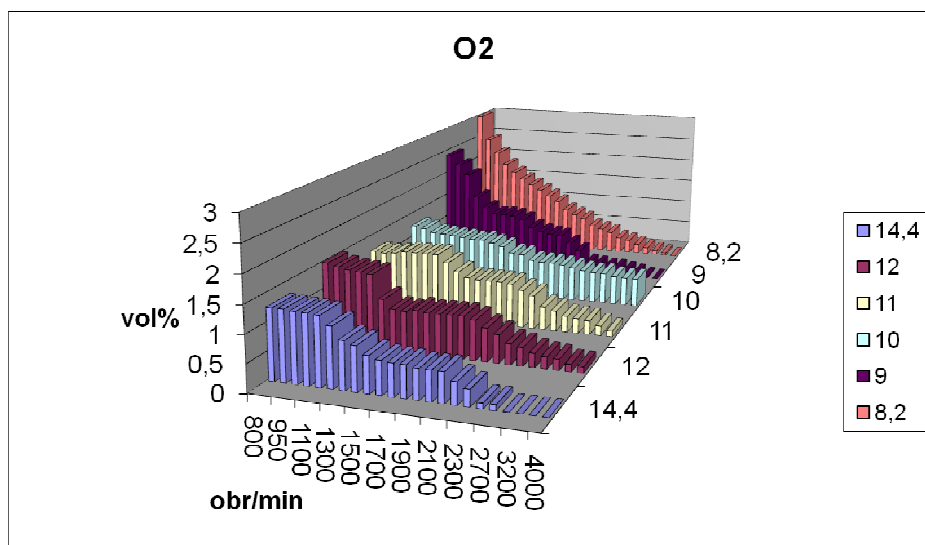
Wzrost średniego prądu wyładowania wynika z rosnącej częstotliwości wyładowania. W zakresie prędkości wałka rozdzielacza (2000÷3000) obr/min mimo rosnącej częstotliwości wyładowań, średnie natężenie prądu wyładowania nie zwiększa się, co jest wynikiem gwałtownie malejącej energii gromadzonej w obwodzie pierwotnym.

Jak wynika z przedstawionych wykresów zmniejszając grubość elektrody palca rozdzielczego uzyskujemy większe natężenie prądu wyładowania. Efektem tego jest większa energia wyładowania między elektrodami świecy zapłonowej. W układach o statycznym rozdziale wysokiego napięcia (układy bezrozdzielaczowe) istnieje większe ryzyko gromadzenia się produktów spalania na izolatorze świecy i możliwość „wypadania zapłonów”. W obwodach z dynamicznym rozdziałem wysokiego napięcia mimo korzyści z ograniczenia prądu upływnościowego i zwiększenia pewności wyładowań między elektrodami świecy, należy pamiętać, że strata energii na rozdzielaczu może wynosić do 20% energii zgromadzonej w cewce.

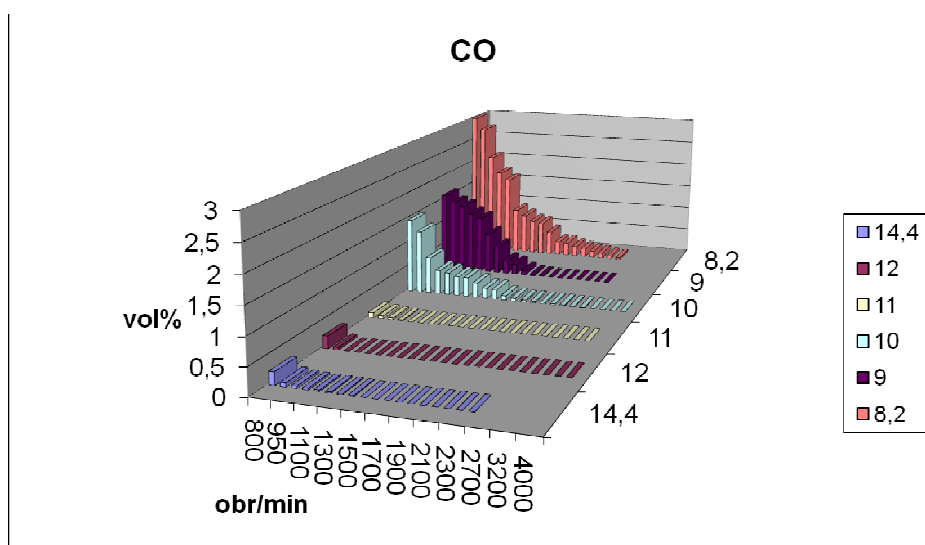
Badania zawartości składników toksycznych i nietoksycznych w spalinach dla różnych wartości napięcia zasilającego układ zapłonowy przeprowadzono na pojeździe samochodowym Peugeot 407 SW 1,6 przy różnych prędkościach obrotowych silnika. Wyniki badania zawartości wybranych związków w spalinach przedstawiono na rysunkach 5-7.



**Rys. 5.** Zawartość węglowodorów w spalinach funkcji napięcia oraz obrotów silnika.



Rys. 6. Zawartość tlenu w spalinach funkcji napięcia oraz obrotów silnika.



Rys. 7. Zawartość tlenku węgla w spalinach w funkcji napięcia oraz obrotów silnika.

Grupa węglowodorów HC obejmuje związki chemiczne o różnych właściwościach, które szkodliwie oddziałują na drogi oddechowe i układ krwionośny człowieka. Dla wartości energii wyładowania równej 24mJ przy napięciu zasilania 12V w pojeździe Peugeot zawartość węglowodorów wynosi 65[ppm]- jest to najmniejsza osiągnięta wartość dla biegu jałowego silnika. Wraz ze zmniejszeniem wartości napięcia zasilania czyli zmniejszając energię wyładowania iskrowego zawartość węglowodorów wzrasta do 330[ppm]. Wraz ze zwiększeniem prędkości obrotowej zawartość węglowodorów w spalinach spada. Obowiązujące przepisy stanowią, iż zawartość HC w spalinach nie powinna przekroczyć [100ppm].

Dla wartości energii wyładowania równej 24mJ przy napięciu zasilania 12V w pojeździe Peugeot zawartość CO 0,02[vol%] natomiast O<sub>2</sub> wynosi 1,5 [vol%] dla biegu jałowego silnika. Wraz ze zmniejszeniem wartości napięcia zasilania czyli zmniejszając energię wyładowania iskrowego zawartość CO i O<sub>2</sub> wzrasta ponad dopuszczalną normę. Wraz ze zwiększeniem prędkości obrotowej zawartość tych związków w spalinach spada.

Im mniejsza energia wyładowania iskrowego, tym zapłon mieszanki paliwowo powietrznej jest trudniejszy, a przede wszystkim wydłuża się coraz bardziej czas jej spalania.

## PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmniejszenie grubości elektrody palca rozdzielczego zmniejsza pojemność własną rozdzielacza. Zmiana tych parametrów powoduje:

- zmniejszenie wartości napięcia przeskoku;
- skrócenie czasu narastania wysokiego napięcia;
- zmniejszenie strat energii w cewce zapłonowej;
- zwiększenie wartości prądu wyładowania.

Zwiększenie przerwy między elektrodami rozdzielacza pozwala na poprawną pracę świecy zapłonowej mimo występującego „nagaru” na jej izolatorze. Ze względu na dodatkową stratę energii przerwa ta nie powinna być większa od 1,5mm.

## INFLUENCE OF THE IGNITION SYSTEM CONFIGURATION ON THE SPARK DISCHARGE EFFECTIVENESS AND TOXICITY OF THE EXHAUST FUMES

### *Abstract*

*The paper presents a brief description and battery ignition systems solutions working with internal combustion engines. The authors carried out research on the influence of structural parameters of distributing systems for the voltage jump, the intensity of the discharge current and correct operation of the spark plug. The paper also deals with the influence of the ignition distributor on the ignition system operation reliability and the toxicity combustion products.*

## BIBLIOGRAFIA

1. Gad S. *Metody diagnozowania samochodowych urządzeń elektrycznych* – Materiały sympozjum naukowego „Współczesne urządzenia elektromechatroniki pojazdów samochodowych”. Warszawa 2004, pp. 12÷14.
2. Granowskij W. L., *Elektriczeskij tok w gazie*, “Nauka”, Moskwa 1991.
3. Merkisz J. *Ekologiczne aspekty stosowania silników* Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
4. Yastrebov A. I., Gad S., Slon G., Zawadzki A., *Analysis of computer intelligent diagnostic models In automotive vehicle’s electrical equipment*. Proc. of the 15<sup>th</sup> international Conference on Systems Science, Systems ScienceXV. Wrocław 2004 pp. 373-375, Vol. III.

### *Autorzy:*

**dr hab. inż. Stanisław GAD, prof. PŚk** – Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

**mgr inż. Radosław GAD** – Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

**mgr inż. Agnieszka PAWLAK** – Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki