

Mirosław LUFT<sup>1</sup>  
Paweł OLSZOWIEC<sup>2</sup>

### **STRATY SILNIKA SPALINOWEGO SZANSĄ NA REKUPERACJĘ ENERGII ELEKTRYCZNEJ**

*Artykuł przedstawia analizę metod pozyskiwania energii elektrycznej ze strat pracy silnika spalinowego cieplnego. W materiale ponadto przedstawiono struktury zarządzania energią elektryczną na pokładzie współczesnego pojazdu samochodowego oraz zaproponowano koncepcję dyspozycji i nadzoru energii elektrycznej pochodzącej z turbogeneratora zlokalizowanego w układzie wydechowym silnika tłokowego.*

### **ENERGY LOSSES COMBUSTION ENGINE A CHANCE TO ENERGY RECUPERATION**

*This paper presents an analysis of methods of obtaining energy from the combustion engine operating loss of heat. The material also presents management structure of the electricity on board the modern motor vehicle, and proposed the concept of disposal and monitoring of electricity from the turbo-generator located in the piston engine exhaust system.*

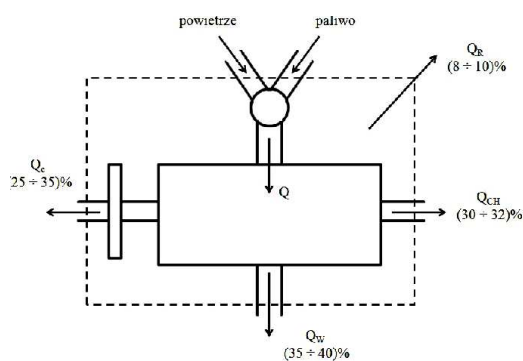
#### **1. WPROWADZENIE**

Na przestrzeni ostatnich lat zauważyć można, iż tempo rozwoju silników spalinowych oraz postępu w optymalizacji procesu spalania medium zasilającego jednostki tłokowej nie idzie w parze z dynamicznym wzrostem zapotrzebowania pojazdu na energię elektryczną. Mimo wprowadzenia do produkcji seryjnej wielu przełomowych dla motoryzacji rozwiązań takich jak zastosowanie wielosekwencyjnego bezpośredniego wtrysku paliwa zarówno dla silnika wysokoprężnego jak o zapłonie iskrowym czy też całej gamy proekologicznych rozwiązań ograniczających emisję substancji szkodliwych sprawność jednostki cieplnej nie uległa w ostatniej dekadzie znaczącej poprawie. Nowoczesna turbo doładowana jednostka wysokoprężna wykorzystująca wysokociśnieniowy układ wtryskowy popularnie zwany systemem Common Rail reprezentuje sprawność na poziomie 0,4 – 0,45 (rys.1). Na wynik ten składają się

<sup>1</sup> Kazimierz Pułaski Technical University of Radom, Faculty of Transport and Electrical Engineering, 26-600 Radom, Malczewskiego 29, POLAND, phone: 048 361 7010, e-mail: m.luft@pr.radom.pl

<sup>2</sup> Kazimierz Pułaski Technical University of Radom, Faculty of Transport and Electrical Engineering, 26-600 Radom, Malczewskiego 29, POLAND, phone:048 361 7736, e-mail: [p.olszowiec@pr.radom.pl](mailto:p.olszowiec@pr.radom.pl)

modernizacje będące efektem 20 lat ulepszania i poprawiania jednostki przez wszystkie liczące się na rynku motoryzacyjnym koncerny.



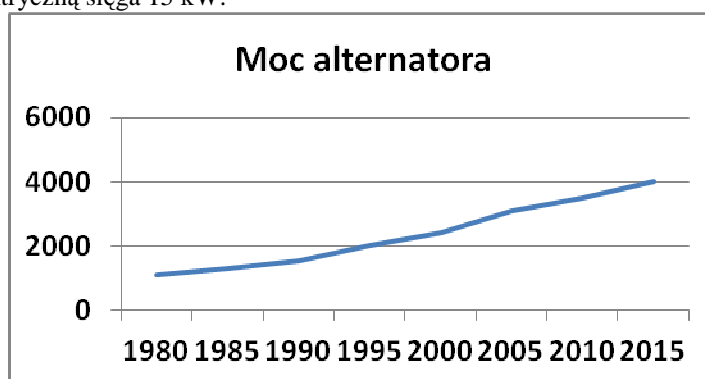
Rys.1 Wykres bilansu energetycznego silnika spalinowego [5]

Genezę wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną na pokładzie pojazdu samochodowego obserwujemy w ciągłym przyroście ilości urządzeń elektronicznych będących częścią składową nie tylko wyposażenia mającego na celu podnieść komfort eksploatacji pojazdu, lecz także instrumentów zapewniających bezpieczeństwo czynne i bierne samochodu (rys.2). W drodze do wzrostu poziomu ekologicznego współczesnych pojazdów wiele firm motoryzacyjnych powierzyło układy dotychczas mechaniczne systemom elektronicznym wpisując się w ideologię technologii By-Wire. Przykładem takich systemów jest popularnie stosowany układ Steer by – wire czy Breake by – wire. Są to systemy elektrycznego wspomagania układu kierowniczego oraz chociażby częściowego zastępowania połączenia hydraulicznego układu hamulcowego elektrycznymi silnikami krokowymi hamulca postojowego. Ponadto coraz częściej spotkać można pojazdy w których funkcjonują elektryczne pompy płynu chłodniczego, elektryczne układy klimatyzacji czy też elektroniczne termostaty czynnie regulujące temperaturę pracy silnika.

VW Passat					
Pojemność silnika	Moc silnika	Kod silnika	Rok produkcji	Prąd alternatora	Moc Alternatora
1.9D	64 KM	1Y	1989-1993	45 A	<b>630 W</b>
1.9 TDI	90 KM	1Z	1993-1996	70 A	<b>980W</b>
1.9 TDI	90 KM	AHU	1996-1997	120 A	<b>1680W</b>
1.9 TDI	101 KM	AVB	1997-2005	120 A	<b>1680W</b>
1.9 TDI	130 KM	AWX	2003-2005	150 A	<b>2100W</b>
2.0 TDI	170 KM	CBBB	2006 -	180 A	<b>2500W</b>

Rys. 2 Geneza wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną pojazdu [8]

Rozwiązania takie umożliwiają kontrole nad pracą oraz zarządzaniem powyższymi elementami. Jednakże wzrost ilości urządzeń zasilanych energią elektryczną przekłada się na moc źródła energii, co bezpośrednio przekłada się na stopień obciążenia jednostki cieplnej. Na rynku występują już pojazdy klasy Premium których zapotrzebowanie na energię elektryczną sięga 15 kW.



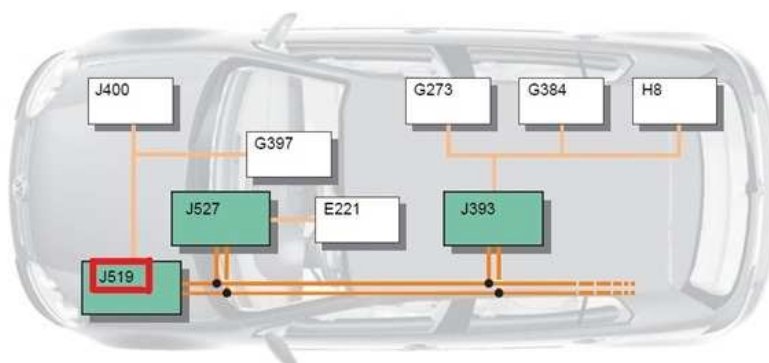
Rys.3 Przyrost mocy alternatora na przestrzeni 20 lat [4]

Przewiduje się, iż w najbliższej przyszłości samochody klasy średniej będą musiały być wyposażone w alternator o mocy około 4,5 kW (rys.3). Bezpośrednim następstwem tak

dużych mocy będzie przejście dla elementów permanentnych pojazdu na napięcie 42V w celu zmniejszenia przekroju przewodów oraz masy pojazdu.

## 2. ZARZĄDZANIE ENERGIĄ

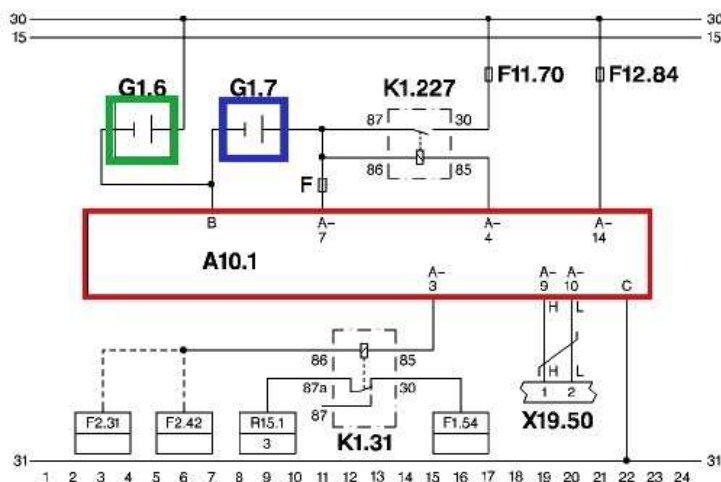
Nowoczesne pojazdy wymagają coraz bardziej niezawodnych i inteligentnych układów zasilania w energię elektryczną. Już dziś takie marki jak Mercedes – Benz czy grupa VW proponują do swoich pojazdów kontrolery zarządzania energią by racjonalnie i ekonomicznie dystrybuować wytworzoną przez alternator moc do poszczególnych odbiorników. Przykładem takiego sterownika jest kontroler J519 (rys.4) stosowany przez grupę VW od 2004 roku.



Rys.4 Lokalizacja sterownika J519 w pojazdach VW [7]

Urządzenie ściśle współpracuje z magistralą CAN oraz LIN przez co posiada uprawnienia do nadzoru nad akumulatorem czyli stanu jego naładowania oraz określenie jego ogólnego stanu technicznego. Sterownik koordynuje także prace alternatora poprzez zarządzanie obrotami silnika spalinowego oraz dopasowanie czasu zwiększenia obciążenia silnika przez alternator. Kontroler bierze także czynny udział w nadzorowaniu jakości energii elektrycznej poprzez kontrolę na regulatore napięcia eliminując w ten sposób skoki napięcia w instalacji elektrycznej. Ponadto sterownik ma uprawnienia do nadzoru nad funkcjonowaniem poszczególnych odbiorników, a więc wyłączeniem wszelkich zbędnych gałęzi układu po wyłączeniu zasilania oraz redukcję zakresu pracy odbiorników w czasie zasilania. Podobnie też funkcjonuje sterownik EBM ( Electronic Battery Management ) stosowany przez koncern Mercedes - Benz zarządzający układem elektrycznym w skład którego wchodzi dwa akumulatory. W opisywanym układzie druga bateria zastosowana jest przede wszystkim z powodów bezpieczeństwa. Zapewnia zasilanie układom mającym wpływ na bezpieczeństwo, do których należy elektrohydrauliczny układ hamulcowy SBC. W chwili gdy układ potrzebuje dodatkowej energii sumuje oba źródła by ustabilizować napięcie w instalacji elektrycznej. Kolejnym krokiem do stabilizacji układu zasilania jest przesyłanie przez układ EBM wykorzystując magistralę danych CAN typu B ( CAN komfort) informacji o redukcji obciążenia poprzez wyłączenie lub zmniejszenie poboru prądu przez poszczególne odbiorniki komfortu np. redukcje obrotów dmuchawy nawiewu.

System EBM posiada także komunikację z przekaźnikiem K1.31 umożliwiającym odłączenie odbiorników nie będących uzależnionych od magistrali danych takich jak np. gniazdo zapalniczki (rys.5).



Rys.5 Schemat układu EBM [8]

A10.1 – sterownik EBM, G1.6 – akumulator główny, G1.7 – akumulator pomocniczy

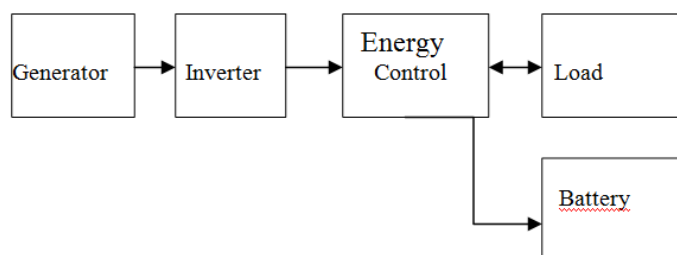
Systemy zarządzania energią w pojazdach samochodowych stają się na tyle istotnymi elementami współczesnego auta, że np. w pojeździe marki Audi A6 model C6 w którym zastosowano system EBM 3.1 testerem diagnostycznym prócz wartości rzeczywistych oraz pamięci błędów systemu odczytać można numer seryjny akumulatora, jego nominalne parametry oraz producenta.

### 3. METODY ODZYSKU ENERGII

**BMW TURBOSTEAMER** - To wysoce skomplikowany oraz kosztowny układ oparty na zasadzie działania silnika parowego wykorzystany do podniesienia sprawności klasycznej jednostki spalinowej. W skład systemu wchodzi trzy obiegi z cieczą, dwa wymienniki ciepła oraz element ekspansyjny. Konstruktorzy marki BMW zapewniają, iż powyższy system jest w stanie odzyskać 80% bezpowrotnie dotychczas traconej energii w układzie wylotowym. Wykorzystano w tym celu układ wypełniony wodą, który poprzez wymiennik ogrzewa ją do 550<sup>0</sup>C, a następnie z postaci parowej przetwarzana jest na energię mechaniczną przekazywaną na wał korbowy. Drugi obieg to układ niskotemperaturowy w którym medium jest etanol odbierający ciepło z układu chłodzenia oraz końca układu wylotowego silnika pracując na średniej temperaturze rzędu 150<sup>0</sup>C. Pozyskana w ten sposób energia zostaje na podobieństwo pierwszego układu przeniesiona na wał korbowy jednostki spalinowej

**TURBO-GENERATOR INTEGRATED GAS ENERGY RECOVERY** System to kolejna koncepcja rekuperacji energii z silnika spalinowego która powstała w 2005 roku

przy współpracy firmy Visteon UK oraz University of Sheffield. Ideą projektu jest uzyskanie energii elektrycznej przy wykorzystaniu jednej z największych strat silnika spalinowego czyli gazów spalinowych. Energia kinetyczna przepływających spalin w układzie spalinowym wykorzystywana jest do napędu turbo generatora zlokalizowanego w układzie wydechowym silnika spalinowego. Wysoko obrotowy generator ma za zadanie wspomóc pracę alternatora oraz poprawić bilans energetyczny układu zasilania (rys.6). Prawdłowo skonstruowany układ wylotowy pozwala na optymalne wykorzystanie energii spalin do napędu turbiny spalinowej.



Rys.6 Schemat układu rekuperacji TIGERS [11]

Według zapewnień konstruktorów turbogenerator współpracujący z silnikiem o zapłonie ZI o pojemności 2000 dm<sup>3</sup> jest w stanie wygenerować maksymalnie nawet 6kW. Pozwala to w dalszej perspektywie badań postawić tezę zastąpienia dotychczasowego źródła energii elektrycznej pojazdu na turbo generator. Firma Visteon przygotowała także propozycję budowy układu zasilania opartego na urządzeniu TIGERS dla napięcia 340V. Rozwiązanie takie mogło by znaleźć zastosowanie w pojazdach hybrydowych jako element poprawiający bilans energii elektrycznej współpracujący z urządzeniami rekuperującymi energię z siły kinetycznej. Problemami konstrukcyjnymi zastosowania turbo generatora w układzie wylotowym jest zagadnienie chłodzenia oraz smarowania elementu obrotowego.

TURBOCOMPOUND to układ zbudowany z turbiny i sprężarki. Przy niskich prędkościach obrotowych wału korbowego silnika ciśnienie gazów spalinowych nie jest na tyle wysokie, by pokonać opór zespołu turbosprężarki, co zdecydowanie pogarsza wymianę ładunków i zwiększa zużycie paliwa. Aby uniknąć tego niekorzystnego zjawiska, układ wylotowy uzbraja się w zawór, który w tych niekorzystnych warunkach nie kieruje spalin do turbiny, ale bezpośrednio do tłumików i do otoczenia. Przy wyższych prędkościach obrotowych silnika, wtedy gdy parametry spalin są odpowiednie, wszystko przebiega tradycyjnie tzn. spaliny są kierowane do turbiny. W układ wydechowy silnika za tradycyjną turbosprężarką wbudowana jest turbina, która poprzez przekładnię i sprzęgło hydrokinetyczne przekazuje moment obrotowy na wał korbowy. Przekazanie energii po przez sprzęgło jest konieczne w celu kompensacji różnicy prędkości obrotowych koła zamachowego i turbiny, która dochodzi do 55 tyś. obr/min. Zastosowanie powyższego układu przekłada się na relatywne korzyści które przedstawia porównanie dwóch jednostek ze stajni Scanii. Dwunastolitrowy, sześciocyndrowy silnik Scanii DT-12 wyposażony w Turbocompound ma moc 470 KM i moment obrotowy 2200 Nm, a jego parametry są zbliżone do 16-litrowego, 8-cylindrowego silnika. Dla porównania, bazowa wersja jednostki DT-12, DC-12 generuje 420 KM i 2000 Nm. Ewolucją projektu compound jest

urządzenie opatentowane przez firmę Caterpillar która opracowała prototypowy układ elektrycznego turbo wspomaganie nazywany ETC (Electric Turbocompound Caterpillar). W skład urządzenia wchodzi sprężarka, turbina oraz wysoko obrotowy generator prądu elektrycznego. Takie połączenie komponentów eliminuje mechaniczne połączenie z wałem korbowym silnika. Wykorzystanie generatora pozwala poprawić wydajność turbosprężarki w zakresie niskich prędkości obrotowych. W chwili gdy ciśnienie gazów spalinowych jest zbyt niskie generator pracuje jako silnik elektryczny napędzając sprężarkę. Sposób ten pozwala na wyeliminowanie efektu „turbo dziury”, a silnik rozwija moc w sposób bardziej płynny.

#### 4. TURBOGENERATOR

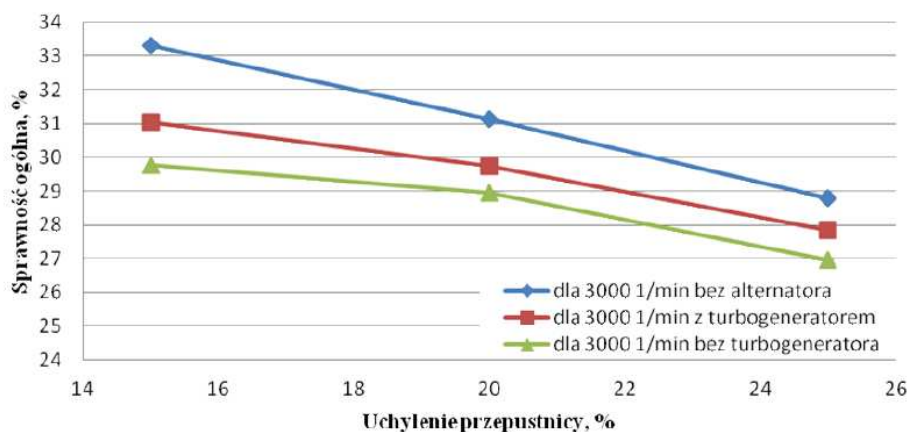
Znając źródło największych strat silnika spalinowego większość projektów związanych z rekuperacją energii oparta jest na wykorzystaniu układu wydechowego. Takim też założeniem kierował się dr inż. Sławomir Dziubański realizując eksperymentalny projekt aplikacji wysokoobrotowego turbogeneratora do układu wydechowego silnika spalinowego. Parametry znamionowe prądnicy wykorzystanej do projektu to moc 1kW, napięcie 187V trójfazowe zmienne oraz prędkość maksymalna to 100000 obr/min. Wartości jednostki spalinowej przedstawia rysunek nr.7.

Parametry techniczne silnika ZI

Nazwa	Parametr
Typ silnika	188A5000
Pojemność skokowa [cm <sup>3</sup> ]	1242
Moc maksymalna wg DIN [kW]	59
Prędkość obrotowa mocy maksymalnej [1/min]	5000
Maksymalny moment obrotowy wg DIN [Nm]	144
Prędkość obrotowa maksymalnego momentu [1/min]	4000

Rys.7 Parametry silnika tłokowego współpracującego z turbogeneratorem [4]

Według licznych badań przeprowadzonych na hamowni silnikowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej wynika, iż mimo niewielkiej pojemności silnika spalinowego jest on w stanie wygenerować wystarczające ciśnienie gazów wylotowych do napędu turbogeneratora. Analiza stanu zużycia paliwa, przebiegu momentu obrotowego silnika, mocy jednostki oraz ciśnienia indykowanego w zestawieniu silnika cieplnego z turbogeneratorem oraz bez niego jednoznacznie wskazuje, iż sprawność jednostki wzrasta (rys.8).



Rys.8 Sprawność ogólna silnika spalinowego pracującego w ustalonych warunkach 3000 obr./min [5]

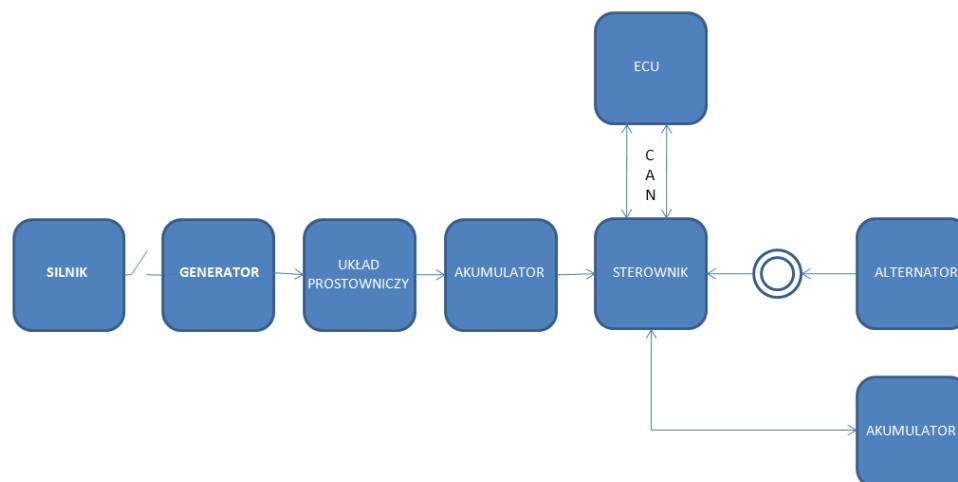
Uzyskane w czasie badań nad turbogeneratorem wyniki określające zakres energii elektrycznej możliwy do uzyskania w procesie rekuperacji wskazuje na możliwość poprawy w znacznym stopniu bilansu energii elektrycznej na pokładzie pojazdu (rys.9).

Prędkość obrotowa	Przepustnica	Moc	Napięcie
1500 obr./min	15%	150 W	150 V
2000 obr./min	15%	300 W	250 V
2500 obr./min	25%	400 W	300 V
3500 obr./min	50%	700 W	400 V

Rys.9 Parametry pracy turbogeneratora [5]

Dlatego też dla układu zasilania w energię elektryczną z wykorzystaniem turbogeneratora proponowane jest stworzenie systemu zarządzania i dyspozycji energii z obu źródeł w zależności od stopnia obciążenia jednostki, warunków eksploatacji, zapotrzebowania na energię oraz dbałości o normy ekologiczne. Sterownik miał by za zadanie poprzez komunikacje za pośrednictwem magistrali danych CAN wymieniać dane o obecnym stanie zapotrzebowania na energię,ysterować pracę jednego ze źródeł energii bądź też ich sumowanie oraz planowanie magazynowania odpowiedniego poziomu energii w zależności od wielkości baterii. Zarządzanie źródłami odbywało by się poprzez zawór by-pass dla turbogeneratora oraz wyłącznik prądu wzbudzenia dla alternatora. Dla układu proponowany jest także drugi mały akumulator pomocniczy mający za zadanie odbiór energii od turbogeneratora pełniący zarazem funkcje bezpieczeństwa w stanach deficytu energii (rys.10).





Rys.10 Schemat blokowy koncepcji układu zarządzania energią

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza stanu zawansowania prac nad systemami podnoszącymi sprawność jednostek cieplnych wskazuje na słusność prowadzenia badań oraz prac w kierunku rekuperacji energii elektrycznej. Ze względów konstrukcyjnych oraz ekonomicznych celowym wydaje się także ukierunkowanie badań na rozwój projektu wysokoobrotowego turbogeneratora wykorzystującego kinetyczną energię przepływu spalin.

## 6. LITERATURA

- [1] Kozaczewski W.: Konstrukcja grupy tłokowo cylindrowej silników spalinowych. WKiŁ 2010,
- [2] Kowalewicz A.: Doładowanie samochodowych silników spalinowych, Politechnika Radomska 1998,
- [3] Postrzednik S., Żmudka Z.: Termodynamiczne oraz ekologiczne uwarunkowania eksploatacji tłokowych silników spalinowych, Gliwice 2007,
- [4] Dziubański S., Jantos J., Mamala J.: Wykorzystanie energii spalin do napędu turbogeneratora w silniku ZI, Czasopismo Techniczne Politechnika Krakowska 2008,
- [5] Dziubański S.: Poprawa bilansu energetycznego w silniku spalinowym przez zastosowanie turbogeneratora, Politechnika Opolska 2011
- [6] Teodorczyk A., Rychter T.: Teoria silników tłokowych, WKiŁ 2006
- [7] Pochopień J.: Kwartalnik Autospec Bosch, Warszawa 2/2008
- [8] Platforma informacyjna ESItronic firmy Bosch aktualizacja 2/2011
- [9] [www.scania.pl](http://www.scania.pl)
- [10] [www.bmw.pl](http://www.bmw.pl)
- [11] [www.visteon.com](http://www.visteon.com)