

Pomiary termiczne samochodowego modułu mocy z mikrokanalowym chłodzeniem cieczowym

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych mikrokanalowego układu chłodzącego dedykowanego dla układów elektronicznych średniej i dużej mocy, montowanych w pojazdach i przystosowanego do pracy z chłodziwem o temperaturze powyżej 60°C. Pokazano warunki pracy chłodzonych elementów mocy w zależności od temperatury otoczenia oraz płynu chłodzącego. Ponadto, zasygnalizowano problem wpływu jakości medium chłodzącego, a także rozmiarów mikrokanalów struktury chłodzącej na efektywność odbioru ciepła z samochodowych podzespołów elektronicznych przy użyciu płynu chłodzącego silnika.

Abstract. The paper presents experimental results of a microchannel cooling system dedicated for automotive electronic equipment and appropriate for operation with hot liquids (above 60°C). It shows an influence of the environment and the coolant temperatures on operating conditions of power elements. In addition, the quality of the cooling medium as well as the effect of microchannel size on heat transfer efficiency from automotive electronic components by engine coolant is signalised. (*Temperature Measurements of Automotive Power Electronic Equipment with Microchannels Liquid-cooling System*).

Słowa kluczowe: elektronika samochodowa, mikrostruktura chłodząca, układ chłodzenia cieczowego.

Keywords: automotive electronics, thermal management, microchannels cooling structure, liquid cooling system.

doi:10.12915/pe.2014.11.38

Wstęp

Od kilkunastu lat obserwowany jest znaczący wzrost ilości podzespołów elektronicznych w samochodach. Pojawiają się one głównie z podzespołach komfortu i bezpieczeństwa oraz układach sterowania jednostką napędową, ze względu na coraz wyższe normy emisji spalin. Także rosnąca popularność samochodów hybrydowych i elektrycznych sprawia, że w pojazdach pojawiają się elektroniczne wysokoprądowe podzespoły przekształtnikowe, związane z układem zasilania silnika elektrycznego [1,2,3,4,5,6]. Zwłaszcza te ostatnie charakteryzują się bardzo dużym poborem mocy, co przy jednoczesnym dążeniu do redukcji ich wymiarów i masy oraz zapewnieniu wysokiej niezawodności generuje bardzo duże problemy konstrukcyjne [7,8,9,10,11,12,13,14,15,16].

Dodatkowo należy wspomnieć o bardzo niesprzyjających warunkach w jakich pracują samochodowe układy elektroniczne, zwłaszcza te, które są montowane w komorze silnika. Oprócz ograniczonej przestrzeni, należy jeszcze wspomnieć o braku stabilności temperatury otoczenia. Zmiany temperatury w czasie pracy pojazdu przekraczają lokalnie 200°C (od -40°C do +180°C) [7,9,10,12,16,17,18,19]. Ponieważ wysokie temperatury pracy przyrządów półprzewodnikowych skutkują ich degradacją lub uszkodzeniem termicznym, co może powodować awarię pojazdu w trakcie jazdy, jednym z najistotniejszych problemów jest zapewnienie podzespołom elektronicznym w pojazdach stabilnej temperatury pracy, poniżej maksymalnego, dopuszczalnego poziomu.

Rozwiązania tego problemu poszukuje się w dwóch kierunkach. Jednym z nich jest wykorzystanie elementów z grupy HTE (High Temperature Electronics), zwłaszcza bazujących na węglu krzemu (SiC) [3,6,20,21,22,23,24]. Jednak ze względu na cenę oraz niewielki asortyment elementów mocy, rozwiązanie to jest traktowane jako przeszłościowe.

Drugim rozwiązaniem jest zapewnienie odpowiedniego chłodzenia elektronicznych bloków dużej mocy. Rozwiązanie to jednak okazało się dużym wyzwaniem dla projektantów. Dotychczasowe rozwiązania oparte na chłodzeniu powietrznym (wymuszonym lub naturalnym) okazują się niewystarczające pod względem wydajności, zwłaszcza, gdy układ ma być montowany w komorze silnika

i jednocześnie pracuje z dużymi mocami, jak to ma miejsce np. w blokach zasilająco-sterujących napędy hybrydowe lub elektryczne. Obecnie stosuje się systemy chłodzenia cieczowego oparte na osobnym obiegu wodnym, jak np. w Toyocie Prius, co zwiększa ciężar pojazdu i komplikuje konstrukcję mechaniczną ze względu na potrzebę umieszczenia w komorze silnika dodatkowej chłodnicy, zbiornika, przewodów z płynem, pompy, itp. [14,17,18,25,26,27]. Dlatego projektanci wciąż poszukują nowych rozwiązań pozwalających skutecznie odbierać ciepło z układów elektronicznych dużej mocy, przy jednoczesnym ograniczeniu ilości dodatkowych elementów systemu chłodzącego [17,18,27,28,29].

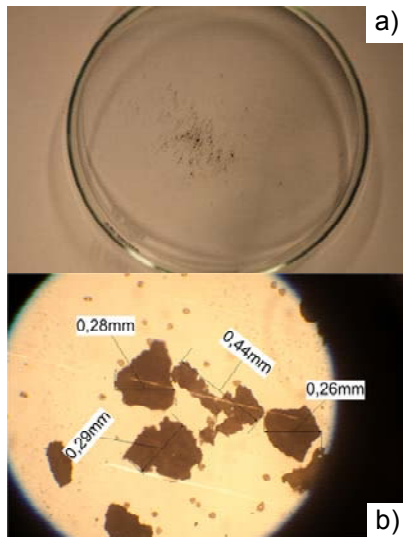
Jednym z takich rozwiązań są radiatory zawierające sieć mikrokanalów ulokowanych w bezpośredniej bliskości struktur półprzewodnikowych i elementów najbardziej odpowiedzialnych za wzrost temperatury [27,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38]. Ich wydajność pozwala efektywnie odbierać ciepło przy niewielkiej różnicy temperatur pomiędzy płynem chłodzącym, a chłodzonym elementem, nawet gdy założy się dopuszczalną temperaturę złącza, bliską standardowej granicy dla przyrządów półprzewodnikowych mocy, czyli ok. 175°C. W przypadku zastosowania jako chłodziwa płynu chłodzącego silnik (ok. 90°C), takie rozwiązanie pozwoliłoby wykorzystać istniejący układ chłodzenia oraz zapewnić stabilną i bezpieczną temperaturę pracy podzespołów elektronicznych [27,29,35,36,37].

Wpływ jakości medium chłodzącego na rozmiary mikrokanalowej struktury chłodzącej.

Zaproponowane przez autorów rozwiązanie, polegające na wykorzystaniu jako medium chłodzącego, płynu chłodzącego silnik, niosło ze sobą kilka problemów. Projekt struktury mikrokanalowej musiał uwzględniać zmianę stężenia oraz składu chemicznego chłodziwa. Zawartość koncentratu w układzie chłodzenia powinna wynosić od 40 ÷ 60%, przy czym za najbardziej optymalną uznać trzeba proporcję: 50% koncentratu (glikol etylenowy lub propylenowy) i 50% wody destylowanej, która zapewnia temperaturę krzepnięcia ok. -35°C i wrzenia ok. 125÷135°C [39,40]. Ponadto płyn chłodzący zawiera wiele różnych dodatków chroniących przed korozją elementy silnika i układu chłodzenia oraz powstawaniem

i odkładaniem się zanieczyszczeń. Mimo to, należy oczekiwać, że będzie on zanieczyszczony w okresie jego eksploatacji drobinami przejmowanymi z powierzchni elementów tworzących układu chłodzenia. Drobinę takie mogą w istotny sposób ograniczać przepływ cieczy, a co za tym idzie, ograniczać efektywność odbioru ciepła przez mikrostrukturę. Dlatego autorzy uznali za istotne przeprowadzenie badań właściwości płynów chłodzących w pojazdach z dużym przebiegiem, pod kątem zawartości zanieczyszczeń w układzie chłodzenia. Pozwoliły one na oszacowanie średnich wymiarów drobin osadu, co z kolei umożliwiło ustalenie minimalnych wymiarów kanałów w projektowanych mikrostrukturach [27,29].

Przebadano ponad 30 próbek pracowanego płynu chłodzącego pobranego z 11 różnych samochodów, celem stwierdzenia jakie zanieczyszczenia mogą się w nim zawierać. Podczas obserwacji stwierdzono, że chłodziwo samochodowe zawiera przede wszystkim drobiny o charakterze metalicznym (głównie związki aluminium). W poszczególnych próbkach płynów stwierdzono średnio od 5 do 20 drobin, których wymiar charakterystyczny miał powyżej 1 mm i kilkadziesiąt o wymiarach z przedziału $0,2 \div 1$ mm, co stanowi znikomą ilość względem całego badanego materiału, cechującego się zanieczyszczeniami o średnicy poniżej 200 μm . Na rysunku 1 przedstawiono osad uzyskany z jednej z badanych próbek.



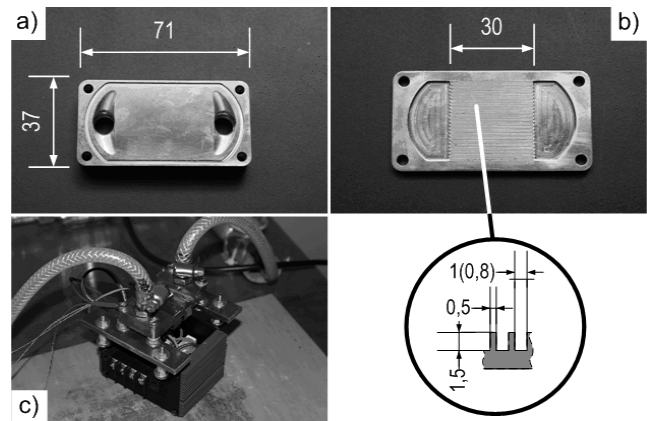
Rys.1. Osad uzyskany z jednej z badanych próbek: a) całkowita ilość osadu; b) przykładowe wymiary drobin w osadzie

Opierając się na pomierzonych wielkościach drobin metalicznych zaobserwowanych w badanych próbkach, stwierdzono, że szerokość i wysokość kanałów, które będą tworzyły proponowaną w projekcie strukturę chłodzącą, nie powinny być mniejsze niż 800 μm .

Model mikrokanalowej struktury chłodzącej dla układów elektronicznych w pojazdach

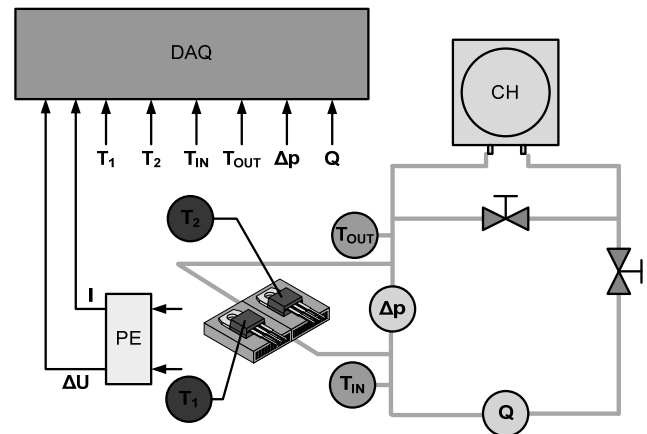
Na podstawie wcześniejszych symulacji [29] oraz badań płynu chłodzącego [27] wykonano dwie miedziane, mikrokanalowe struktury chłodzące, których wygląd i wymiary przedstawiono na rysunku 2a i 2b. Obie mikrostruktury mają jednakowe wymiary zewnętrzne, wysokość kanału wynoszącą 1,5 mm oraz szerokość kolumny rozdzielającej wynoszącą 0,5 mm. Różni je jedynie wymiar szerokości mikrokanalu, którego wartość ustalono na 0,8 mm i 1 mm. Ostatnia struktura jest już zaliczana do rozwiązań minikanalowych.

Do struktury chłodzącej dołączono elementy mocy w obudowach TO-220 (klucz przełączający i prostownik) zawarte w konwerterze DC/DC PE-48 (42V/13,8V). Oba elementy zamontowano na strukturze chłodzącej od strony podstawy w której wykonana jest sieć mikrokanalów (rys.2b) za pomocą standardowych uchwytów sprężystych (klipsów). Jak stwierdzono wcześniej, głównym elementem generującym ciepło jest tranzystor kluczujący, dlatego został on zamontowany z wykorzystaniem pasty termoprzewodzącej. Dioda prostownicza została zaopatrzona w kapturek izolacyjny, ze względu na połączenia elektryczne w układzie i możliwość zwarcia tranzystora i diody przez strukturę miedzianą. Ogólny wygląd układu badanego prezentuje rysunek 2c.



Rys.2. Badana struktura mikrokanalowa: a), b) wymiary mikrostruktury; c) moduł mocy z zamontowaną mikrostrukturą chłodzącą.

Stanowisko pomiarowe



Rys.3. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego: CH – chłodziwa ze stabilizacją temperatury, PE – przetworniki wartości elektrycznych, DAQ – karta pomiarowa; T_1, T_2 – temperatury elementów badanych, T_{IN}, T_{OUT} – temperatura wlotowa i wylotowa chłodziwa, Q – przepływ, Δp – różnica ciśnień na strukturze chłodzącej, ΔU – spadek napięcia, I – natężenie prądu.

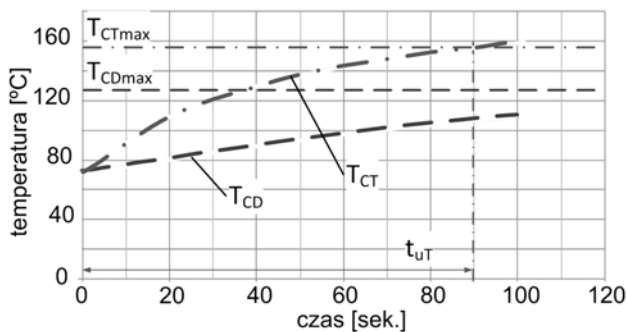
Zaprojektowaną strukturę chłodzącą przebadano na stanowisku pomiarowym, którego budowa jest schematycznie przedstawiona na rysunku 3. Punktem wyjścia były wcześniej nabyte przez autorów doświadczenia w zespole, który zaprojektował system do pomiaru parametrów strumienia ciepła w układzie chłodzenia struktur półprzewodnikowych mocy [41,42]. Stanowisko umożliwia badanie parametrów termicznych przyrządu półprzewodnikowego wraz z dołączonym do niego

systemem chłodzenia cieczowego. Stanowisko umożliwia pomiar temperatury cieczy T_{IN} na wlocie i T_{OUT} na wylocie badanej struktury chłodzącej, pomiar prędkości przepływu cieczy Q oraz pomiar różnicy ciśnień Δp na testowanym układzie chłodzącym. Dodatkowo przewidziano pomiar temperatur T_1 oraz T_2 elementów dołączonych do struktury chłodzącej, który realizowano za pomocą termopar przymocowanych do obudów tych elementów. Stanowisko umożliwia także pomiar natężenia prądu I oraz spadku napięcia ΔU . Przewidziano także możliwość pomiaru wartości chwilowych i uśrednionych dla poszczególnych wielkości oraz rejestracji sygnałów za pomocą komputera z 16 bitową kartą pomiarową DAQ (DaqBoard 3000/USB).

Opracowane stanowisko umożliwiała utrzymanie stałej wartości temperatury, ciśnienia i przepływu chłodziwa za pomocą termostatu LAUDA T1200. Ponadto, przy wykorzystaniu komory cieplnej KBC-30W, zapewniono stałą temperaturę otoczenia badanych elementów mocy wraz z mikrostrukturą chłodzącą, odpowiadającą warunkom panującym w komorze silnika. Jako chłodziwo wykorzystano płyn chłodzący Texaco Havoline AFC Coolant o stężeniu 50%.

Wyniki badań

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania oryginalnego modułu mocy PE-48 w komorze cieplnej, celem zebrania danych porównawczych. Jak przewidywano, układ w temperaturach otoczenia powyżej 60°C nie pracował stabilnie. Przy maksymalnym prądzie obciążenia ($I = 10$ A) dla temperatur otoczenia powyżej 70°C, temperatura obudowy tranzystora przekroczyła maksymalną dopuszczalną wartość już po kilkudziesięciu sekundach pracy (rys.4). Przy niższym prądzie wyjściowym ($I = 8$ A) tranzystor pracował w stabilnych warunkach jedynie dla temperatur otoczenia do 80°C. Powyżej tej temperatury jego obudowa nagrzewała się do poziomu maksymalnego po kilku minutach.



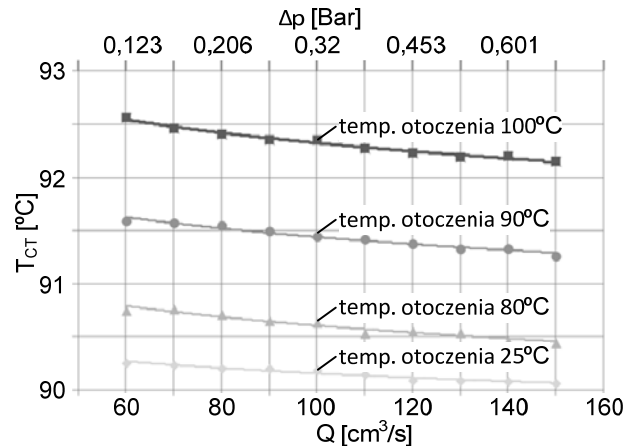
Rys.4. Czas narastania temperatury obudów elementów mocy dla prądu obciążenia 10A i temperatury otoczenia 80°C (T_{CD} – temp. obudowy diody; T_{CT} – temp. obudowy tranzystora, t_{ut} – czas osiągnięcia max. temp. przez tranzystor)

Następnym etapem było zastąpienie radiatora powietrznego przez mikrokanałową strukturę chłodzącą i sprawdzenie, jak nowy system chłodzenia wpływa na pracę modułu mocy. Na podstawie wcześniejszych badań [27,29] zdecydowano o przeprowadzeniu testów dla temperatur otoczenia 25°C, 80°C, 90°C i 100°C, płynu chłodzącego 80°C, 90°C i 100°C oraz zmian prędkości przepływu chłodziwa w zakresie $60 \div 150$ cm³/s

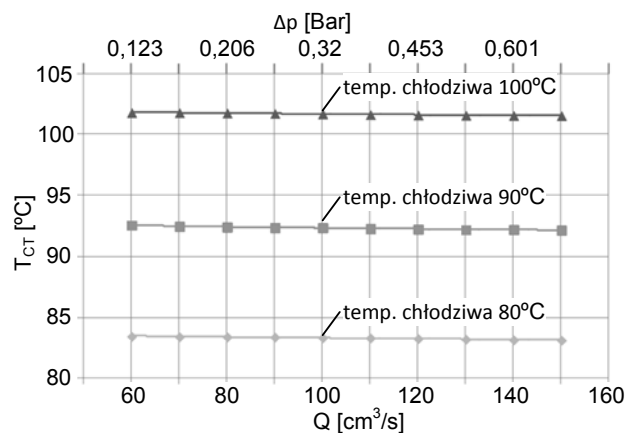
Ponieważ, jak wspomniano wcześniej, elementem, który generował większe ilości ciepła był tranzystor kluczujący, w dalszej części artykułu zostaną przedstawione wyniki dotyczące jedynie tego elementu. Ponadto należy wspomnieć, że badania wykonano dla obu zaprojektowanych struktur, jednak różnice pomiędzy

odpowiedniki wynikami nie przekraczały 2°C, dlatego zdecydowano o przedstawieniu rezultatów dotyczących struktury o szerokości kanału 0,8mm.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność temperatury obudowy tranzystora kluczującego od wartości przepływu, dla różnych temperatur otoczenia i temperatury chłodziwa równej 90°C. Widać, że temperatura ta spada wraz ze wzrostem prędkości przepływu w całym przyjętym zakresie. Jednak zmiany te nie są bardzo duże, co pokazuje, że struktura odprowadza efektywnie ciepło w całym badanym zakresie prędkości przepływu. Wykresy pokazują także, że nawet duże zmiany temperatury otoczenia nie wpływają znacząco na temperaturę obudowy tranzystora, co świadczy o jego stabilnej pracy.



Rys.5. Charakterystyki zmian temperatury obudowy tranzystora T_{CT} od prędkości przepływu Q dla różnych temperatur otoczenia (struktura z kanałem 0,8mm, temp. chłodziwa 90°C, prąd obciążenia 10A)



Rys.6. Charakterystyki zmian temperatury obudowy tranzystora T_{CT} od prędkości przepływu Q dla różnych temperatur chłodziwa (struktura z kanałem 0,8mm, temp. otoczenia 100°C, prąd obciążenia 10A)

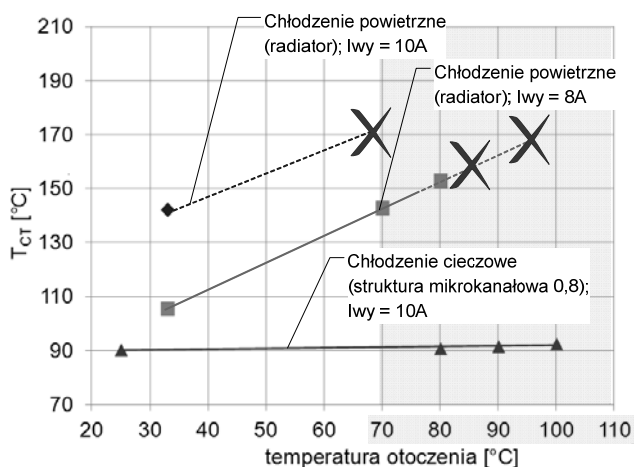
Z kolei na rysunku 6 przedstawiono również zależność temperatury obudowy tranzystora kluczującego od wartości przepływu, ale dla różnych temperatur chłodziwa i temperatury otoczenia równej 100°C. Tu wpływ zmian wartości przepływu jest minimalny, co pozwala wnioskować, że efektywny odbiór ciepła przez zaproponowaną mikrostrukturę chłodzącą jest zagwarantowany przy stosunkowo niskich wartościach przepływu chłodziwa, co z kolei przekłada się na niskie spadki ciśnienia. Utrzymana praktycznie stała wartość temperatury obudowy tranzystora potwierdza ponownie, że mikrokanałowa struktura chłodząca zapewnia stabilne warunki pracy omawianego elementu.

Rysunek 6 pokazuje także, że kluczowym parametrem opracowanego układu chłodzenia jest temperatura chłodziwa. Wpływa ona bardzo na temperaturę badanego elementu, gdyż różnica pomiędzy nimi wynosi zaledwie kilka stopni. Można wyciągnąć z tego wniosek, że nawet wzrost temperatury płynu chłodzącego do wartości krytycznych z punktu widzenia chłodzenia silnika (116-120°C), nie spowoduje uszkodzenia termicznego elementów chłodzonych i zapewni im temperaturę pracy poniżej wartości granicznej.

Następny wykres (rys.7) prezentuje porównanie temperatur obudowy badanego tranzystora z chłodzeniem powietrznym zaproponowanym przez producenta i z chłodzeniem cieczowym zaproponowanym przez autorów. Obszar zacieniowany obejmuje zakres najbardziej interesujący z punktu widzenia zastosowań proponowanego rozwiązania w pojazdach.

Jak widać wzrost temperatury otoczenia o 75°C w przypadku chłodzenia powietrznego spowodował gwałtowny wzrost temperatury badanego tranzystora, aż do osiągnięcia wartości krytycznych powodujących jego zniszczenie. Przy prądzie wyjściowym 10 A, dla temperatur otoczenia powyżej 70°C temperatura obudowy tranzystora osiągnęła wartość maksymalną, a sam element uległ zniszczeniu. Przy prądzie wyjściowym 8 A tranzystor pracował w stabilnych warunkach jedynie dla otoczenia o temperaturze do 80°C. Zwiększenie temperatury otoczenia powodowało jego nieodwracalne uszkodzenie.

Te same warunki pracy w przypadku zastosowania mikrostruktury chłodzącej spowodowały wzrost temperatury tranzystora zaledwie o 3°C, co potwierdza, że zaproponowany przez autorów system chłodzenia spełniła pokładane w nim oczekiwania i efektywnie odbiera ciepło z elementów mocy przy wysokich temperaturach otoczenia.



Rys.7. Zależność temperatury obudowy tranzystora T_{CT} od temperatury otoczenia dla różnych systemów chłodzenia (struktura z kanałem 0,8mm, prędkości przepływu $Q = 100\text{cm}^3/\text{s}$)

Ponadto należy podkreślić, że badany tranzystor z chłodzeniem powietrznym i przy maksymalnych prądach wyjściowych osiągał temperatury krytyczne po kilku minutach pracy, a w przypadku zainstalowanego chłodzenia cieczowego testowy moduł mocy pracował poprawnie nawet kilka godzin, nie zmieniając swoich parametrów wejściowych i wyjściowych przez cały czas.

Wnioski

Zaproponowana struktura chłodząca zawierająca sieć mikrokanalów jest odpowiednim rozwiązaniem problemu odbioru ciepła i zapewnienia stabilnej temperatury pracy

elementom i modułom elektronicznym stosowanym w pojazdach, gdyż charakteryzuje się małymi wymiarami, prostotą konstrukcji oraz niewielką wagą.

Wyniki przeprowadzonych testów wskazują, że zastosowane struktury mikrokanalowe zapewniają skuteczne chłodzenie, nawet jeżeli medium chłodzącym będzie standardowy płyn chłodzący z głównego obiegu chłodzenia silnika, o temperaturze bliskiej 90°C, a temperatura otoczenia badanych elementów przekroczy 100°C. Jednocześnie należy nadmienić, iż zaproponowany układ chłodzenia zapewnia odpowiednie parametry pracy w szerokim zakresie prędkości przepływu, co z kolei potwierdza przydatność tego typu rozwiązania w aplikacjach związanych z pojazdami.

Przeprowadzone badania, zarówno w temperaturach pokojowych jak i w warunkach podwyższonej temperatury sięgającej 100°C, pozwoliły na stwierdzenie, że opracowane rozwiązanie mikrokanalowego systemu chłodzenia pozwala na efektywne odprowadzenie ciepła z samochodowych modułów mocy i zminimalizowanie wpływu środowiska na temperaturę pracy elementów elektronicznych, nawet przy zastosowaniu płynów chłodzących o wysokich temperaturach (powyżej 60°C). Dodatkowo, wykonane badania eksperymentalne wskazały na problem, jakim jest wpływ zanieczyszczenia chłodziwa na prawidłową pracę mikrokanalowego systemu chłodzenia. Zastosowanie tego nadzwyczaj wydajnego i jednocześnie miniaturowego systemu chłodzenia w połączeniu z podzespołami elektronicznymi może pozwolić na montaż w samochodach urządzeń, które do tej pory nie mogły się w nich znaleźć, ze względu na zbyt dużą emisję ciepła lub wrażliwość na zbyt wysoką temperaturę otoczenia.

Praca częściowo finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu badawczego nr N510 326137.

LITERATURA

- [1] Iqbal H., Electric And Hybrid Vehicles. Design Fundamentals, CRC PRESS, Boca Raton London New York Washington, D.C., 2005;
- [2] Emadi A., Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives, CRC Press Taylor & Francis Group, 2005
- [3] Marlino L.D., High Temperature & Thermal Management Needs for the FreedomCar Program, *Mat. Konf. HITEC 2006*, Santa Fe, USA
- [4] Momoh Omonowo D., Omoigui Michael O., An Overview of Hybrid Electric Vehicle Technology, 2009 IEEE
- [5] Gover J., A Tutorial on Hybrid Electric Vehicles: EV, HEV, PHEV and FCEV, www.midmichigansae.org/documents/DrGoverPresentationSAEApril20.pdf, dostęp 06.2010
- [6] „Power EV-HEV 2010 – power electronics in Electric and Hybrid cars ...”, *research and industry report from Yole Développement*
- [7] de Vos G.W., Helton D.E., Migration of Power Train Electronics to On-Engine and On-Transmission, *SAE Technical Paper Series 1999-01-0159*, 1999
- [8] Groppo R., Wondrak W. i in., Moving Towards High Temperature Electronics for Automotive Applications, *Mat. Konf. HITEN 2001*, Oslo, Norway, 105-111
- [9] Kassakian J.G., Perreault D.J., The Future Of Electronics In Automobiles, *Proceedings of 2001 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs*, Osaka Japan, 2001;
- [10] Ohadi M., Jianwei Qi, Thermal Management of Harsh-Environment Electronics, 20th IEEE SEMI-THERM Symposium, 09 Mar - 11 Mar 2004
- [11] Gerber M., Marz M., System integration in automotive power systems, *EPE2005*, Drezno
- [12] Wagner G., Craig A., Functional Power Solutions For Powertrain, *AUTO ELECTRONICS*, May/June 2006;
- [13] von Tils V., Design Requirements for Automotive Reliability, *ESSDERC 2006*, Montreux, Switzerland, September 22, 2006

- [14]Lang G., Kitanoski F., Kussmann C. Principal Aspects and Simulation of a Hybrid Demonstrator Vehicle's Cooling System, *SAE Technical Paper 2007-01-3483*, 2007
- [15]Cantor B., Grant P., Johnston C., Automotive Engineering Lightweight, Functional, and Novel Materials, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008
- [16]Olesen K., Bredtmann R., "Power under the hood" Increasing power density of inverters with a novel 3D-approach, *APE2009 - Automotive Power Electronics*, 2009, Paris, France
- [17]Bradfield M., Thermal Design Challenges in Automotive Alternator Power Electronics, *Electronics Cooling*, vol.8, nr 2, 2002
- [18]Bharathan D., Power electronics cooling for automotive application – progress report, *2004 DOE FreedomCAR and Vehicle Technologies Program*, 2004
- [19]Wayne J.R., Evans J. L. i in., The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics, *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS PACKAGING MANUFACTURING*, VOL. 27, NO. 3, JULY 2004;
- [20]Wayne J.R., Heidger S., Thome F.V., High Temperature Electronics Activities in the United States, *Mat. Konf. HITEN 2001*, Oslo, Norway, 102-104
- [21]Johnston C., Advance F., High Temperature Electronics in Europe, *Mat. Konf. HITEC 2006*, Santa Fe, USA
- [22]Skibinski G., Braun D., Kirschnik D., Lukaszewski R. Developments In Hybrid Si – SiC Power Modules, *Materials Science Forum*, Volumes 527 - 529, 1141-1147, 2006r
- [23]Hosseini Aghdam M. G., Thiringer T., Comparison of SiC and Si Power Semiconductor Devices to Be Used in 2.5 kW DC/DC Converter, *VIII International Conference on Power Electronics and Drive Systems PEDS2009*, November 2-5, 2009, Taipei, Taiwan, R.O.C
- [24]„SiC 2010 – 2009-2019:10 year market projection ...” (full vesion), *research and industry report from Yole Développement*
- [25]Bharathan D., Hassani V., Spray cooling: An assessment for use with automotive power electronics applications, *Milestone Report for FreedomCAR*, 2005
- [26]Kelly K.J., Abraham T., Bennion K. i in., Assessment of Thermal Control Technologies for Cooling Electric Vehicle Power Electronics, *23rd International Electric Vehicle Symposium*, Anaheim, California, December 2–5, 2007
- [27]Widerski T. Zintegrowany system chłodzenia cieczowego dla podzespołów elektronicznych w pojazdach samochodowych rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 2012;
- [28]Olesen K., Bredtmann R., Eisele R., "ShowerPower" New Cooling Concept for Automotive Applications, *Automotive Power Electronics*, 21-22 June 2006, Paris
- [29]Widerski T., Raj E., Olwert M., Lisik Z., Mikrokanalowy układ chłodzenia cieczowego dla układów mocy w pojazdach, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012/11b
- [30]Raj E., Lisik Z., Rudzki J., Langer M., Widerski T., Cooling microstructure for power devices, *Proc. XVIII Symposium EPNC 2004*, Poznan, Poland, 2004, 85-86
- [31]Raj E. *Mikrokanalowe chłodzenie cieczowe w zintegrowanych systemach elektronicznych*, rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 2004;
- [32]Raj E., Lisik Z., Langer M., Rudzki J., Super Cooling Structures for Power Electronics, *EPE 2005, 11th European Conference on Power Electronics and Applications*, Drezno, 2005,
- [33]Raj E., Lisik Z., Langer M., Tosik G., Woźny J., The Numerical Approach to Analysis of Microchannel Cooling Systems, *5th International Conference Computational Science - ICCS 2005*, Atlanta, GA, Stany Zjednoczone, 22-25 maja 2005, *Lecture Notes in Computer Science, Proceedings*, Part 1; No. 3514, 2005, str. 876-883
- [34]Raj E., Stefański Ł., Lisik Z., Mikrostruktury chłodzące do zastosowań w układach scalonych, *Elektronika- Konstrukcje, Technologie, Zastosowania*, nr 11, 2007, str. 82-84
- [35]Widerski T., Raj E., Lisik Z., Kubiak A., Cooling microstructure for Automotive Electronic Module, *Proc. of IEEE EUROCON'2007*, Warsaw, Poland, 2007
- [36]Widerski T., Raj E., Lisik Z., Microchannels - New Concept for Automotive Electronic Module Cooling, *Intern. Conf. Microtechnology and Thermal Problems in Electronics MicroTherm'2007*, Łódź 2007, str. 141-147
- [37]Widerski T., Raj E., Olwert M., Lisik Z., Mikrokanalowy układ chłodzenia cieczowego dla układów mocy w pojazdach, *Krajowa Konferencja Elektroniki KKE 2012*, Darłowo: 11-14 czerwca 2012,
- [38]Raj E., Lisik Z., Gozdur R., Fiks W., New Package for Disc Type Power Diodes, *Materials Science and Engineering: B* 09/2012; 177(15):1304–1309.
- [39]Piergiorgio M., Pompy układów chłodzenia, cz.1, *Autonaprawa*, październik 2011
- [40]CASTROL Polska - Płyny eksploatacyjne – płyny chłodzące, *materiały informacyjne*
- [41]Gołębiowski J., Temperature Measurement System with Applied POF Sensors, *Proceedings of International Conference on Systems*, Corfu Island 2010, p. 54-56.
- [42]Gołębiowski J., Gozdur R., Majocho A., Raj E., System to measurement of parameters of thermal flux in arrangement of cooling of structures of semi-conductive powers, *Electrical Review*, 87 (1), pp134-136, 2011

Autorzy: dr inż. Tomasz Widerski, E-mail: tomasz.widerski@p.lodz.pl; dr inż. Ewa Raj, E-mail: ewa.raj@p.lodz.pl; prof. dr hab. inż. Zbigniew Lisik, E-mail: zbigniew.lisik@p.lodz.pl; Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924, Łódź; dr inż. Przemysław Kubiak, E-mail: przemyslaw.kubiak@p.lodz.pl, Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924, Łódź;