

dr inż. Jakub Korta

E-mail: jakub.korta@ieee.org

dr hab. inż. Paweł Skruch

Akademia Górniczo - Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Automatyki i Robotyki
al. A. Mickiewicza 30, 30-059, Kraków, Poland
E-mail: pawel.skruch@agh.edu.pl

Koncepcja integracji komory parowej z obudową układów elektronicznych w celu zwiększenia ich niezawodności

Streszczenie: Systematycznie wzrastająca moc obliczeniowa oraz postępująca miniaturyzacja urządzeń elektronicznych stosowanych w pojazdach samochodowych powodują trudności w utrzymaniu temperatury pracy elementów półprzewodnikowych w dozwolonym zakresie, przyczyniając się do ich przedwczesnego zużycia, a w skrajnych przypadkach, uniemożliwiając nawet ich normalną pracę. Wydajne i trwałe układy chłodzące stają się więc nieodzownym komponentem współczesnych podzespołów samochodowych, o krytycznym znaczeniu dla ich niezawodności. Urządzeniami mogącymi w niedalekiej przyszłości wspomagać działanie układów chłodzenia systemów elektronicznych wykorzystywanych w motoryzacji są komory parowe (płaskie rurki cieplne), w których transport energii termicznej zachodzi poprzez przemianę fazową i samoistne przemieszczanie się czynnika roboczego. Współcześnie, tego rodzaju urządzenia nie są komercyjnie stosowane w układach chłodzenia sterowników samochodowych, pozostając przedmiotem prac badawczo-rozwojowych związanych z ich wpływem na szeroko pojętą niezawodność termomechaniczną urządzeń elektronicznych. W niniejszym artykule opisano koncepcję zintegrowania komory parowej z aluminiową obudową kontrolera elektronicznego pracującego w warunkach podwyższonej temperatury otoczenia, odpowiadającej warunkom użytkowania komponentów samochodowych. Ponadto, oceniono poddano wpływ zastosowania tego urządzenia na temperaturę pracy chłodzonego elementu półprzewodnikowego i jego niezawodność, wyrażoną jako przewidywany czas jego bezawaryjnego funkcjonowania.

Słowa kluczowe: *chłodzenie, elektronika, analiza termiczna, rurka cieplna, komora parowa, przemiana fazowa, motoryzacja, niezawodność*

1. Potrzeba chłodzenia urządzeń elektronicznych

W ostatnich latach, w branży motoryzacyjnej obserwuje się coraz większe zainteresowanie systemami elektronicznymi wysokiej mocy, pozwalającymi na podniesienie komfortu i bezpieczeństwa podróży. Istotnym obszarem wykorzystania wysokowydajnej elektroniki samochodowej są systemy multimedialne (infotainment) oraz różnego typu zaawansowane systemy wspomagania kierowcy, nazywane zbiorczo systemami ADAS (*ang.* Advanced Driver Assistance Systems). Działanie sterowników ADAS oparte jest na akwizycji różnego rodzaju sygnałów – pochodzących np. z modułów komunikacji bezprzewodowej, kamer, radarów,

czujników ultradźwiękowych, itd. – i wysokowydajnym ich przetwarzaniu, co ze względów bezpieczeństwa, często wykonywane jest w czasie bliskim rzeczywistemu.

Rejestrowanie i analizowanie tak dużych strumieni informacji wymaga wykorzystania istotnych mocy obliczeniowych, czego częstym, niepożądanym efektem jest wytwarzanie nadmiernych ilości ciepła. W konsekwencji często prowadzi to do znaczącego podniesienia temperatury elementów elektronicznych, wydatnie skracając okres ich bezawaryjnego funkcjonowania, a w skrajnych przypadkach, skutkować może nawet zatrzymaniem ich pracy. Istotnym czynnikiem jest również temperatura otoczenia na działanie której narażone są komponenty samochodowe, której wartość nierzadko przekracza 50°C , utrudniając utrzymanie termicznych parametrów pracy elementów półprzewodnikowych poniżej dopuszczalnych wartości granicznych. Według wyników badań przytoczonych w [20], wysoka temperatura pracy systemów elektronicznych była przyczyną 49% przypadków wycofania wadliwych produktów ze sprzedaży, odnotowanych w branży samochodowej w latach 2005-2015. Jak podano w [6,16], obok drgań mechanicznych, wysoka temperatura pracy oraz jej cykliczne zmiany są najczęstszymi przyczynami zużycia urządzeń elektronicznych.

Przewiduje się, że pomimo ciągłej optymalizacji algorytmów obliczeniowych oraz zmian technologii produkcji układów scalonych, w niedalekiej przyszłości kompletne samochodowe systemy elektroniczne, w szczególności kontrolery jazdy autonomicznej, wytwarzać będą coraz większe strumienie ciepła, o wartościach przekraczających 1kW [8]. Aby umożliwić funkcjonowanie takich systemów, dąży się do opracowania wydajnych, niezawodnych i zarazem tanich metod chłodzenia, umożliwiających dyssypację strumieni ciepła dużej gęstości, rzędu kilkudziesięciu watów wytwarzanych przez elementy półprzewodnikowe o powierzchniach kilku cm^2 . Przykładem takiego urządzenia może być układ Nvidia Xavier, dedykowany do zadań jazdy autonomicznej, wytwarzający do 30W TDP (*ang.* Thermal Design Power), na półprzewodniku o powierzchni 3.5cm^2 .

Niepożądany wpływ działania podwyższonej temperatury pracy komponentów elektronicznych na ich niezawodność jest szeroko opisywany w literaturze naukowo-technicznej. W [10] autorzy zaprezentowali przegląd mechanizmów zniszczenia wywołanych działaniem wysokiej temperatury obserwowanych na poziomie układów scalonych oraz ich wpływ na niezawodność tych urządzeń. Wynik oddziaływania cykli temperaturowych na niezawodność tranzystorów wysokiej mocy wykorzystywanych w motoryzacji opisano w [18]. Autorzy [11] przedstawili próbę eksperymentalnego oszacowania wytrzymałości zmęczeniowej elementów sterownika samochodowego narażonego na cykliczne oddziaływanie wysokich temperatur. Nowatorska metoda prowadzenia przyspieszonych badań starzeniowych tego typu została opisana w [19]. W [22] przedstawiono metodę predykcji niezawodności układów elektronicznych opartą na tzw. modelu fizyki uszkodzeń – PoF (*ang.* Physics of Failure), uwzględniającym zmiany temperatury pracy układu scalonego na jego wytrzymałość termomechaniczną. W [4] opisano analizę niekorzystnego wpływu termicznych warunków pracy na niezawodność urządzeń i systemów

elektronicznych wykorzystywanych we współczesnych systemach ADAS oraz procedurę pozwalającą na diagnozowanie tego rodzaju problemów już na wstępnym etapie ich projektowania. Szczegółowy przegląd współcześnie stosowanych metod analitycznych i eksperymentalnych stosowanych w szacowaniu niezawodności komponentów elektronicznych opisano w [5]. Wykorzystanie techniki chłodzenia układów elektronicznych opartej na zjawisku zmiany fazy (odparowania i kondensacji) czynnika chłodzącego oraz jego wysoką wydajność opisano w [1] oraz w [3]. W obu przytoczonych przykładach zastosowano aktywne układy chłodzenia, wykorzystujące konwekcję wymuszoną do rozproszenia energii termicznej. Systemy takie wymagają szeregu dodatkowych urządzeń, jak wymiennik ciepła, pompa, zawory, przewody, etc., dlatego pomimo wysokiej wydajności, aktywne systemy chłodzenia elektroniki w motoryzacji stosowane są w ograniczonym zakresie. Wykorzystanie zjawiska przemiany fazowej zachodzącej w pasywnym urządzeniu chłodzącym – komorze parowej (płaskiej rurce cieplnej) – walidację modelu jego modelu numerycznego oraz porównanie z działaniem płyty miedzianej przedstawiono w [13]. Autorzy [17] przedstawili szczegółowe porównanie działania komór parowych i płytek miedzianych w różnych konfiguracjach, stosowanych jako rozpraszacze strumienia ciepła zintegrowane z elementami półprzewodnikowymi. W obu tych pracach wskazano na większą wydajność urządzeń wykorzystujących przemianę fazową.

W przestrzeni publicznej znaleźć można niewiele publikacji dotyczących zastosowania komór parowych lub rurek cieplnych do chłodzenia systemów elektronicznych wykorzystywanych w pojazdach transportu drogowego. W [12] opisowo przedstawiono przegląd potencjalnych możliwości wykorzystania dwufazowych urządzeń chłodzących w konstrukcjach samochodowych. W artykule tym wyszczególniono następujące potencjalne obszary zastosowania tego rodzaju urządzeń: kontrola temperatury reflektorów wykorzystujących diody LED, układy chłodzenia baterii pojazdów elektrycznych oraz elementów sterowników elektronicznych. Wykorzystanie rurek cieplnych w układzie chłodzenia motocyklowej lampy przedniej wyposażonej w diody LED opisano w [15]. W odniesieniu do klasycznego rozwiązania, autorzy zauważyli nieznaczną poprawę niezawodności tak zaprojektowanego urządzenia. W [14] zaproponowano zastosowanie komory parowej do dyssypacji energii termicznej generowanej przez moduł tranzystorów wysokiej mocy, odnotowując obniżenie temperatury poszczególnych komponentów o około 9 °C. Ponadto, wykazano zmniejszenie gradientu temperatury na powierzchni modułu, co w wydatny sposób poprawia niezawodność mechaniczną całego ustroju. W [9] zaproponowano zastosowanie rurki cieplnej jako urządzenia wspomagającego chłodzenie komponentów radia samochodowego, działającego w temperaturze pokojowej, bez dodatkowych elementów wymuszających obieg powietrza. Opisany w artykule rezultat to redukcja temperatury głównego źródła ciepła o około 3 °C.

Niniejszy artykuł przedstawia koncepcję zintegrowania niewielkiej komory parowej z obudową sterownika elektronicznego, pracującego w temperaturze otoczenia odpowiadającej warunkom użytkowania komponentów samochodowych. Celem przeprowadzonej i opisanej w artykule analizy jest zrozumienie wpływu zastosowania płaskiej rurki cieplnej na temperaturę złącza (t_j)

chłodzonego komponentu elektronicznego oraz oszacowanie zmiany długości oczekiwanego czasu bezawaryjnego funkcjonowania jego elementu półprzewodnikowego. Wobec ograniczonej dostępności prac poświęconych pasywnym systemom chłodzenia sterowników samochodowych opartych na zjawisku przemiany fazowej czynnika roboczego, artykuł ten stanowić może istotne źródło informacji dla inżynierów i naukowców zainteresowanych termomechaniczną niezawodnością urządzeń elektronicznych wykorzystywanych w pojazdach drogowych.

Rozdział 2 niniejszego artykułu przedstawia podstawowy podział metod chłodzenia urządzeń elektronicznych oraz opisuje fizyczne mechanizmy transportu ciepła, które należy w tym kontekście rozważać. Rozdział 3 prezentuje zasady działania pasywnych urządzeń wspomagających transport energii termicznej poprzez wykorzystanie przemiany fazowej czynnika roboczego. W rozdziale 4 zaprezentowano studium koncepcji integracji komory parowej z aluminiową obudową urządzenia elektronicznego. W rozdziale 5 przedstawiono szacowany wpływ tej modyfikacji na przewidywaną długość czasu użytkowania chłodzonego komponentu elektronicznego. Rozdział 6 zawiera podsumowanie artykułu i wnioski płynące z przedstawionych w nim rozważań.

2. Chłodzenie urządzeń elektronicznych

Systemy chłodzenia elektroniki podzielić można na dwie grupy: systemy pasywne i aktywne. Pierwsza grupa opiera swoje działanie wyłącznie o naturalne procesy wymiany ciepła, tj. przewodzenie, konwekcję i promieniowanie. Systemy aktywne wspomagają te zjawiska poprzez zastosowanie urządzeń wymagających zewnętrznych źródeł energii, takich jak wentylatory lub pompy cieczy chłodzących. Inny podział spotykany w literaturze przedmiotu zakłada podział na metody chłodzenia wykorzystujące czynnik roboczy niezmienny stanu skupienia (np. chłodzenie powietrzem) oraz takie, w których czynnik roboczy zmienia fazę (np. odparowanie i kondensacja wody). Wybór odpowiedniej metody i urządzenia chłodzącego uzależniony jest od ilości ciepła jakie należy usunąć z chłodzonych komponentów. W rozwiązaniach spotykanych w branży samochodowej, preferowane są pasywne metody chłodzenia, ponieważ, ze względu na brak elementów ruchomych, ich zastosowanie wiąże się z mniejszym ryzykiem awarii. Ponadto, brak konieczności zasilania, pozytywnie wpływa na całościowy bilans energetyczny systemu.

Wspomniane mechanizmy wymiany ciepła, tj. przewodzenie, konwekcję oraz promieniowanie, opisać można za pomocą wzorów (1) – (3) [2]. W przypadku przewodzenia, ilość ciepła jaka przepływa przez element w jednostce czasu wyrażona jest poprzez wzór (1):

$$\dot{Q} = -k \frac{\Delta T A}{\Delta x} \quad (1)$$

gdzie: \dot{Q} [W] – strumień ciepła mierzony w jednostce czasu, ΔT [K] – różnica temperatur w kierunku przepływu ciepła, Δx [m] – grubość elementu, A [m²] – powierzchnia przekroju poprzecznego elementu, k [$\frac{W}{m \cdot K}$] – przewodność cieplna przewodzącego materiału.

Drugim wspomnianym mechanizmem wymiany ciepła jest konwekcja, która rozumiana jest jako makroskopowy ruch gazu lub cieczy. Jeśli wywołana jedynie poprzez niejednorodną gęstość płynu, konwekcja nazywana jest swobodną (naturalną). Wywołana obecnością czynnika zewnętrznego, np. działaniem urządzenia wentylacyjnego, nazywana jest konwekcją wymuszoną. Przepływ ciepła wywołany konwekcją opisać można równaniem (2):

$$\dot{Q} = Ah(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

gdzie: T_s [K] oraz T_∞ [K] – kolejno temperatura źródła ciepła oraz otoczenia, mierzona w dostatecznie dużej odległości. Współczynnik h [$\frac{W}{m^2K}$] to współczynnik wnikania ciepła, zależny od kształtu i stanu powierzchni, rodzaju konwekcji i innych czynników. Mechanizm konwekcji jest często wykorzystywany zarówno w pasywnych (radiatory) jak i aktywnych układach chłodzenia (wentylatory).

Ostatnim wspomnianym powyżej zjawiskiem fizycznym powodującym wymianę ciepła jest promieniowanie termiczne. Jest to mechanizm wywołany powstawaniem fal elektromagnetycznych, wzbudzanych przez poruszające się w materii cząsteczki posiadające ładunek elektryczny. Podobnie jak w przypadku powyższych zjawisk, również promieniowanie dotyczy każdej substancji, której temperatura jest wyższa niż zero bezwzględne. Ilość wypromieniowanego ciepła w jednostce czasu opisać można za pomocą wzoru (3):

$$\dot{Q} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_A^4) \quad (3)$$

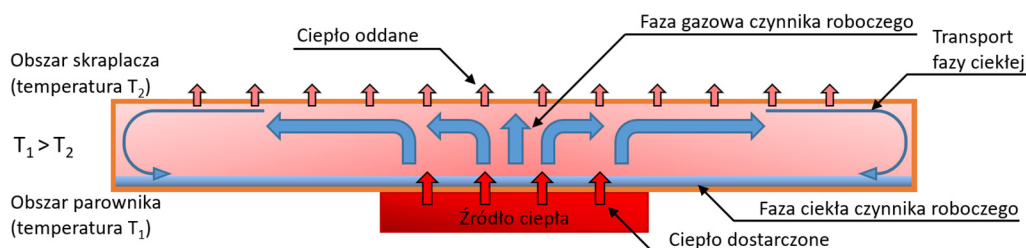
gdzie: ε – bezwymiarowy współczynnik emisyjności zależny od rodzaju powierzchni źródła ciepła, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ [$\frac{W}{K^4m^2}$] – stała Stefana – Boltzmann, T_A [K] – temperatura otoczenia.

W praktyce, wszystkie opisane zjawiska jednocześnie przyczyniają się do dyssypacji energii termicznej chłodzonych urządzeń, umożliwiając ich pracę w dopuszczalnym zakresie temperatur. Wpływ każdego z nich z osobna jest zależny od zamysłu konstruktorskiego oraz warunków otoczenia, w jakim pracuje urządzenie.

3. Dwufazowe metody chłodzenia

Jednym z możliwych rozwiązań stosowanych w pasywnych systemach odprowadzania ciepła są metody oparte o zjawisko przemiany fazowej czynnika chłodzącego. Przemiana ta następuje najczęściej pomiędzy stanem ciekłym, a gazowym. W jej trakcie występuje odebranie lub oddanie energii w postaci ciepła, z lub do otoczenia, co związane jest ze zmianą stanu skupienia substancji. Na potrzeby chłodzenia elektroniki, zjawisko to wykorzystywane jest najczęściej w rurkach cieplnych lub komorach parowych (tzw. płaskich rurkach cieplnych). Jak pokazano schematycznie na przykładzie budowy komory parowej na Rys. 1, w konstrukcji tych urządzeń wyróżnić można strefy pełniące odrębne funkcje. W obszarze parownika, ze względu na podwyższoną temperaturę, czynnik roboczy ulega odparowaniu, zmieniając stan skupienia

z ciekłego na gazowy. W trakcie tego procesu pobierana jest ze ścianek urządzenia niezbędna energia, w ilości odpowiadającej ciepłu parowania wykorzystanej substancji. Następnie, w postaci gazowej, czynnik przemieszcza się wewnątrz komory do skraplacza. Ze względu na niższą temperaturę tego obszaru, następuje w nim odwrotna do poprzedniej przemiana fazowa, powodując powrót czynnika roboczego do stanu ciekłego. W trakcie tego procesu następuje wyzwolenie do otoczenia energii termicznej, w ilości równej ciepłu parowania. Następnie, skroplony czynnik roboczy przemieszcza się do parownika, gdzie opisany cykl rozpoczyna się na nowo. Transport skroplonego czynnika możliwy jest dzięki wykorzystaniu specjalnie dobranych struktur (porowatych lub kształtowych), wzdłuż których ciecz przemieszcza się w efekcie działania sił kapilarnych.



Rys. 1. Schemat działania dwufazowego systemu chłodzenia na podstawie komory parowej.

W urządzeniach elektronicznych użytkowej, najczęściej stosowanym czynnikiem roboczym jest woda demineralizowana. Rzadziej stosowane są inne substancje, jak metanol lub aceton. Do specyficznych zastosowań, stosuje się również inne czynniki robocze, których wybór podyktowany jest m.in. możliwą temperaturą pracy. Ciepło przemiany fazowej popularnych czynników roboczych mierzone w temperaturze ich wrzenia h_e [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$] zestawiono w Tabeli 1.

Tab. 1. Ciepło parowania popularnych czynników roboczych dwufazowych systemach chłodzenia [2].

Czynnik roboczy	Ciepło parowania h_e [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$]
Woda	2257
Metanol	1100
Aceton	518

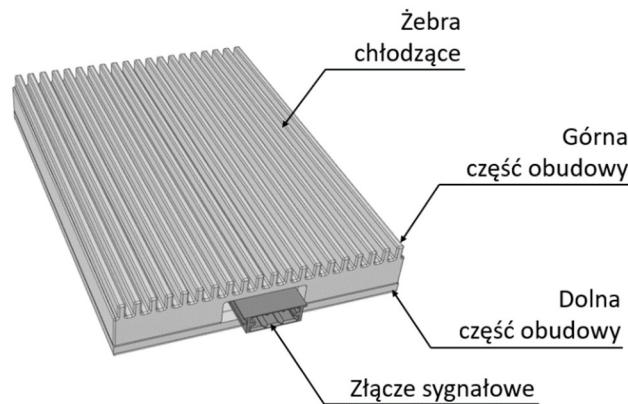
Rezultatem zastosowania opisanych urządzeń jest transport energii termicznej z obszaru parownika, do obszaru skraplacza, a więc od źródła ciepła do wybranego rejonu, gdzie ulega ona rozproszeniu do otoczenia.

W dalszej części artykułu opisano koncepcję zastosowania komory parowej na potrzeby obniżenia wartości temperatury pracy urządzenia elektronicznego, zamkniętego w obudowie aluminiowej. Porównano wynik działania tak zaprojektowanego pasywnego systemu chłodzenia

z działaniem klasycznego rozwiązania, opartego o przewodzenie ciepła, od jego źródła, bezpośrednio do obudowy wyposażonej w uźebrowanie chłodzące. Na potrzeby oszacowania wydajności obu wariantów konstrukcyjnych przeprowadzono analizy numeryczne wykorzystując metodę obliczeniowej mechaniki płynów - CFD (*ang.* Computational Fluid Dynamics).

4. Koncepcja zastosowania komory parowej

Rysunek 2 przedstawia analizowane urządzenie zamknięte w dwuczęściowej obudowie wykonanej ze stopu aluminium EN AC-44300 ($k_{Al} = 130 \frac{W}{m \cdot K}$). W celu zwiększenia powierzchni wymiany ciepła z otoczeniem, górna część obudowy pokryta została żebrami chłodzącymi. Ponadto, na rysunku widoczne jest złącze sygnałowe, za pośrednictwem którego wewnętrzny układ elektroniczny jest zasilany oraz komunikuje się z urządzeniami peryferyjnymi.

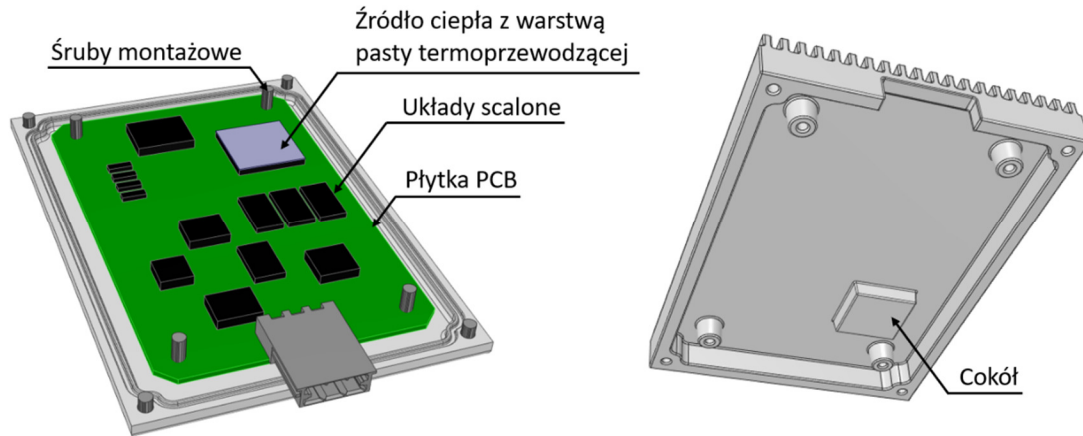


Rys. 2. Analizowane urządzenie elektroniczne zamknięte w aluminiowej obudowie.

Rysunek 3 przedstawia wnętrze urządzenia, na które składają się: obwód drukowany PCB wraz z komponentami elektronicznymi oraz śruby montażowe. Jeden z zamontowanych wewnątrz urządzenia układów scalonych (Komponent I) wydziela podczas pracy moc $P = 18W$, podczas gdy całkowita moc generowana przez urządzenie to $20.84W$ (Rys. 4). Aby umożliwić przepływ energii termicznej od tego układu scalonego na zewnątrz urządzenia, w pierwszej iteracji projektowej połączono jego górną powierzchnię z obudową. Dla zmniejszenia powierzchniowej rezystancji termicznej tego połączenia, pomiędzy układem scalonym, a cokołem obudowy zastosowano warstwę pasty termoprzewodzącej. Tak przygotowany model został w dalszej kolejności poddany analizie numerycznej, na potrzeby której założono, że temperatura otoczenia w jakiej pracować będzie opisywany sterownik wynosić będzie $t_{amb} = 55^{\circ}C$. Największa dopuszczalna temperatura złącza dla Komponentu I wynosi $t_j^{max} = 125^{\circ}C$, do której określenia wymagana jest znajomość wartości temperatury na górnej, zewnętrznej powierzchni jego obudowy t_{pow} . Wykorzystując tę informację, rzeczywistą temperaturę złącza t_j oszacować można stosując wzór (4) [2]:

$$t_j = t_{pow} + (R_{\theta jc} \cdot P) \quad (4)$$

gdzie poprzez $R_{\theta jc}$ oznaczono współczynnik rezystancji termicznej pomiędzy obszarem złącza wewnątrz układu scalonego, a górną powierzchnią jego obudowy. Wielkość $R_{\theta jc}$ najczęściej podana jest przez producenta, a dla analizowanego komponentu wynosi $R_{\theta jc} = 1.22 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$.

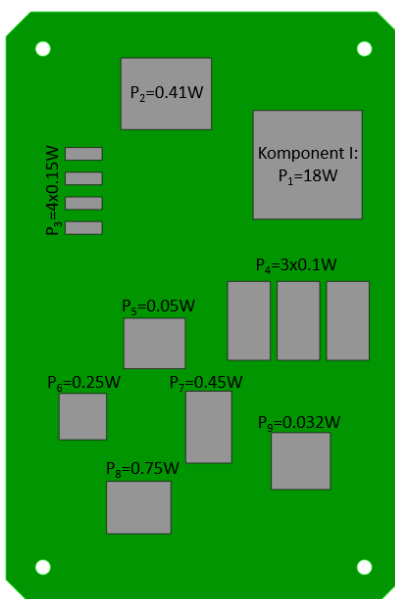


Rys. 3. Wnętrze analizowanego urządzenia, wyposażonego w pojedynczy cokół na obudowie.

4.1. Wyniki analiz numerycznych

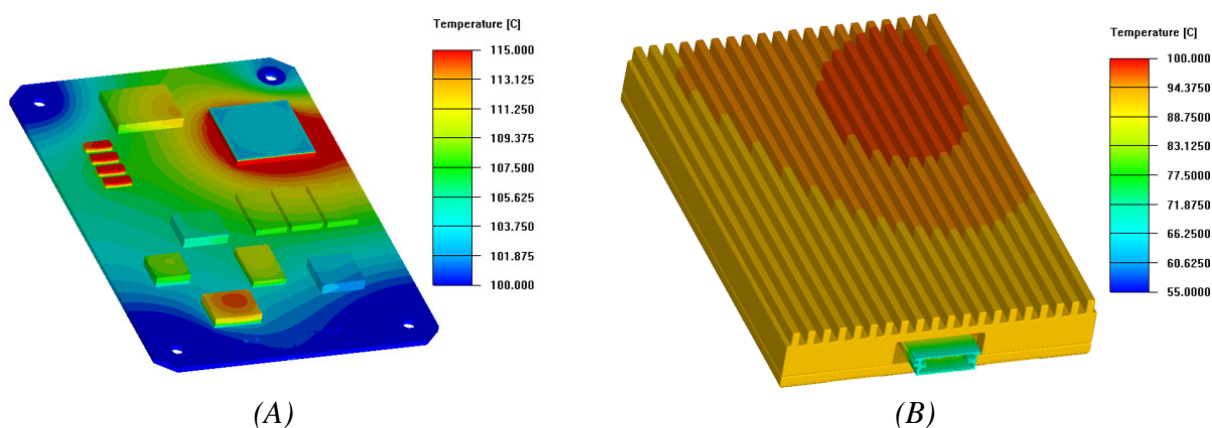
Opisane w niniejszym artykule symulacje numeryczne prowadzone były z wykorzystaniem metody CFD, pozwalającej na analizę zmienności przebiegu parametrów obliczeniowych w trójwymiarowej przestrzeni modelu. W celu opisanego ruchu płynu (powietrza) w obszarze dziedziny obliczeniowej (wewnątrz i na zewnątrz urządzenia), zastosowana metoda dostarczyła rozwiązania równań Naviera – Stokesa. W obliczeniach uwzględniono również przestrzenny transport energii termicznej, realizowany za pośrednictwem jednocześnie występujących zjawisk promieniowania, konwekcji i przewodzenia. Przyjęto, że wymiana ciepła z otoczeniem zachodzi w procesie konwekcji naturalnej, którą odwzorowano stosując model Boussinesq. W odniesieniu do przepływu powietrza przyjęto, że w całej dziedzinie obliczeniowej będzie on laminarny. Proces promieniowania cieplnego uwzględniono w symulacjach stosując model DO (*ang.* Discrete Ordinates), zakładający dyskretną liczbę kierunków promieniowania z każdego źródła – zastosowano pięciokrotny podział każdego z oktantów zarówno w kierunkach azymutalnym jak i zenitalnym. Problem obliczeniowy zdefiniowany został jako zagadnienie rozwiązywane w stanie ustalonym. Modele przygotowane na potrzeby opisanych analiz składały się z około 4 milionów elementów. Warunkiem zatrzymania każdej z opisanych symulacji było osiągnięcie odpowiednio małych wartości residuów dla rozwiązywanych równań zachowania masy, prędkości oraz transportu energii (kolejno 10^{-4} , 10^{-4} i 10^{-8}) oraz przy pomijalnie małych zmianach wartości temperatury obserwowanej na powierzchni źródła ciepła w kolejnych iteracjach obliczeń.

Rysunek 5 prezentuje rezultat symulacji numerycznej, przedstawiający pole temperatury na powierzchni obwodu drukowanego oraz na pozostałych komponentach elektronicznych. Jak odczytano z wyników analizy, wartość temperatury górnej powierzchni Komponentu I sięga około 103.7°C .



Rys. 4. Moc komponentów analizowanego układu elektronicznego.

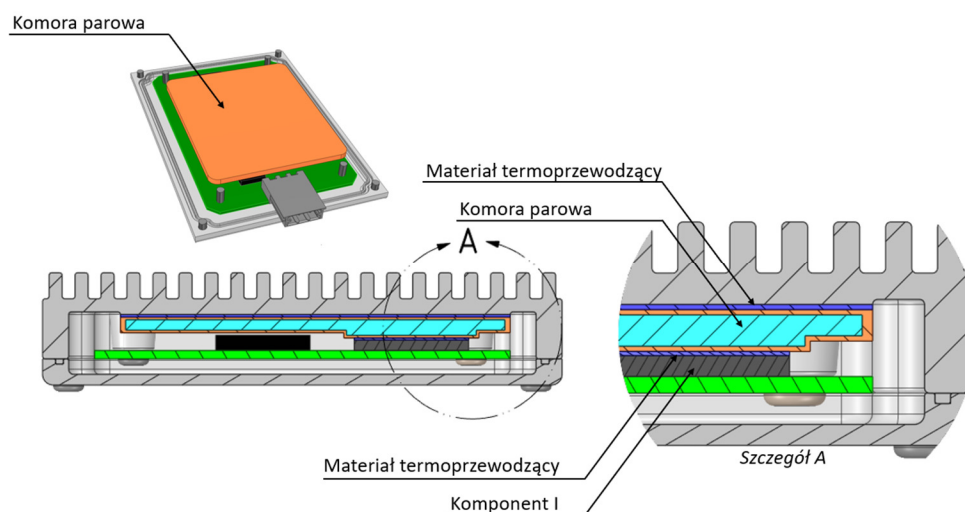
Na podstawie wzoru (4), temperatura złącza analizowanego układu scalonego wynosi w tym wypadku: $t_j = 103.7 + (1.22 \cdot 18) = 125.66^\circ\text{C}$, nieznacznie wykraczając poza dopuszczalny limit 125°C . Niemniej jednak, możliwe zmiany warunków pracy urządzenia (np. zabrudzenie powierzchni obudowy lub zwiększonego zewnętrznego promieniowania termicznego pochodzącego od innych urządzeń znajdujących się w pobliżu), powodować mogą dalsze przekroczenie tej wartości, powodując potencjalne problemy związane z eksploatacją rozważanego komponentu oraz wydatnie skrócić jego żywotność.



Rys. 5. Wyniki analizy termicznej sterownika bez komory parowej: rozkład pola temperatury dla obwodu drukowanego i układów scalonych (A) oraz na obudowie urządzenia (B).

W celu poprawy warunków użytkowania rozważanego urządzenia, w kolejnej iteracji projektowej podjęto próbę zintegrowania go z komorą parową, której obecność miała na celu zwiększenie efektywności odprowadzania ciepła od Komponentu I, do otoczenia. Założono, że

czynnikiem roboczym w komorze będzie woda demineralizowana, jej obudowa zaś wykonana będzie z miedzi charakteryzującej się współczynnikiem przewodności cieplnej $k_{Cu} = 385 \frac{W}{m \cdot K}$. Wymiary zewnętrzne tego komponentu to 75x90x4 mm. Jak pokazano na Rys. 6, komora została umieszczona w obudowie sterownika w taki sposób, aby pozostawać w kontakcie jednocześnie z górną powierzchnią analizowanego układu scalonego oraz obudową sterownika. Aby zmniejszyć rezystancję termiczną występującą na styku tych komponentów, z obu stron komory parowej zastosowano warstwę materiału termoprzewodzącego ($k = 3.5 \frac{W}{m \cdot K}$) o grubości warstwy równej 0.5mm.

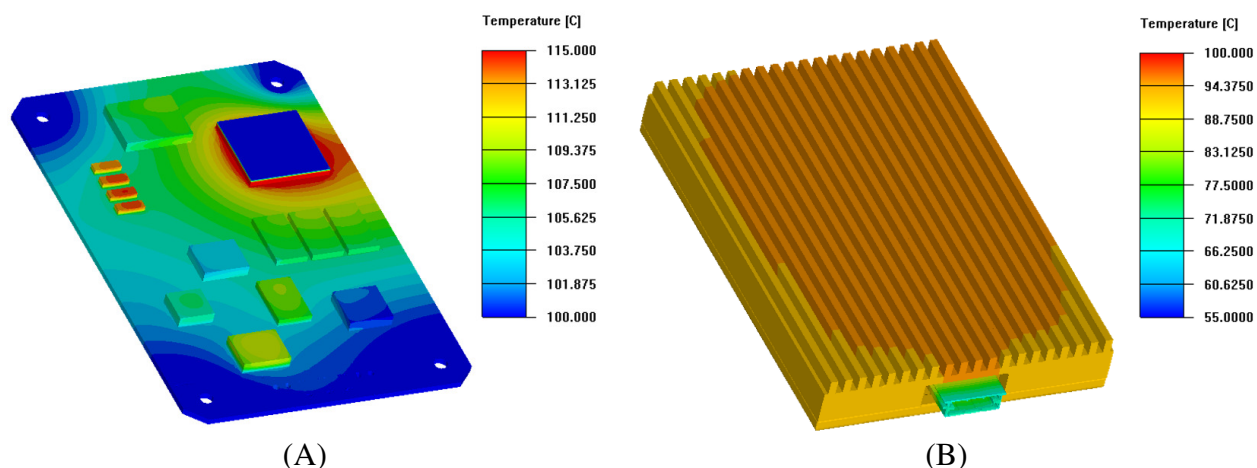


Rys. 6. Komora parowa zintegrowana z obudową analizowanego sterownika.

W celu efektywnego wykorzystania działania komory parowej zmodyfikowano kształt cokołu wewnętrznego obudowy sterownika w taki sposób, aby przylegał on do komory parowej na całej jej górnej powierzchni. Tak przygotowany model geometryczny poddany został analizie numerycznej, na potrzeby której założono, że urządzenia to pracować będzie w warunkach procesu ustalonego. Ponadto, założono, że opisać je można stosując izotropowy model materiałowy. Takie podejście powszechnie stosowane jest w celu uproszczenia opisu zjawisk występujących wewnątrz komory (tj. parowania, transportu fazy gazowej czynnika roboczego, skraplania oraz przemieszczania się fazy ciekłej wywołanym oddziaływaniem kapilarnym ze strukturą porowatą). Autorzy prac [7] oraz [13] przedstawili wyniki badań związanych z uproszczeniem modelowania zachowania komór parowych, dochodząc do zbieżnych wniosków mówiących o możliwości opisu tych urządzeń jako homogenicznych bloków materiału o wysokiej przewodności termicznej, której wartość sięga $8300 - 10000 \frac{W}{m \cdot K}$. W pracy [13] opisano zależność pomiędzy zastępczą przewodnością termiczną uproszczonego modelu komory parowej, a jej temperaturą pracy. Zgodnie z przytoczonymi przez autorów obserwacjami, wraz ze wzrostem temperatury źródła ciepła, wzrasta również wartość szacowanej przewodności zastępczej urządzenia. Jest to podyktowane intensywnością odparowania czynnika roboczego, zmianą rozkładu i wartości pola ciśnienia panującego w komorze parowej oraz, w konsekwencji,

zmianą sposobu rozprzestrzeniania się pary czynnika roboczego we jej wnętrzu. Z przedstawionych w [13] wyników eksperymentalnych wynika, że dla komory parowej pracującej w temperaturze o 50°C wyższej niż temperatura otoczenia, przewodność zastępcza urządzenia osiąga wartość około $9750 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$.

Na potrzeby opisanej poniżej symulacji przyjęto, że modelowana komora posiadać będzie izotropową charakterystykę przewodności termicznej, opisaną wartością zastępczą równą $k_{kp} = 9000 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$. Rysunek 7 prezentuje wyniki symulacji termicznej tak przygotowanego modelu.



Rys. 7. Wyniki analizy termicznej sterownika z komora parową: (A) rozkład pola temperatury dla obwodu drukowanego i układów scalonych oraz (B) na obudowie urządzenia.

Wyniki zaprezentowane na Rys. 7, pokazują, że temperatura komponentów elektronicznych, obwodu drukowanego oraz obudowy sterownika uległa zmniejszeniu. Szczególnie widoczna jest zmiana temperatury powierzchni Komponentu I, który jest głównym źródłem ciepła w analizowanym sterowniku, a który jak opisano powyżej, jako jedyny pozostawał w kontakcie z komorą. Korzystając ze wzoru (4) oszacować można wpływ zastosowania komory parowej na temperaturę złącza t_j^{kp} rozważanego komponentu. Najwyższa obliczona temperatura na górnej powierzchni Komponentu I wynosi w analizowanym przypadku $t_{max}^{kp} = 99.95^{\circ}\text{C}$, co przekłada się na $t_j^{kp} = 121.91^{\circ}\text{C}$, a więc $\Delta t_j = 125.66^{\circ}\text{C} - 121.91^{\circ}\text{C} = 3.75^{\circ}\text{C}$. Uzyskane drogą symulacyjną wyniki zestawiono w Tab. 2.

Rysunek 7 przedstawia również rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni obudowy urządzenia. Jak zauważyć można, zastosowanie komory parowej w opisany sposób prowadzi do rozproszenia energii termicznej na większym obszarze, a w konsekwencji do zmniejszenia gęstości strumienia ciepła przepływającego przez aluminiową obudowę.

Tab. 2. Zestawienie wyników analiz termicznych omawianego urządzenia.

	<i>Temperatura na powierzchni Komponentu I</i>	<i>Temperatura złącza Komponentu I</i>
<i>Wariant I: Obudowa aluminiowa wyposażona w cokół</i>	103.7°C	125.66°C
<i>Wariant II: Obudowa aluminiowa wyposażona w komorę parową</i>	99.95°C	121.91°C

5. Żywotność Komponentu I

Elementy elektroniczne zbudowane na bazie krzemu, pracując w warunkach podwyższonej temperatury, podlegają szeregowi zjawisk fizyko-chemicznych, powodujących ich przyspieszone starzenie. Do najważniejszych czynników degradacyjnych zaliczyć należy efekt elektromigracji występujący w materiale półprzewodnikowym, polegającym na stopniowym przemieszczaniu się atomów degradującego materiału w warunkach przepływu prądu. Intensywność tego niepożądanego efektu zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury materiału półprzewodnikowego.

Często stosowanym sposobem szacowania tempa zwiększonego zużycia komponentu elektronicznego pracującego w warunkach podwyższonej temperatury jest zastosowanie wzoru Arrheniusa, pozwalającego wyznaczyć szybkość przebiegu procesu degradacyjnego. Jednak, jak opisano w [21], w sytuacji gdy krzemowy element półprzewodnikowy pracuje w temperaturze powyżej 105°C, podejście to nie zapewnia dokładnego opisu przebiegu procesu starzenia. W zamian, wykorzystać można zaproponowaną w [21] procedurę analizy procesu degradacji układów scalonych, opartą o dane empiryczne. Procedura ta pozwala na szacowanie wartości współczynnika przyspieszonego zużycia AF , na podstawie którego, stosując wzór (5), przewidywać można czas poprawnego działania analizowanego komponentu:

$$L_U = L_D \cdot AF \quad (5)$$

gdzie: L_D – nominalna długość czasu pracy komponentu półprzewodnikowego szacowana dla $t_j = 105^\circ\text{C}$, L_U – przewidywana długość czasu pracy w zadanych warunkach.

Według przytoczonej procedury, w zakresie temperatur pracy 110°C – 125°C, zależność pomiędzy wartością współczynnika AF i temperaturą t , opisać można wzorem (6):

$$AF = -0.02t + 2.7 \quad (6)$$

gdzie wartość temperatury t podana jest w stopniach Celsjusza.

Dla omawianego w niniejszym artykule przypadku, współczynnik AF dla Komponentu I, przyjmuje wartości: $AF = 0.19$ oraz $AF^{kp} = 0.26$, kolejno dla wariantu obudowy wyposażonej

w cokół oraz komorę parową. Przy założeniu profilu obciążenia Komponentu I jako ciągłej jego pracy w obliczonych temperaturach $t_j = 125.66^\circ C$ oraz $t_j^{kp} = 121.91^\circ C$, na podstawie zależności (5) obliczyć można, że zastosowanie komory parowej pozwoli na dłuższe jego użytkowanie, przy czym uzysk w tym wypadku wynosić będzie $0.07L_D$, a więc przewidywany czas pracy urządzenia będzie o 7% dłuższy.

6. Podsumowanie

W niniejszym artykule zaprezentowano koncepcję integracji obudowy przykładowego urządzenia elektronicznego pracującego w warunkach podwyższonej temperatury otoczenia z komorą parową. Efekt zastosowania takiej modyfikacji układu odprowadzania ciepła porównano z działaniem klasycznej obudowy wykonanej ze stopu aluminium. Otrzymane na drodze analiz numerycznych wyniki dowodzą, że w porównaniu z klasycznym rozwiązaniem, zastosowanie układu chłodzącego wykorzystującego komorę parową pozwala na obniżenie temperatury złącza krytycznego podzespołu o $\Delta t_j = 3.75^\circ C$. W założonych warunkach otoczenia, zmiana ta skutkuje obniżeniem temperatury pracy materiału półprzewodnikowego poniżej krytycznej wartości $t_j^{max} = 125^\circ C$, wydłużając tym samym przewidywany czas jego użytkowania o $0.07L_D$.

Literatura

1. Aranzabal I, de Alegría I M, Delmonte N, Cova P, Kortabarria I. Comparison of the Heat Transfer Capabilities of Conventional Single-and Two-Phase Cooling Systems for an Electric Vehicle IGBT Power Module. IEEE Transactions on Power Electronics 2018; 34(5): 4185-4194.
2. Cengel Y A. Heat transfer: a practical approach, 2nd Edition. McGraw-Hill Higher Education, 2002.
3. Chainer T J, Schultz M D, Parida P R, Gaynes M A. Improving data center energy efficiency with advanced thermal management. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 2017; 7(8): 1228-1239.
4. Chang N, Pan S, Srinivasan K, Feng Z, Xia W, Pawlak T, Geb D. Emerging ADAS Thermal Reliability Needs and Solutions. IEEE Micro 2018; 38(1): 66-81.
5. Gadalla B, Schaltz E, Blaabjerg F. A survey on the reliability of power electronics in electro-mobility applications. Proceedings of: 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION) 2015; 304-310.
6. Gu J, Pecht M. Predicting the reliability of electronic products. Proceedings of: 8th International Conference on Electronic Packaging Technology 2007; 1-8.

7. Gurevich A, Steiner I, Huang E. Design of thermal systems based on combination of Thermoelectric and Vapor Chamber technologies. Proceedings of: 33rd Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM) 2017; 1-5.
8. Hager M, Gromala P, Wunderle B, Rzepka S. Affordable and Safe High Performance Vehicle Computers with Ultra-Fast On-Board Ethernet for Automated Driving. Advanced Microsystems for Automotive Applications 2018: Smart Systems for Clean, Safe and Shared Vehicles. Springer, 2019.
9. Hammoud J, Dudley S, Apte N. Use of Heat Pipe Technology for Multi Media Thermal Management. Proceedings of: SAE 2006 World Congress & Exhibition 2006; 1-3.
10. Khazaka R, Mendizabal L, Henry D, Hanna R. Survey of high-temperature reliability of power electronics packaging components. IEEE Transactions on power Electronics 2014; 30(5): 2456-2464.
11. Ma X, Guo Y, Wang L, Ji W. Exploration of the reliability of automotive electronic power steering system using device junction electrothermal profile cycle. IEEE Access 2016; 4: 7054-7062.
12. Mochizuki M. Latest development and application of heat pipes for electronics and automotive. Proceedings of: IEEE CPMT Symposium Japan 2017; 87-90.
13. Niittymaki L, Biber C, Carbone M. Flexible CFD simulation model of a thin vapor chamber for mobile applications. Proceedings of: 22nd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC) 2016; 152-157.
14. Qi F, Wang Y, Bob-Manuel C, Li H, Jones S, Li B, Chen Y, Yan Y. Advanced Cooling Solutions of High Power Automotive Module. Proceedings of: PCIM Asia 2017: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management 2017; 1-3.
15. Ram Sundar R, Sarweshwara Sarma N S V. Performance study of motorcycle driving-beam LED headlight with different heat sink models and LED pitch. Proceedings of: 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm) 2017; 784-792.
16. Riches S, Johnston C. Electronics design, assembly and reliability for high temperature applications. Proceedings of: IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) 2015; 1158-1161.
17. Robinson A J, Colenbrander J, Kempers R, Chen R. Solid and Vapor Chamber Integrated Heat Spreaders: Which to Choose and Why. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 2018; 8(9): 1581-1592.
18. Simon D, Boianceanu C, De Mey G, Țopa V. Experimental reliability improvement of power devices operated under fast thermal cycling. IEEE Electron Device Letters 2015; 36(7): 696-698.
19. Sun L, Gu X H, Song P, Di Y. A generalized equivalent temperature model in a time-varying environment. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2017; 19(3): 432-440.

20. Tan C M, Narula U, Kapoor D. Reliability paradox for worldwide automotive electronics. Proceedings of: IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS) 2017; 1-7.
21. Webber A. Calculating Useful Lifetimes of Embedded Processors: Application Report. Texas Instruments Incorporated, 2017.
22. Zeng S, Sun B, Tong C. A modified model of electronic device reliability prediction. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 4(44): 4-9.