

Rafał Setlak, Politechnika Śląska, Gliwice  
Przemysław Kuś  
Badawczy Ośrodek Samochodów Małolitrażowych BOSMAL, Bielsko-Biała

## REGULACJA TEMPERATURY CIECZY CHŁODZĄCEJ W UKŁADZIE NAPĘDOWYM MILD HYBRID

### TEMPERATURE REGULATION OF COOLING WATER IN MILD HYBRID DRIVE SYSTEM

**Abstract:** Article describes project of automatic, preheating engine block system, which enable shortening of duration of fuel injection after starting combustion engine. It will cause reduction of air pollution during catalyst heating-up phase. The automatic, preheating engine block system should have electric regulation of cooling water temperature, which is realized by electric cooling water pump. Independent control of pump speed and application extra heating-up of cooling water makes possible heating cooling water when engine is turn off and control engines temperature during engine running (admission of increase temperature to 110°C).

#### 1. Wstęp

Głównym źródłem obciążeń cieplnych silników iskrowych jest czynnik doprowadzany do cylindra. Im więcej czynnika zostanie doprowadzonego do cylindra, tym więcej w wyniku spalania uzyska się z niego ciepła. Działanie grupy tłokowo-cylindrowej silnika spalinowego opiera się na tarcu grupy kinematycznej tłoka i pierścieni po ścianie cylindra. Wpływa ono na zmniejszenie osiągnięć silnika ze względu na obniżenie jego sprawności mechanicznej, co wpływa również na wytrzymałość silnika. Jeżeli zdoła się zachować tarcie płynne przez 99,99% czasu pracy to zużycie elementów można pominąć. W przypadku gdy warunki płynnego tarcia zachodzą przez 99% czasu pracy to zużycie elementów jest duże, a dłuższy bezolejowy kontakt pierścienia i gładzi cylindra skutkuje pękaniem pierścienia i zatarciem tłoka. Dlatego też istotne jest uzyskanie wysokiej trwałości współpracujących elementów, bowiem temperatura w miejscu występowania tarcia jest limitowana termiczną wytrzymałością filmu olejowego. Za temperaturę graniczną oleju silnikowego uważa się temperaturę tłoka mierzoną na dnie kanałka pierwszego pierścienia tłoka na poziomie 210°C [6]. Powyżej tej temperatury następuje zmniejszenie lepkości oleju oraz zwiększenie skłonności do unieruchomienia pierścienia.

Zapewnienie możliwie najlepszych warunków pracy silnika oraz maksymalne wykorzystanie zawartej w paliwie energii wymaga chłodzenia silnika. Układy chłodzenia pozwalają na uzyskanie możliwie dużej sprawności obiegu

cieplnego, równocześnie zachowując trwałość elementów mechanicznych. Układ chłodzenia służy osiągnięciu kompromisu między temperaturą silnika (im wyższa, tym większa jest sprawność obiegu cieplnego), a parametrami wytrzymałościowymi części mechanicznych oraz warunkami smarowania. Podnoszenie temperatury ma wpływ na spadek współczynnika napełniania cylindrów, a także ogranicza dopuszczalny stopień sprężania, który powinien być jak największy ze względu na zachowanie określonej sprawności obiegu termodynamicznego.

Podczas pracy silnika odprowadzane jest z niego 25-30% ciepła dostarczanego pod postacią paliwa. Istotnym czynnikiem wpływającym na pracę silnika jest intensywność chłodzenia. Czynnik ten wpływa znacząco na warunki w jakich odbywa się przekazywanie ciepła pomiędzy rozgrzаныmi ściankami cylindra, a czynnikiem chłodzącym. Intensywność chłodzenia ma także wpływ na proces napełnienia.

W większości obecnych układów chłodzenia temperatura wody lub cieczy chłodzącej zmierzona u wylotu z silnika oscyluje w granicach 80-90°C. Nie dopuszcza się do wrzenia czynnika w układzie chłodzącym ze względu na rosnące ciśnienie powstałej pary wodnej. Gwałtowna przemiana fazowa z fazy ciekłej w fazę gazową jest zjawiskiem niepożądanym.

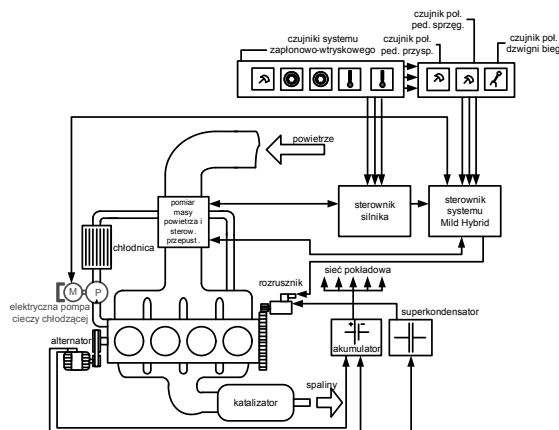
#### 2. Układ napędowy Mild Hybrid

W silnikach spalinowych pracujących przy małych i średnich obciążeniach, w celu ograni-

czenia zużycia paliwa można podnieść temperaturę płynu chłodzącego do wartości ok. 110°C (temperatury większej o ok. 15÷20°C od temperatury uważanej za odpowiednią w układzie chłodzenia). Aby uniknąć uszkodzeń elementów silnika pracującego przy dużych obciążeniach oraz, aby silnik osiągał maksymalny moment obrotowy i moc dla chwilowych wartości prędkości obrotowej istnieje potrzeba szybkiego obniżenia temperatury płynu chłodzącego o 5÷10°C poniżej temperatury pracy układu chłodzenia 90÷95°C. Powiązanie wartości temperatury cieczy chłodzącej z aktualnym obciążeniem silnika jest możliwe obecnie dzięki zastosowaniu w samochodach luksusowych termostatów z regulacją programową. Inną możliwością jest zastosowanie pomp cieczy chłodzącej o regulowanej niezależnie prędkości.

Zaprojektowany w Zakładzie Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie Politechniki Śląskiej układ napędowy Mild Hybrid (rys. 1) wyposażony jest m.in. w autonomiczne ogrzewanie cieczy chłodzącej silnik i oleju smarującego oraz autonomiczną elektryczną pompę cieczy chłodzącej.

W samochodach (nawet o napędzie hybrydowym) w fazie nagrzewania silnika spalinowego stosuje się wydłużenie czasu wtrysku paliwa do tej samej części masy powietrza sterowanej kątem położenia przepustnicy. Taki proces jest niezbędny dla odparowania paliwa podczas napełniania cylindrów. Skrócenie czasu pracy zimnego silnika z wzbogacaniem mieszanki spowoduje zmniejszenie w cyklu jezdnym NEDC zużycia paliwa i emisji CO<sub>2</sub>.



Rys. 1. Schemat blokowy ekologicznego układu Mild Hybrid z zaznaczoną nową, elektryczną pompą cieczy chłodzącej

Obecnie w samochodach stosowane pompy cieczy chłodzącej napędzane są mechanicznie od silnika spalinowego i nie posiadają możliwości sterowania ich prędkością. Zastosowana w projekcie pompa pozwala na automatyczne (np. kilka minut przed uruchomieniem silnika), wstępne podgrzanie silnika. Źródłem energii do rozruchu silnika i podgrzewania cieczy jest podwójny zasobnik -akumulator VRLA i superkondensator. Zadaniem akumulatora VRLA jest jedynie magazynowanie energii dla podgrzewania cieczy chłodzącej, a superkondensator pełni funkcję magazynu energii do przeprowadzenia rozruchu silnika spalinowego.

### 3. Cel badań

Celem badań było zaprojektowanie układu automatycznego, wstępnego podgrzewania bloku silnika, który będzie umożliwił w napędzie Mild Hybrid skrócenie czasu wtrysku paliwa po rozruchu silnika spalinowego, a co za tym idzie spowoduje zmniejszenie emisji zanieczyszczeń w fazie nagrzewania katalizatora. Układ wstępnego podgrzewania wyposażony został w autonomiczną elektryczną regulację temperatury cieczy chłodzącej. Niezależne sterowanie prędkością pompy oraz zastosowanie dodatkowego podgrzewania cieczy umożliwia nagrzewanie czynnika chłodzącego przy wyłączonym silniku spalinowym oraz regulację temperatury silnika w czasie jego pracy (dopuszczenie do zwiększenia temperatury do 110°C).

Analiza możliwości zastosowania elektrycznej pompy cieczy chłodzącej w układzie chłodzenia systemu Mild Hybrid została przeprowadzona dla silnika spalinowego 178 B5.000 Fiata Palio Weekend.

### 4. Elektryczna pompa cieczy chłodzącej silnika 178 B5.000

Ruch czynnika chłodzącego dzięki zastosowaniu pompy cieczy chłodzącej powinien zachodzić w odpowiednio dobranych warunkach, co wiąże się ze spełnieniem wymagań :

- prędkość przepływu czynnika chłodzącego powinna być dostosowana do pracy chłodnicy,
- natężenie przepływu czynnika chłodzącego powinno być dostosowane do chwilowych warunków bilansu energetycznego silnika,
- strumień czynnika chłodzącego w silniku powinien w równym stopniu docierać do każdego miejsca w silniku, a w szczególności

do miejsc najcieplejszych, czyli do elementów grupy tłokowo-cylindrowej.

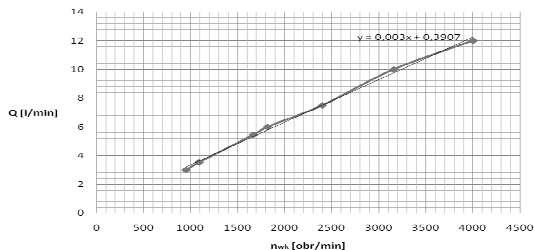
Na rysunku 3 przedstawiono pompę cieczy chłodzącej silnika 178 B5.



Rys. 2. Tradycyjna pompa cieczy chłodzącej wymontowana z silnika 178 B5.000

Żeliwny kadłub pompy cieczy badanego silnika 178 B5.000 jest kadłubem częściowym, posiada część napędową wraz z wirnikiem i współdziela z przestrzenią wodną uformowaną w silniku. Wirnik jest typu otwartego, posiada piastę oraz łukowe łopatki jednostronne usytuowane na tarczy.

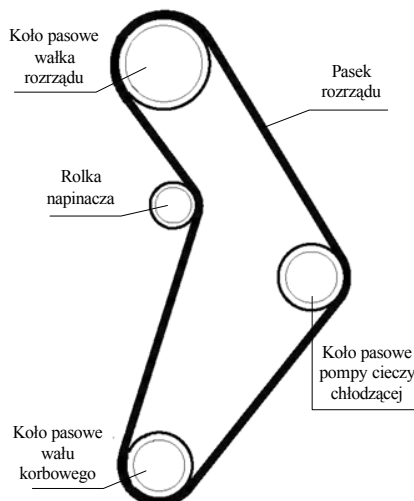
W celu wyznaczenia rzeczywistej wartości natężenia czynnika chłodzącego przeprowadzono pomiary przepływu cieczy w układach chłodzenia silnika 178 B5.000 z wykorzystaniem przepływomierza turbinowego z przetwornikiem Halla typu Vision 2008 4F 22 BADGER METER. Następnie stworzono charakterystykę natężenia przepływu w funkcji czasu. Przepływomierz został zainstalowany w przewodzie obiegu „krótkiego”. Wykreślona na podstawie danych charakterystyka (rys. 3) pozwoliła określić m.in. przepływ przy nominalnej mocy silnika.



Rys. 3. Rzeczywiste natężenie przepływu cieczy chłodzącej dla silnika 178 B5.000.

Ponadto dla badanego silnika wyznaczono analitycznie współczynnik strat przekroju dla powierzchni wlotowej pompy cieczy chłodzącej, współczynnik strat przekroju dla powierzchni wylotowej pompy cieczy chłodzącej, wydatek objętościowy pompy cieczy chłodzącej, jednostkowe zapotrzebowanie chłodziwa, rzeczywistą wysokość podnoszenia pompy, prędkość właściwą pompy cieczy chłodzącej dla mocy maksymalnej, pobór mocy przez pompę cieczy chłodzącej.

W układzie chłodzenia badanego silnika tradycyjna pompa cieczy chłodzącej została usunięta z obiegu poprzez odcięcie wirnika pompy. Takie rozwiązanie przyjęto ze względu na brak możliwości zastosowania krótszego paska rozrządu (rys. 4). Pompa z usuniętym wirnikiem pełni rolę jedynie rolki prowadzącej pasek rozrządu.



Rys. 4. Schemat napędzania rolki prowadzącej paska rozrządu silnika 178 B5.000 pozostałej po tradycyjnej pompie cieczy chłodzącej

Uwzględniając kryteria:

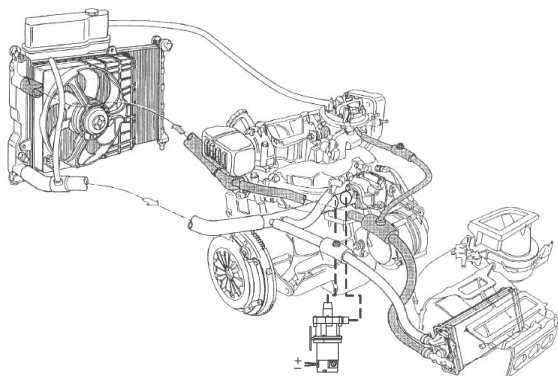
- maksymalna temperatura cieczy wynosi  $110^{\circ}\text{C}$ ,
- maksymalne ciśnienie w układzie chłodzenia wynosi 0,98 bar,
- natężenie przepływu chłodziwa w układzie chłodzenia przy nominalnej pracy silnika spalinowego 178 B5.000 wyznaczone na podstawie pomiarów wynosi 18,4 l/min,
- silnik elektryczny pompy powinien być silnikiem prądu stałego

dobrano elektryczną pompę cieczy chłodzącej typu 809 PL-HS-C MARCH PUMPS (rys.5).



Rys. 5. Elektryczna pompa wodna typu 809 PL-HS-C firmy March Pumps

Elektryczna pompa będzie zainstalowana w obiegu „małym”, blisko wlotu do płaszcza wodnego silnika (rys.6).



Rys. 6. Miejsce montażu elektrycznej pompy 809 PL-HS-C w układzie chłodzenia silnika 178 B2.000

W celu regulacji prędkości obrotowej silnika pompy w zakresie 3650±0 obr/min. wybrano metodę zmiany napięcia zasilania. Zatrzymanie elektrycznej pompy spowoduje szybsze nagrzewanie się czynnika chłodzącego.

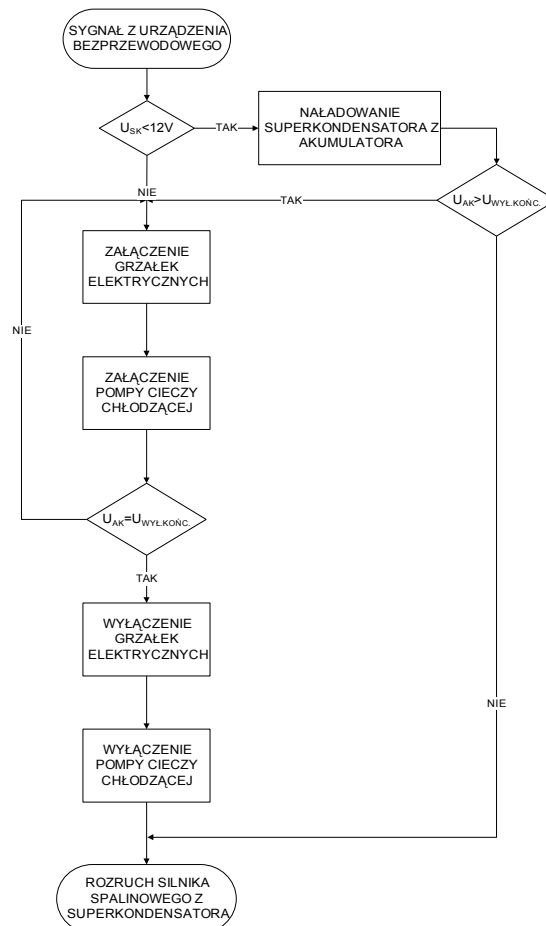
## 5. Algorytm sterowania prędkością obrotową elektrycznej pompy cieczy chłodzącej

Prawidłowa regulacja prędkości obrotowej pompy cieczy chłodzącej wpływa bezpośrednio na własności termiczne silnika spalinowego oraz na ilość zużytego przez silnik paliwa. Z tego powodu istotne było stworzenie algorytmu działania elektrycznej pompy cieczy chłodzącej. Aby odpowiednio sterować temperaturą silnika w pierwszej kolejności wyznaczono warunki pracy układu wstępnego podgrzewania silnika oraz elektrycznej pompy cieczy chłodzącej:

- dla obniżenia emisji spalin w fazie rozgrzewania silnika spalinowego przy braku regulacji lambda  $\lambda$  w pętli sprzężenia zwrotnego, wprowadzona zostanie dodatkowa strategia uruchamiania silnika spalinowego. Faza ta będzie inicjowana np. sygnałem opuszczenia domu przez kierowcę, nastąpi wtedy przepływ porcji energii z akumulatora do superkondensatora rozruchowego. Superkondensator będzie w tym układzie pełnił funkcję magazynu energii do rozruchu silnika spalinowego. Pozostała część energii akumulatora zostaje przemieniona w ciepło podgrzewania wstępnego cieczy chłodzącej. Elektryczna pompa cieczy chłodzącej będzie

wtedy włączona i umożliwi rozprowadzenie ciepła z układu podgrzewacza do bloku nieruchomego silnika spalinowego. Tryb podgrzewania wstępnego kończy się z chwilą osiągnięcia napięcia końcowego wyładowania dla danego prądu zasilania pompy lub uruchomienia silnika przez kierowcę,

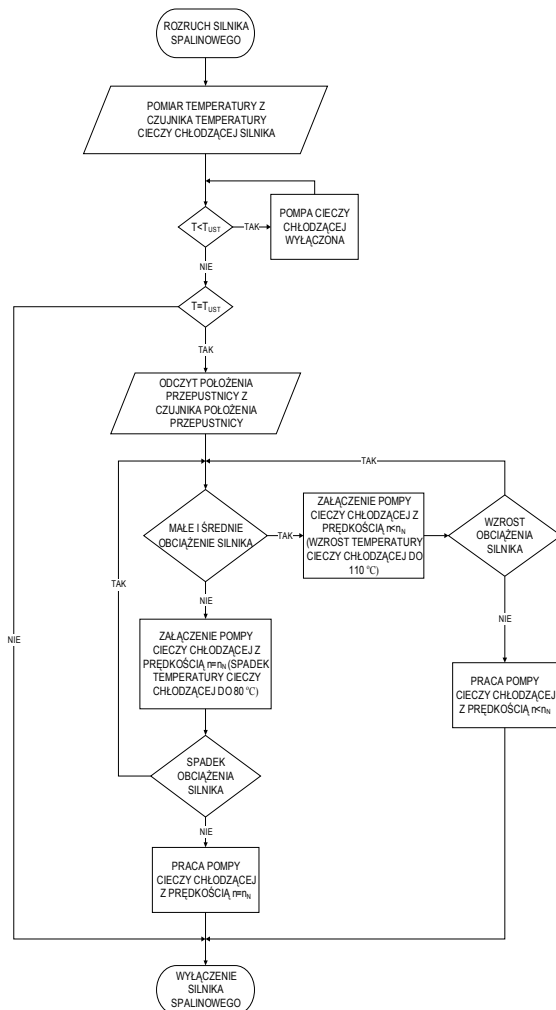
- podczas pracy silnika w fazie nagrzewania elektryczna pompa cieczy jest wyłączona, co spowoduje szybsze nagrzewanie się oraz szybsze osiągnięcie określonego progu temperatury pracy silnika spalinowego. Po osiągnięciu temperatury ustalonej następuje włączenie pompy i regulacja temperatury cieczy na zadanym poziomie,
- podczas pracy silnika spalinowego w zakresie małych i średnich obciążeń, prędkość obrotowa pompy jest regulowana tak, aby temperatura cieczy utrzymywała się na poziomie 110°C (temperatura ta jest o ok. 15°C większa od temperatury pracy silnika spalinowego z tradycyjną pompą cieczy chłodzącej),



Rys. 7. Algorytm sterowania układem wstępnego podgrzewania silnika spalinowego

- podczas pracy przy dużym obciążeniu następuje zwiększenie prędkości elektrycznej pompy cieczy chłodzącej do wartości znamionowej, co umożliwia obniżenie temperatury do wartości  $80^{\circ}\text{C}$  zapewniającej odprowadzenie ciepła i zagwarantuje zapas chłodzenia silnika spalinowego pracującego w obszarze mocy submaksymalnej.

Na rysunku 7 pokazano przykładowy algorytm sterowania układem wstępnego podgrzewania cieczy chłodzącej silnika spalinowego, a na rysunku 8 przykładowy algorytm sterowania prędkością obrotową elektrycznej pompy cieczy chłodzącej silnika 178 B5.000 w zależności od temperatury cieczy chłodzącej i położenia przepustnicy. Działanie układu w formie algorytmu zaprezentowano w przypadku wstępnego nagrzewania na rysunku 7 oraz po podjęciu pracy silnika spalinowego na rysunku 8.



Rys. 8. Algorytm sterowania elektrycznymi pompami cieczy chłodzącej silników 175 B5.000 oraz G16B

## 6. Podsumowanie

Celem pracy było stworzenie elektrycznego układu pompy cieczy chłodzącej dla systemu Mild Hybrid. Zadaniem sterowanej elektrycznie pompy cieczy chłodzącej będzie regulacja natężenia przepływu czynnika chłodzącego w układzie chłodzenia badanych silników. Podgrzewanie wstępne silnika poprzez umieszczenie dodatkowych elementów grzewczych w układzie chłodzenia, może zachodzić przy wyłączonej pompie cieczy chłodzącej, a po osiągnięciu zadanej wartości temperatury pompa może zostać załączona. Takie wstępne nagrzewanie cieczy chłodzącej będzie zachodziło przy zatrzymanym silniku spalinowym, a energia będzie wtedy pobierana z akumulatora VRLA. Energia niezbędna dla ponownego rozruchu silnika spalinowego będzie pobierana z modułu superkondensatora, a nie akumulatora kwasowo-ołowiowego. Procedura nagrzewania będzie przebiegać następująco:

- naładowanie zasobnika energii superkondensatora z akumulatora typu VRLA,
- załączenie układu grzałek cieczy chłodzącej i wyładowanie akumulatora do wartości napięcia końcowego wyładowania, dla danego prądu wyładowania,
- osiągnięcie zadanej temperatury i załączenie elektrycznej pompy cieczy chłodzącej,
- załączenie silnika spalinowego, który będzie emitował w fazie dogrzewania mniej zanieczyszczeń i zużywał mniej paliwa w porównaniu z silnikiem nagrzewającym się od temperatury otoczenia.

Regulacja przepływu czynnika chłodzącego w stanie ustalonej temperatury pracy silnika pozwoli na uzyskanie podobnego efektu jak w przypadku zastosowania nowoczesnych termostatów z regulacją programową. Zmniejszenie natężenia przepływu spowoduje podwyższenie temperatury pracy ustalonej w zakresie małych oraz średnich obciążeń silnika czego wynikiem będzie zmniejszone zużycie paliwa. Aby uniknąć przegrzania silnika, przy dużych obciążeniach sterownik zwiększy prędkość obrotową pompy co zwiększy odbiór energii przez czynnik chłodzący. Zwiększając temperaturę silnika pracującego przy małych i średnich obciążeniach o każde  $10^{\circ}\text{C}$  można obniżyć zużycie paliwa o 1%. Teoretycznie można zwiększyć temperaturę ustaloną pracy silnika z  $90^{\circ}\text{C}$  do  $140^{\circ}\text{C}$ , co skutkowałoby zmniejszeniem zużycia paliwa o 5%. Wzrost temperatury czyn-

nika chłodzącego powoduje jednak wzrost temperatury powietrza dostarczanego do komory spalania, co powoduje spadek masy powietrza obniżając tym samym wartość mocy oraz momentu obrotowego silnika. Przyrost temperatury powietrza zwiększa także prawdopodobieństwo wystąpienia spalania stukowego, co powoduje zmniejszenie kąta wyprzedzenia zapłonu przez układ regulacji. Konsekwencją zmniejszenia wartości kąta wyprzedzenia zapłonu jest zwiększenie zużycia paliwa i obniżenie mocy oraz momentu obrotowego silnika. Podwyższenie temperatury cieczy chłodzącej do bezpiecznej dla silnika wartości 110°C można obecnie uzyskać stosując termostaty z regulacją programową lub stosując proponowane elektryczne pompy cieczy chłodzącej.

### Literatura

- [1]. Biuletyn Europejskiego Prawa Ochrony Środowiska nr 16 z dnia 26.02.2007 r.
- [2] Komunikat Komisji do Rady i Parlamentu Europejskiego z dnia 07.02.2007 r. zawierający wyniki przeglądu wspólnotowej strategii na rzecz zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> pochodzących z samochodów osobowych i lekkich pojazdów dostawczych.
- [3]. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego i Rady: Ramy prawne podstawą dla zwiększenia konkurencyjności przemysłu motoryzacyjnego w XXI w. Stanowisko Komisji w sprawie sprawozdania końcowego grupy wysokiego szczebla CARS 21.
- [4]. Kozaczewski W.: *Konstrukcja grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych*. Wydaw. Komunikacji i Łączności 2004
- [5]. Ogrodzki A.: *Chłodzenie trakcyjnych silników spalinowych*. Wydaw. Komunikacji i Łączności 1974.
- [6]. Ogrodzki A.: *Technika ciepła w pojazdach*. Wydaw. Komunikacji i Łączności 1982
- [7]. Rozporządzenie Parlament Europejskiego i Rady z dnia 19.12.2007 r. określające normy emisji dla nowych samochodów osobowych w ramach zintegrowanego podejścia Wspólnoty na rzecz obniżenia poziomów emisji CO<sub>2</sub> pochodzących z samochodów dostawczych.
- [8]. Wajand A.J., Wajand T.J.: *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe*. Wydaw. Naukowo techniczne Warszawa 1993, 2005.
- [9]. Zębiewicz J.: *Fiat Albea, Siena i Palio Weekend*. Wydaw. Komunikacji i Łączności 2002.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2011 jako projekt badawczy*

### Autorzy

Autorzy artykułu zostali nagrodzeni Nagrodą Koncernu FIAT za najlepszą pracę pt: *Analiza przydatności stosowania elektrycznych pomp cieczy w układach chłodzenia silników spalinowych* realizowaną z tematyki techniki samochodowej w roku 2009.