

Badania cieplne silnika spalinowego samochodu osobowego z napędem Mild Hybrid

Rafał Setlak, Marcin Fice, Przemysław Kuś

Zanieczyszczenie powietrza szkodliwymi substancjami pochodzącymi ze źródeł motoryzacyjnych jest najbardziej uciążliwe w dużych miastach. Jednym ze sposobów zmniejszenia emisji zanieczyszczeń oraz zużycia paliw ciekłych w pojazdach jest zastosowanie napędu elektrycznego EV (*Electric Vehicle*) czy hybrydowego HEV (*Hybrid Electric Vehicle*). Zalety takich napędów uwidaczniają się szczególnie w ruchu miejskim, kiedy występują częste hamowania, a co za tym idzie – istnieje możliwość odzysku energii hamowania.

Ograniczenie zużycia paliwa i emisji CO₂ przez samochody jest obecnie przedmiotem intensywnych działań Komisji Europejskiej, co ma przyczynić się do stymulacji badań i rozwoju, wzmocnienia konkurencyjności europejskiego przemysłu samochodowego. Ponadto Komisja przewiduje ograniczenie uzależnienia od importowanych paliw oraz poprawę jakości życia (za sprawą poprawy czystości powietrza) obywateli Europy. Kara za przekroczenie limitu będzie skorelowana z ilością emisji w g/km, jaką pojazd przekracza, pomnożoną przez sprzedany wolumen samochodów. Stawka wyliczona została na 20 euro za g/km w pierwszym roku (2012) i osiągnie 30 euro w 2013 r., 60 euro w 2014 r. i 95 euro w 2015 r. Na rys. 1 przedstawiono położenie (na płaszczyźnie emisja CO₂ – masa pojazdu) producentów samochodów wyprodukowanych w 2006 r.

Układ cieplny systemu napędowego Mild Hybrid

W odróżnieniu od stosowanych już powszechnie napędów hybrydowych zaprojektowany w Zakładzie Maszyn Elektrycz-

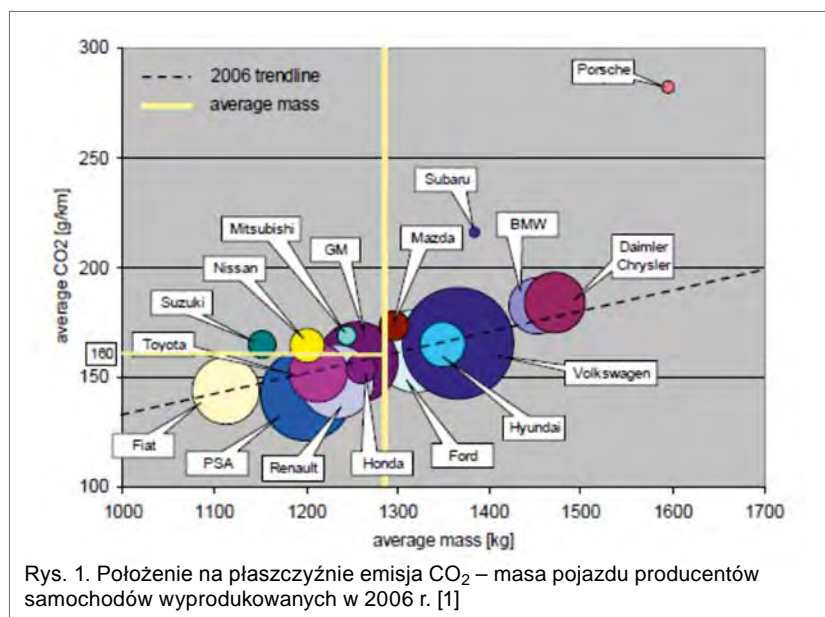
Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań cieplnych silnika spalinowego 178 B5.000. Badania te przeprowadzono w celu zaprojektowania i wykonania układu automatycznego wstępnego podgrzewania silnika spalinowego. Uzyskane pomiary pozwoliły na stworzenie map termicznych silnika spalinowego oraz charakterystyk przepływu.

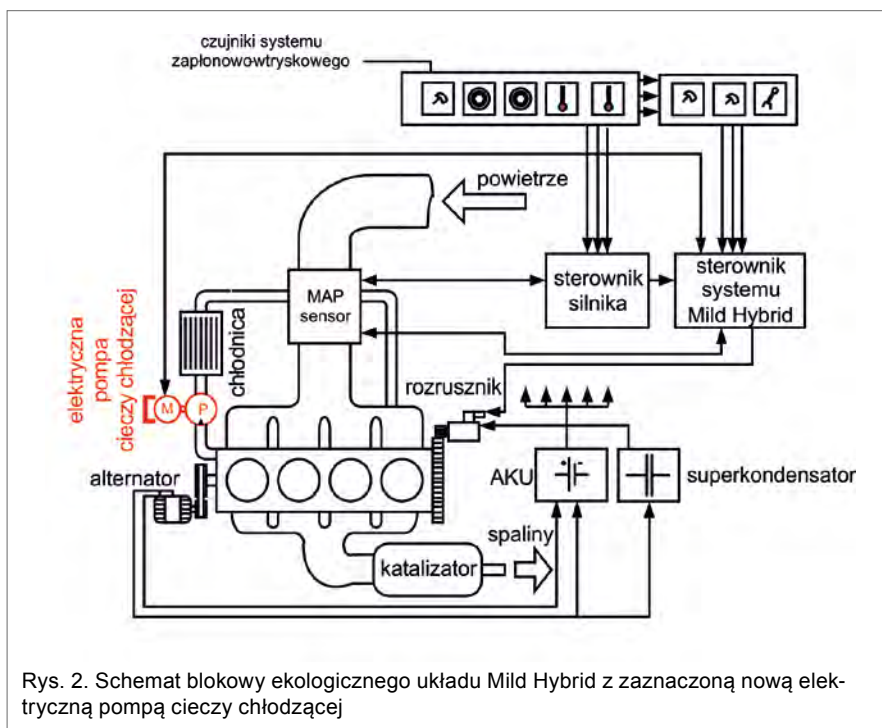
Abstract: The results of thermal tests of the engine block 178 B5.000 were presented in the article. These tests were made to design and construction of the automatic pre-heating system of the combustion engine. The carried out measurements allowed us to create thermal maps and flow rate characteristics of researched engine.

nych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie Politechniki Śląskiej układ Mild Hybrid (rys. 2) wyposażony jest m.in. w autonomiczne ogrzewanie cieczy chłodzącej silnik i oleju smarującego oraz elektryczną pompę cieczy chłodzącej.

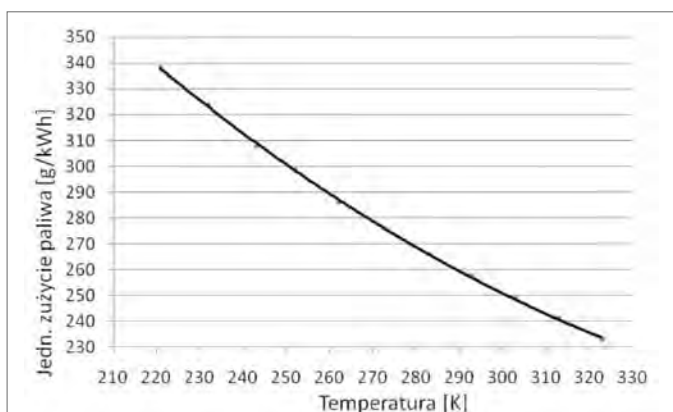
We wszystkich samochodach (nawet hybrydowych) w fazie nagrzewania silnika spalinowego wtryskiwana mieszanka paliwowa-powietrzna jest wzbogacana (dłuższy czas wtrysku paliwa do tej samej części masy powietrza sterowanej kątem położenia przepustnicy). W tłokowym silniku spalinowym zaledwie 24–40% zawartej w paliwie energii cieplnej jest zamieniane na pracę użyteczną, pozostała część jest emitowana do otoczenia

w formie ciepła. Podgrzanie bloku silnika jeszcze przed jego uruchomieniem spowoduje skrócenie czasu wtrysku paliwa podczas rozruchu, a to z kolei wpłynie na obniżenie zużycia paliwa podczas uruchamiania silnika. Wynika to z faktu, iż stan cieplny silnika charakteryzują temperatury ścian cylindrów, oleju smarującego oraz cieczy chłodzącej. W czasie pierwszego rozruchu ze stanu zimnego temperatury te mają zbliżoną wartość. Im niższe są te temperatury, tym większe są straty energii potrzebne na pokonanie oporów ruchu silnika, następuje wydłużenie czasu rozruchu oraz zwiększenie zużycia energii rozruchowej. Skrócenie czasu pracy zimnego silnika z wzbogacaniem mieszanki (dodatkowo silnik pracuje z otwartym sprzężeniem zwrotnym od tzw. Sondy Lambda) spowoduje zmniejszenie w cyklu jezdnym NEDC zużycia paliwa i emisji CO₂. Przykładowy wpływ temperatury otoczenia na zużycie paliwa przedstawiono na rys. 3.





Rys. 2. Schemat blokowy ekologicznego układu Mild Hybrid z zaznaczoną nową elektryczną pompą cieczy chłodzącej



Rys. 3. Przykładowy wpływ temperatury na jednostkowe zużycie paliwa [6]

Tabela 1. Dane chłodnicy silnika 178 B5.000

Parametr	Chłodnica silnika 178 B5.000
Moc maksymalna silnika N_e [kW]	54
Typ	RP
Liczba rzędów	2
Wymiary (szer./wys./gr.) [mm]	522 × 359 × 34
Liczba rurek w jednym rzędzie i_r	19
Obwód wnętrza rurki O_w [m]	26,6 · 10 ⁻³
Powierzchnia przekroju rurki f_w' [m ²]	56,5 · 10 ⁻⁶

Cel badań

Celem obliczeń cieplnych 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 cieczy chłodzącej realizowaną przez elektryczną pompę cieczy chłodzącej. Niezależne sterowanie prędkością pompy oraz zastosowanie dodatkowego podgrzewania cieczy umożliwia nagrzanie czynnika chłodzącego przy wyłączonym silniku spalinowym oraz regulację temperatury silnika w czasie jego pracy (dopuszczenie do zwiększenia temperatury do 110°C).

Analiza możliwości zastosowania elektrycznych pomp cieczy chłodzącej w układach chłodzenia systemu Mild Hybrid została przeprowadzona dla silnika spalinowego 178 B5.000 Fiata Palio Weekend.

Obliczenia cieplne silnika spalinowego 178 B5.000

Osiągi silników spalinowych są ograniczone przez ich obciążenia cieplne. Obciążeniem cieplnym nazywa się stan cieplny części silnika określanej jednoznacznie wartościami temperatur oraz gradientami temperatury.

Od obciążeń cieplnych zależą naprężenia termiczne, siły tarcia czy wytrzymałość materiałów, a te parametry wpływają bezpośrednio na trwałość i prawidłowe działanie silnika. Każdy element, który otacza komorę spalania, czyli każdy element grupy tłokowo-cylindrowej, zalicza się do obciążonej cieplnie części silnika. Przepływ czynnika chłodzącego w wymienniku ciepła badanego silnika 178 B5.000 następuje w kierunku poziomym. W całej powierzchni rdzenia przepływ chłodziwa jest jednokierunkowy. Rdzenie wodno-rurkowe posiadają uźbrowania, które zwiększają obszar wymiany ciepła. Chłodnica silnika posiada tzw. rdzeń rurkowo- płytkowy. W tabeli 1 przedstawiono dane badanej chłodnicy.

W ramach obliczeń wyznaczono między innymi ilość energii cieplnej rozproszonej przez wymiennik, ilość przepompowanego czynnika chłodzącego, ilość powietrza przekazywaną przez wentylator na wymiennik, wskaźnik przekroju poprzecznego wymiennika, prędkość przepływu czynnika chłodzącego w rurkach, jednostkowe natężenie przepływu czynnika chłodzącego w rurkach, współczynnik dławienia w rdzeniu wymiennika, współczynnik przenikania powierzchniowej wymiany ciepła, liczbę Reynoldsa dla czynnika chłodzącego, liczbę Reynoldsa dla powietrza, liczbę Prandtla dla czynnika chłodzącego, współczynnik wnikania ciepła do rurek chłodnicy, współczynnik wnikania ciepła ze ścianek do powietrza. Wyniki obliczeń zostały zestawione w tabeli 2.

reklama

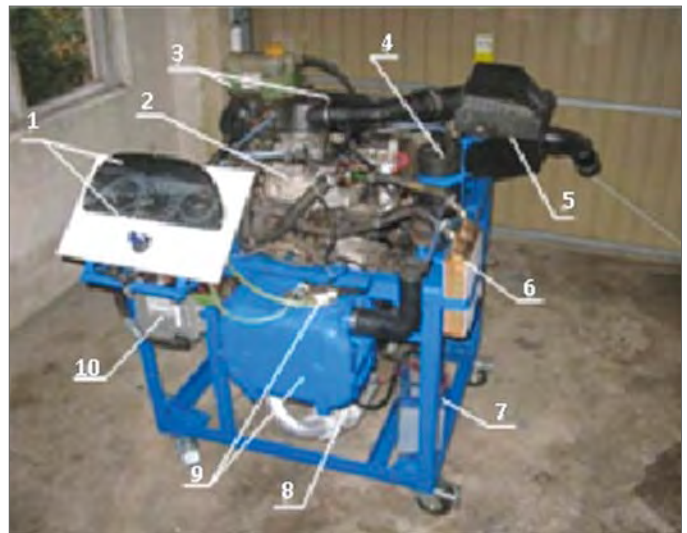
Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów chłodnic silnika 178 B5.000

Parametr	Jednostka	178 B5.000
Q	kW	59,4
G _w	kg/s	2,59
G _p	kg/s	8,1 · 10 ⁻³
F _k	m ²	0,187
V _r	m ³	6,37 · 10 ⁻³
f _k	dm ² /kW	0,35
F _w	m ²	7,48
f'	m ²	1,07 · 10 ⁻³
F	m ²	2,14 · 10 ⁻³
σ _p	m ² /m ²	3495
v _w	m/s	1,25
G _{jp}	kg/m ² · s	0,043
G _{jw}	kg/m ² · s	1210,3
ρ _s	m ² /m ²	1,43
G _{jr}	kg/m ² · s	0,061
k	W/m ² · °C	262
d _{hw}	m	8,47 · 10 ⁻³
d _{hp}	m	2,36 · 10 ⁻³
Re _w	–	30510
Re _p	–	5,48
Pr _w	–	2,28
α _w	W/m ² · °C	9889,2
α _p	W/m ² · °C	14,4

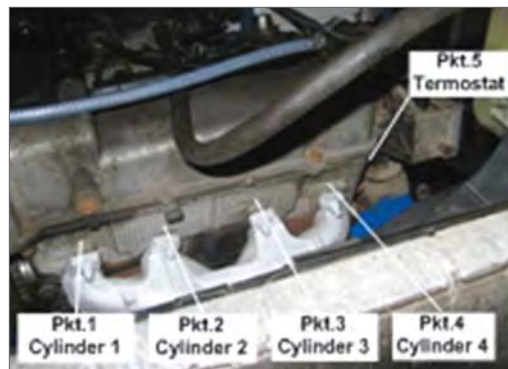
Tabela 3. Wyniki obliczeń parametrów wentylatora silnika 175 B5.000

Parametr	Jednostka	178 B5.000
u _z	m/s	30,6
g _p	kg/kW · s	0,0015
G _p '	m ³ /s	75,6 · 10 ⁻³
v ₁	m/s	1,11
ω	–	0,036
φ	–	0,98
σ	–	26,7
e'	%	1,23
N _p	kW	0,042

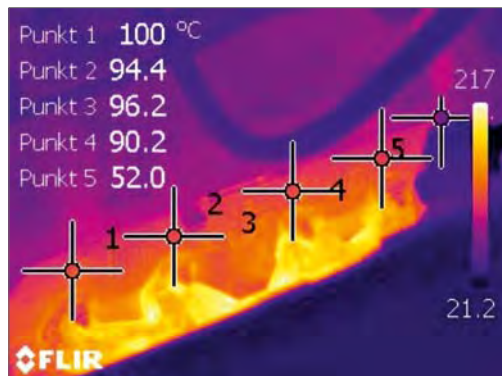
Niezbędną część układu chłodzenia silnika stanowi wentylator osiowy, którego zadaniem jest nadawanie powietrzu odbierającemu ciepło z chłodnicy odpowiedniej prędkości. Charakterystyczną cechą wentylatorów osiowych są promieniowe łopatki posiadające specyficzny kształt, wygięte tak, aby w czasie obrotu powodować przepływ powietrza równoległy do osi wentylatora. Konstrukcyjnie wentylatory silnikowe należą do grupy dmuchaw łopatkowych o wartości sprężu 1,0–3,0. Sprawność oraz efektywność wentylatora zależy w dużej mierze od osłony średnicy zewnętrznej wentylatora. Efektywność wykorzystania obudowy jest charakteryzowana procentową wielkością luzu. Brak obudowy powoduje, iż praca wentylatora okupiona jest dużymi stratami wolumetrycznymi, dlatego w przypadku zainstalowanej obudowy dąży się, by procentowa wielkość luzu e'



Rys. 4. Stanowisko badawcze silnika 178 B5.000, widok z przodu; 1 – pulpit z zestawem wskaźników oraz stacyjką; 2 – silnik 178B5.000; 3 – chłodnica i zbiornik wyrównawczy; 4 – układ odprowadzania par paliwa; 5 – filtr powietrza, 6 – nagrzewnica; 7 – akumulator; 8 – katalizator; 9 – zbiornik i pompa paliwa; 10 – jednostka sterująca



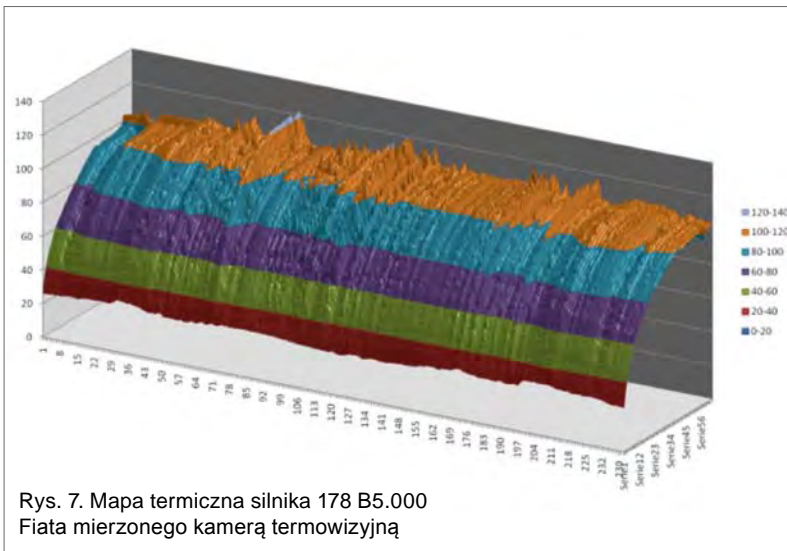
Rys. 5. Punkty pomiaru temperatury kamerą termowizyjną



Rys. 6. Przykładowy rozkład temperatur w wybranych punktach pomiarowych silnika 178 B5.000 Fiata Palio Weekend w 10. minucie pomiaru

miała wartość ok. 1%. Ważną cechą wentylatora jest kształt jego łopatek, a ściślej ich profil, od którego zależy sprawność wentylatora. Łopatki wentylatora w badanym silniku mają profil wypukło-łukowy i wykonane są z tworzywa sztucznego (obniżenie masy wentylatora, gładkość powierzchni znacząco wpływającej na przyrost sprawności hydraulicznej). W badanym silniku 175 B5.000 wentylator umieszczony jest na stronie chłodnicy, na której powietrze wypływa ogrzane.

Wyniki obliczeń badanego wentylatora samochodu Fiat zostały zestawione w tabeli 3.



Rys. 7. Mapa termiczna silnika 178 B5.000 Fiata mierzonego kamerą termowizyjną

Badania termiczne silnika 178 B5.000

Celem badań termicznych było określenie gradientów temperatur w wybranych punktach silnika spalinowego zarówno w fazie ich rozgrzewania, jak i pracy z ustaloną temperaturą. W badaniach wykorzystywano kamerę termowizyjną firmy FLIR typu ThermaCam T400. W celu przeprowadzenia pomiarów termowizyjnych zostało zaprojektowane i zbudowane stacjonarne stanowisko badawcze wykorzystujące silnik 178 B5.000 wyposażony w niezbędne do prawidłowej pracy silnika układy sterujące, wiązki przewodów, układ dolotowy i wydechowy (rys. 4).

Przed przystąpieniem do pomiarów wykonano kilka pomiarów wstępnych procesu nagrzewania silnika w celu określenia najbardziej reprezentatywnych obszarów ciepłych. Docelowo wybrano pięć punktów pomiarowych po jednym poniżej połączenia głowicy z kolejnymi cylindrami oraz jeden na obudowie termostatu (rys. 5).

Przykładowe obrazy termiczne z kamery ThermaCam T400 oraz mierzone wartości temperatur w wybranych punktach silnika 178 B5.000 podczas nagrzewania pokazuje rys. 6. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów temperatur wyznaczono charakterystyki nagrzewania silnika w funkcji czasu. Z charakterystyk odczytano wartości temperatur w punktach pomiarowych w danym czasie (rys. 7).

Na rys. 7 zaprezentowano mapę termiczną procesu nagrzewania się badanego silnika.

Podsumowanie

Celem pomiarów było stworzenie mapy cieplnej wybranego silnika spalinowego podczas rozruchu. Wyniki badań posłużą do stworzenia elektrycznego układu napędowego pompy cieczy chłodzącej, której zadaniem będzie regulacja natężenia przepływu czynnika chłodzącego podczas fazy nagrzewania silnika oraz pracy w zmiennych warunkach obciążenia. 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

na z akumulatora PbPbO₂. Energia niezbędna dla ponownego rozruchu silnika spalinowego będzie pobierana z modułu superkondensatora, a nie akumulatora kwasowo-ołowiowego.

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 czterosilnikowego 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 rozpięciem 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 roku 2009 pt. „Analiza przydatności stosowania elektrycznych pomp cieczy w układach chłodzenia silników spalinowych”