

Regulacja temperatury cieczy chłodzącej w układzie napędowym Mild Hybrid

Rafał Setlak, Marcin Fice, Przemysław Kuś


Głównym źródłem obciążeń cieplnych silników iskrowych jest czynnik doprowadzany do cylindra. Im więcej czynnika zostanie doprowadzone do cylindra, tym więcej w wyniku spalania uzyska się z niego ciepła. Działanie grupy tłokowo-cylindrowej silnika spalinowego opiera się na tarcie 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 prawdopodobieństwa 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.

W większości obecnych układów chłodzenia temperatura 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.

Układ napędowy Mild Hybrid

W silnikach spalinowych pracujących przy małych i średnich obciążeniach w celu ograniczenia zużycia paliwa można podnieść temperaturę płynu chłodzącego do wartości ok. 110°C. 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

 **Abstract:** Article describes project of automatic, preheating engine block system, which enable shortening 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.

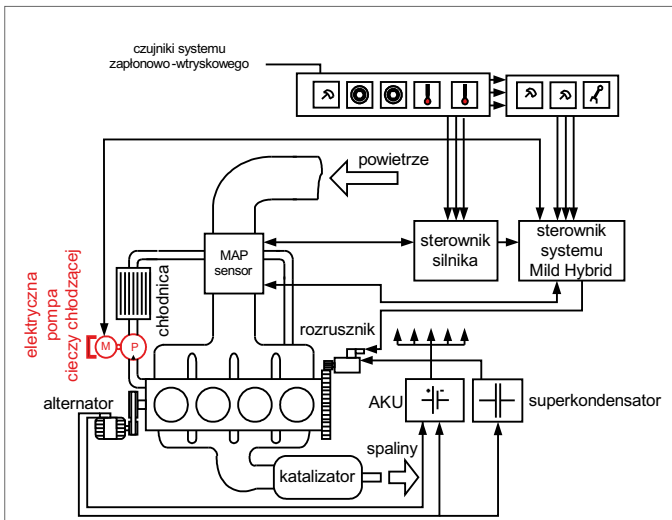
Streszczenie: W artykule opisano projekt automatycznego systemu podgrzewania bloku silnika, który umożliwi skrócenie czasu wtrysku paliwa zaraz po uruchomieniu silnika spalinowego. Skutkuje to zmniejszeniem zanieczyszczenia powietrza podczas fazy nagrzewania. Automatyczny system podgrzewania bloku silnika powinien być wyposażony w elektroniczną regulację temperatury cieczy chłodzącej, która jest realizowana przez zastosowanie elektrycznej pompy cieczy.

chłodzącego o 5–10°C poniżej temperatury pracy układu chłodzenia 90–95°C. Powiązanie wartości temperatur cieczy chłodzącej z aktualnym obciążeniem silnika jest obecnie możliwe dzięki zastosowaniu pompy cieczy chłodzącej o regulowanej niezależnie prędkości obrotowej.

Zaprojektowany w Zakładzie Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Eklektycznej w Transporcie Politechniki Śląskiej układ napędowy Mild Hybrid (rys. 1) wyposażony jest m.in. w autonomiczne ogrzewanie cieczy chłodzącej silnik i oleju smarującego oraz 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 do odparowania paliwa podczas napełniania cylindrów. Skrócenie czasu pracy zimnego silnika z wzbogacaniem mieszanki spowoduje zmniejszenie w cyklu jezdnym NEDC zużycia paliwa i emisji CO₂.

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 energii elektrycznej – akumulator VRLA AGM i superkondensator. Zadaniem akumulatora VRLA AGM jest jedynie magazynowanie energii do podgrzewania cieczy chłodzącej, a superkondensator pełni funkcję magazynu energii do przeprowadzenia rozruchu silnika spalinowego.



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



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

Cel badań

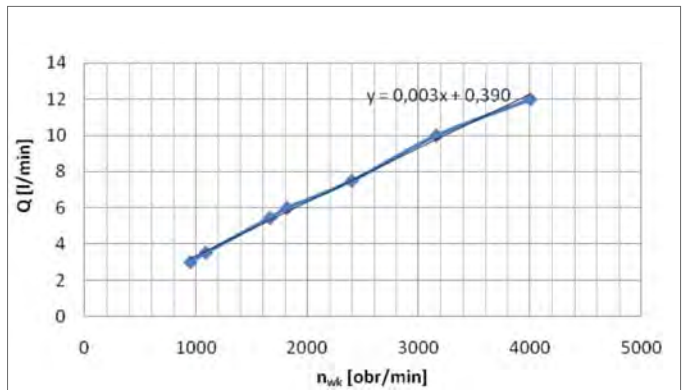
Celem badań było zaprojektowanie układu automatycznego, wstępnego podgrzewania bloku silnika, który będzie umożliwiał w napędzie Mild Hybrid skrócenie czasu wtrysku paliwa po rozruchu silnika spalinowego, a co za tym idzie – spowoduje zmniejszenie emisji zanieczyszczeń w fazie nagrzewania katalizatora. Układ wstępnego podgrzewania wyposażony został w autonomiczną elektryczną regulację temperatury cieczi chłodzącej. Niezależne sterowanie prędkością pompy oraz zastosowanie dodatkowego podgrzewania cieczi umożliwi 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 cieczi chłodzącej w układzie chłodzenia systemu Mild Hybrid została przeprowadzona dla silnika spalinowego 178 B5.000 Fiata Palio Weekend.

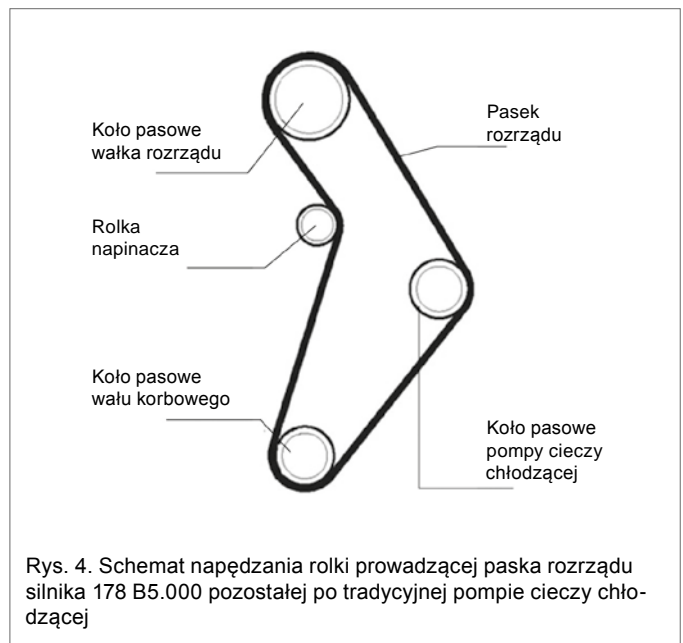
Elektryczna pompa cieczi chłodzącej silnika 178 B5.000

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

- prędkość przepływu czynnika chłodzącego powinna być dostosowana do parametrów termodynamicznych chłodnicy;
- natężenie przepływu czynnika chłodzącego powinno być dostosowane do chwilowych warunków bilansu energetycznego silnika;



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



Rys. 4. Schemat napędzania rolki prowadzącej paskę rozrządu silnika 178 B5.000 pozostającej po tradycyjnej pompie cieczi chłodzącej

- 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 rys. 2 przedstawiono mechaniczną pompę cieczi chłodzącej silnika 178 B5.000.

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

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

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



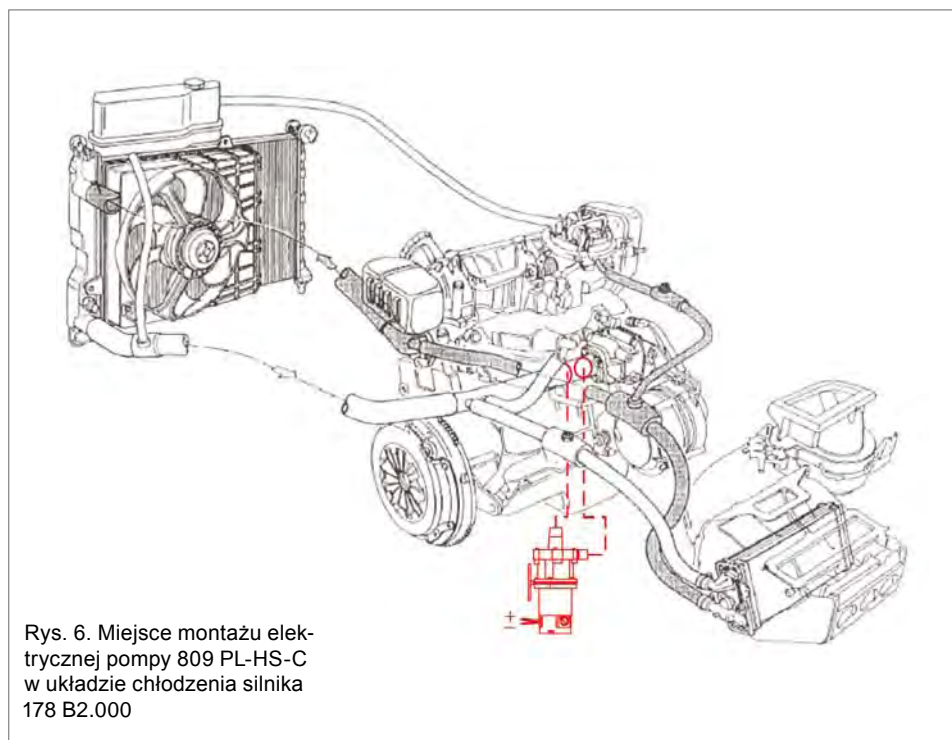
W układzie chłodzenia badanego silnika tradycyjna pompa cieczy chłodzącej została usunięta z obiegu poprzez odciecie wirnika pompy. Takie rozwiązanie przyjęto ze względu na brak możliwości zastosowania krótszego paska rozrządu (rys. 4). Pompa z usuniętym wirnikiem pełni rolę jedynie rolki prowadzącej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

Uwzględniając kryteria:

- maksymalna temperatura cieczy wynosi 110°C;
- maksymalne ciśnienie w układzie chłodzenia wynosi 0,98 bara;
- natężenie przepływu chłodziwa w układzie chłodzenia przy nominalnej mocy 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).

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

W celu regulacji prędkości obrotowej (w zakresie 0–3650 obr./min) silnika pompy wybrano metodę modulacji szerokości impulsu (PWM). Zatrzymanie elektrycznej pompy spowoduje szybsze nagrzewanie się czynnika chłodzącego.



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

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 (λ) 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 rozproszanie 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);

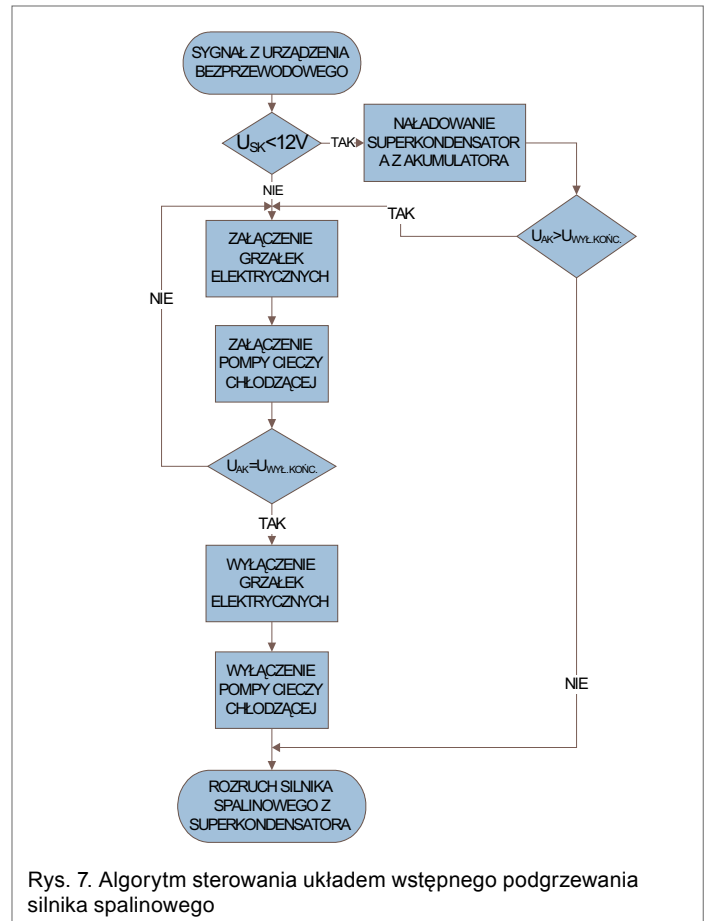
- podczas pracy przy dużym obciążeniu następuje zwiększenie prędkości elektrycznej pompy cieczy chłodzącej do wartości znamionowej, co umożliwia obniżenie temperatury do wartości 80°C zapewniającej odprowadzenie ciepła i zagwarantuje zapas chłodzenia silnika spalinowego pracującego w obszarze mocy submaksymalnej.

Na rys. 7 pokazano przykładowy algorytm sterowania układem wstępnego podgrzewania cieczy chłodzącej silnika spalinowego, a na rys. 8 przykładowy algorytm sterowania prędkością obrotową elektrycznej pompy cieczy chłodzącej silnika 178 B5.000 w zależności od temperatury cieczy chłodzącej i położenia przepustnicy.

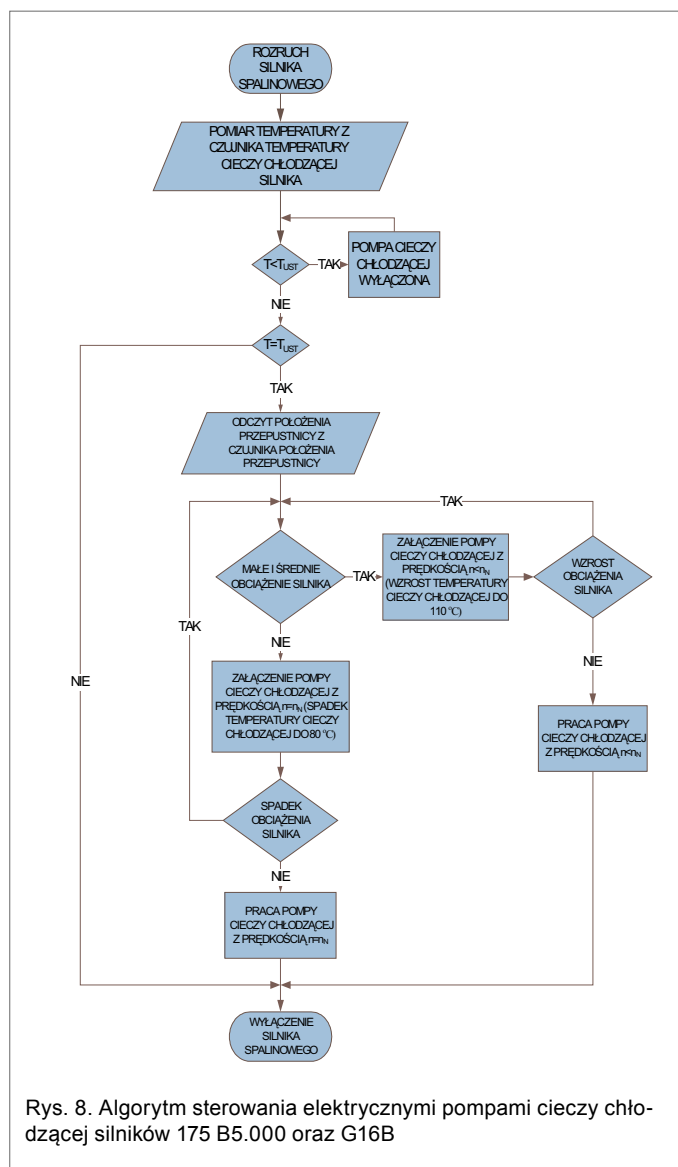
Podsumowanie

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 grzejnych 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.



Rys. 7. Algorytm sterowania układem wstępnego podgrzewania silnika spalinowego



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 obciążeniach 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°C, można obniżyć zużycie paliwa o 1%. Teoretycznie można zwiększyć temperaturę ustaloną pracy silnika z 90°C do 140°C, co skutkowało by zmniejszeniem zużycia paliwa o 5%. Wzrost temperatury czynnika 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.
- [2] Komunikat Komisji do Rady i Parlamentu Europejskiego z dnia 07.02.2007 r. zawierający wyniki przeglądu wspólnotowej strategii na rzecz zmniejszenia emisji CO₂ pochodzących z samochodów osobowych i lekkich pojazdów dostawczych.
- [3] Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego i Rady: Ramy prawne podstawą dla zwiększania 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 cieplna 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 CO₂ pochodzących z samochodów dostawczych.
- [8] WAJAND A.J., WAJAND T.J.: *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe*. Wydaw. Naukowo-Techniczne Warszawa 1993, 2005.
- [9] ZĘBOWICZ 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.

dr inż. Rafał Setlak – pracownik naukowo-dydaktyczny Zakładu Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie. Laureat Nagrody za najlepszą pracę doktorską Koncernu FIAT: „Synchronizacja pracy czterosiłnikowego napędu elektrycznego pojazdu o przeznaczeniu specjalnym” w 2005 r. Promotor prac dyplomowych, które zdobyły Nagrody Koncernu FIAT za najlepsze prace z dziedziny motoryzacji;

dr inż. Marcin Fice – pracownik naukowo-dydaktyczny Zakładu Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie. W 2010 r. obronił pracę doktorską pt. „Zarządzanie rozpyływem energii w napędzie hybrydowym”. Działalność naukowa: napędy wieloźródłowe, diagnostyka w pojazdach, elektrotechnika i elektronika samochodowa;

mgr inż. Przemysław Kuś – pracownik Instytutu Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. Laureat Nagrody Koncernu FIAT za najlepszą pracę z dziedziny motoryzacji w 2009 r. pt. „Analiza przydatności stosowania elektrycznych pomp cieczy w układach chłodzenia silników spalinowych”