

JEDNOFAZOWE SYSTEMY CHŁODZENIA CIECZOWEGO DO ZASTOSOWAŃ W ELEKTRONICE

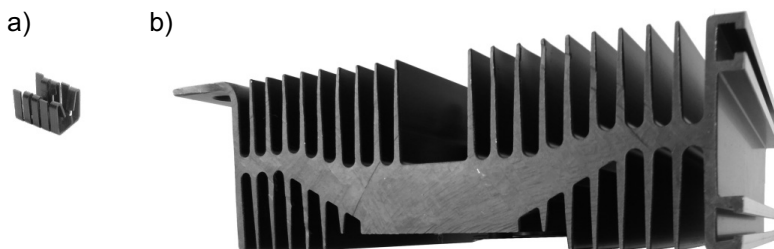
Praca stanowi przegląd komercyjnie dostępnych rozwiązań cieczowych systemów chłodzenia wymuszonego dla zastosowań w różnych obszarach elektroniki, począwszy od energoelektroniki po mikroelektronikę. Przedstawiono i porównano w niej zarówno rozwiązania klasyczne w postaci radiatorów wodnych i płyt chłodzących, jak i aktualnie coraz częściej pojawiające się na rynku mikrokanalowe struktury chłodzące.

WPROWADZENIE

Przepływ prądu we wszystkich elementach elektrycznych i elektronicznych wiąże się z generacją ciepła. W niektórych elementach, takich jak elementy grzejne montowane w czajnikach elektrycznych czy piecach oporowych, zjawisko to jest efektem pożądanym i wykorzystywanym. Niestety jednak, w większości przypadków zjawisko generacji ciepła, szczególnie w zastosowaniach elektronicznych, jest efektem ubocznym mogącym mieć bardzo niekorzystny wpływ na pracę przyrządów, układów, a w konsekwencji całych urządzeń elektronicznych [4, 12].

Zachowanie bezpiecznych warunków pracy elementów elektronicznych wymaga odprowadzenia ciepła generowanego w ich wnętrzu do otoczenia. W efekcie rozwój elektroniki nierozzerwalnie wiąże się z rozwojem systemów jej chłodzenia, a rosnące wymagania dotyczą zarówno materiałów, konstrukcji, jak i sposobów odprowadzania ciepła ze struktur półprzewodnikowych. Wybór metody chłodzenia elementów elektronicznych zależy od typu tych elementów, wielkości i gęstości generowanej w nich mocy oraz dodatkowych uwarunkowań, takich jak np. wymiary elementów i całych urządzeń, środowisko pracy, wymagania niezawodnościowe czy względy ekonomiczne. W jednych obszarach, np. telekomunikacji, podstawowym czynnikiem determinującym wymagania odnośnie do układu chłodzenia jest gęstość rozpraszania mocy, podczas gdy w innych, np. układach napędowych – całkowita moc rozpraszana w elemencie, a jeszcze innych, jak np. elektronika samochodowa, podstawowym czynnikiem mogą okazać się trudne warunki środowiskowe.

Aktualnie do najpopularniejszych rozwiązań systemów chłodzenia elektroniki należą radiatory powietrzne, których przykładowe dwie konstrukcje pokazano na rysunku 1. Pierwszy z nich to wypraska, czyli radiator wykonany z aluminiowej ponacinanej i odpowiednio ukształtowanej blaszki, przeznaczony dla elementów małej mocy [1]. Drugi zaś jest to radiator tłoczony dedykowany dla dwucalowych elementów mocy w obudowach pastylkowych typu Press-Pack [9]. Radiatory powietrzne mogą być wykorzystane w systemach chłodzenia swobodnego w przypadku, gdy odprowadzają ciepło na drodze konwekcji naturalnej oraz wymuszonego – gdy przepływ powietrza wymusza się poprzez zastosowanie dodatkowego wentylatora bądź wentylatorów.



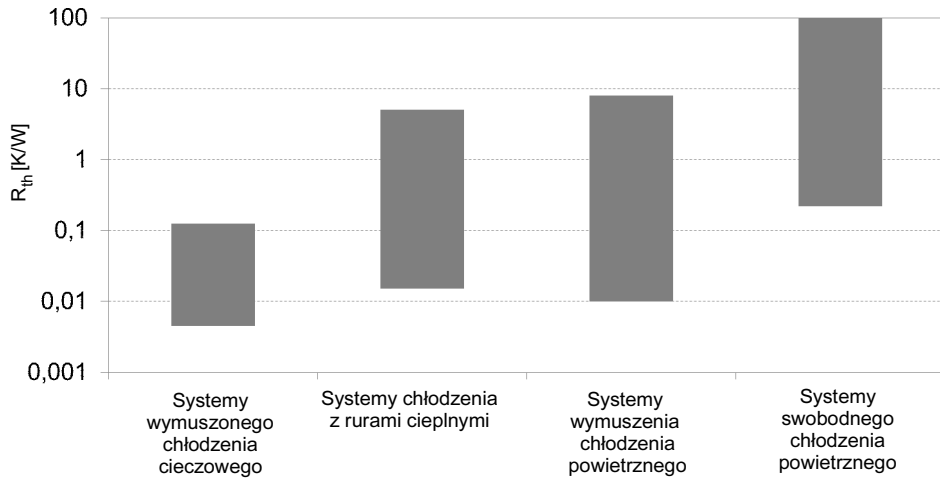
Rys. 1. Radiatory powietrzne: a) wypraska, b) radiator tłoczony

Fig. 1. Air heat sinks: a) stamping, b) extrusion

Niestety, rozwiązania powietrzne, szczególnie w bardziej termicznie wymagających układach, okazują się niewystarczające i są coraz częściej wypierane przez systemy chłodzenia cieczowego.

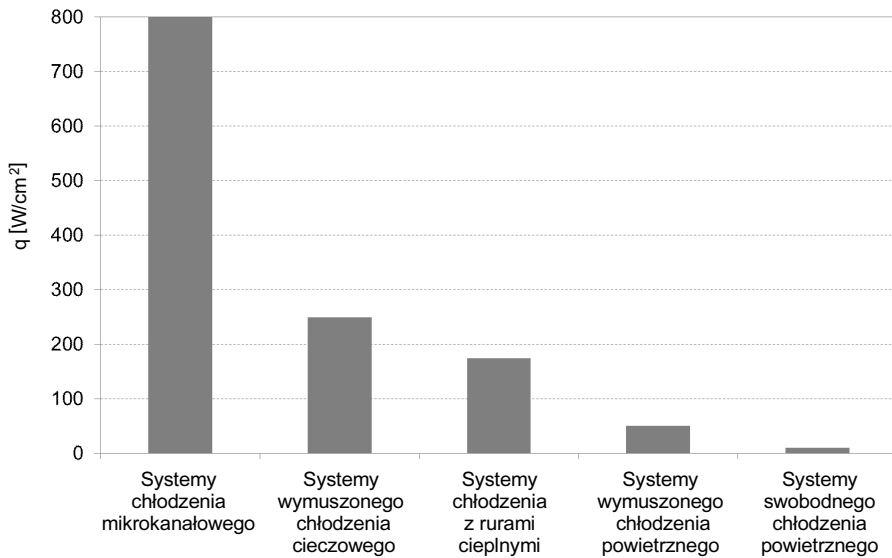
Na rysunku 2 zestawiono wartości rezystancji cieplnych R_{th} systemów powietrznych w porównaniu z rozwiązaniami cieczowymi jedno- i dwufazowymi, czyli z konwencjonalnymi systemami wymuszonego chłodzenia cieczowego, obejmującymi radiatory wodne i płyty chłodzące oraz z systemami chłodzenia korzystającymi z rur cieplnych. Należy podkreślić, iż koszt jednostkowy tych rozwiązań rośnie wraz ze zmniejszaniem się ich rezystancji cieplnej, co wynika bezpośrednio z faktu, że efektywniejsze odprowadzanie ciepła z elementu elektronicznego wymaga zazwyczaj zastosowania bardziej skomplikowanej, a co za tym idzie, droższej technologii.

Dla porównania, na rysunku 3 przedstawiono wydajności poszczególnych rozwiązań w postaci maksymalnej gęstości strumienia odbieranego ciepła q . Zestawienie rozszerzono o systemy chłodzenia mikrokanalowego ze względu na ich potencjalne możliwości oraz szeroki i wciąż rosnący zakres zastosowań. Wydajność teoretyczna tych ostatnich rozwiązań osiąga wartości rzędu 1300 W/cm^2 , a eksperymentalna przekracza 800 W/cm^2 [2, 12, 18].



Rys. 2. Rezystancja cieplna wybranych systemów chłodzenia elementów elektronicznych

Fig. 2. Thermal resistance of chosen cooling systems for electronic elements



Rys. 3. Gęstość strumienia ciepła odprowadzana przez wybrane systemy chłodzenia elektroniki

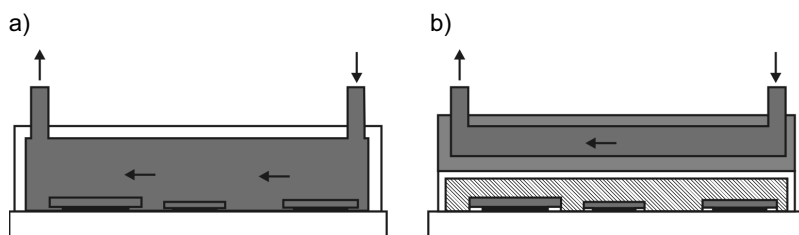
Fig. 3. Heat fluxes for the chosen electronics cooling systems

1. SYSTEMY CHŁODZENIA CIECZOWEGO

Systemy chłodzenia cieczowego, w porównaniu z systemami powietrznymi, charakteryzują się mniejszymi wymiarami, cichszą pracą, większą wydajnością cieplną, co przekłada się bezpośrednio na możliwość zapewnienia niższej temperatury pracy elementów elektronicznych, a w konsekwencji oznacza dużą poprawę niezawodności całego systemu. Rozwiązania oparte na chłodzeniu cieczą ogólnie można podzielić na:

- systemy wymuszone i swobodne w zależności od mechanizmów wymuszających ruch płynu;
- systemy jedno- i dwufazowe w zależności od obecności zjawisk przemiany fazowej;
- systemy bezpośrednie i pośrednie w zależności od istnienia bezpośredniego kontaktu elementów elektronicznych z cieczą chłodzącą lub jego braku.

Różnica pomiędzy cieczowymi systemami chłodzenia bezpośredniego i pośredniego została schematycznie zilustrowana na rysunku 4. W pierwszym, znacznie rzadziej stosowanym przypadku, pokazanym na rysunku 4a), elementy elektroniczne zanurzone są w medium chłodzącym, a ciepło jest przekazywane bezpośrednio cieczy w ramach konwekcji naturalnej lub wymuszonej, której może towarzyszyć przemiana fazowa. W drugim przypadku, przedstawionym na rysunku 4b), ciecz nie ma bezpośredniego kontaktu z chłodzonym elementem, lecz przepływa przez element układu chłodzenia, taki jak radiator wodny bądź płyta chłodząca, który styka się z obudową przyrządu lub układu elektronicznego.



Rys. 4. System chłodzenia cieczowego: a) bezpośredniego, b) pośredniego

Fig. 4. Liquid cooling systems: a) direct, b) indirect

Ważnym elementem każdego systemu chłodzenia cieczowego, w szczególności chłodzenia bezpośredniego, jest dobór odpowiedniego medium chłodzącego. W tym przypadku istotne są nie tylko parametry termiczne użytej cieczy, ale także jej parametry elektryczne oraz chemiczne. Podstawowe parametry najczęściej stosowanych cieczy, w tym wody oraz fluorowych cieczy organicznych – fluorinerów firmy 3M, zestawiono w tabeli 1 i porównano z właściwościami powietrza [5, 13].

Tabela 1. Właściwości wybranych cieczy chłodzących i powietrza [5, 13]**Table 1.** Properties of air and chosen cooling liquids [5, 13]

Właściwości	FC-72	FC-84	FC-77	Woda	Powietrze
Punkt wrzenia [°C]	52	83	100	100	–
Gęstość [kg/m ³]	1592	1575	1590	958	1,18
Ciepło właściwe [J/kg·K]	1088	1130	1172	4184	1010
Pojemność cieplna 1 dm ³ [Ws/K]	1732	1780	1863	4008	1
Przewodność cieplna [W/mK]	0,0545	0,0535	0,0570	0,683	0,026
Stała dielektryczna	1,72	1,71	1,75	78,00	1,00

Z grupy przedstawionych płynów najlepszymi parametrami cieplnymi charakteryzuje się woda. Niestety, jej wysoka stratność w połączeniu z agresywnością chemiczną w stosunku do niektórych materiałów wykorzystywanych w elektronice eliminuje ją z pewnych zastosowań, szczególnie w rozwiązaniach chłodzenia bezpośredniego. W tych zastosowaniach niezastąpione są płyny dielektryczne obojętne chemicznie, których przykładem są właśnie fluorinerty.

1.1. Klasyczne systemy chłodzenia pośredniego

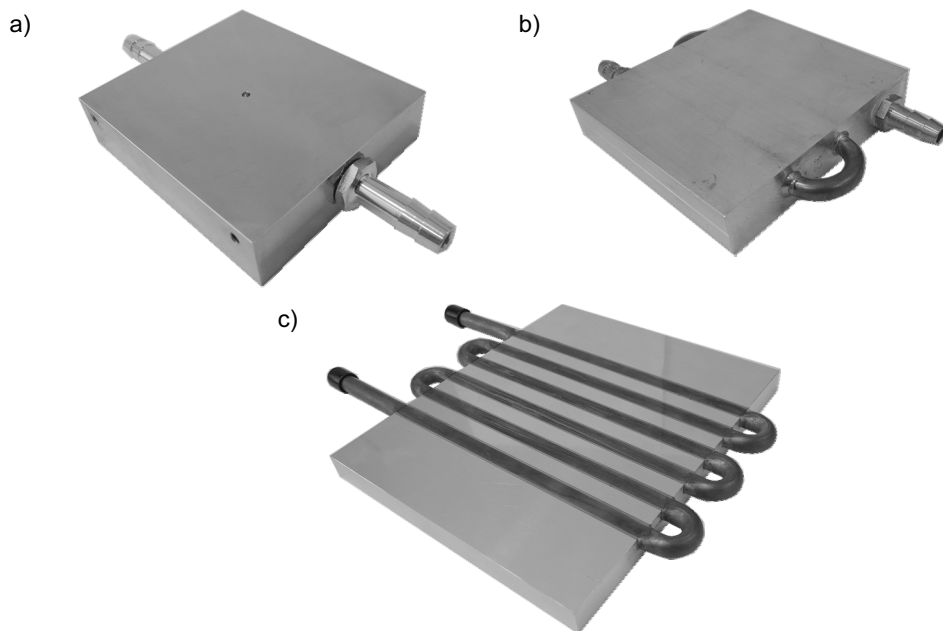
Systemy wymuszonego chłodzenia cieczowego pośredniego zostały po raz pierwszy wprowadzone do zastosowań energoelektronicznych w latach pięćdziesiątych XX wieku. Jako element, przez który przepływa ciecz chłodząca, wykorzystywano radiatory wodne, które najczęściej miały postać metalowego walca z pojedynczą komorą cieczową i były przeznaczone do odprowadzania ciepła z pojedynczego przyrządu półprzewodnikowego mocy w obudowie pastylkowej. Ich kształt predysponował je do naprzemiennego mocowania z przyrządami półprzewodnikowymi, co z jednej strony zapewniało każdemu przyrządowi chłodzenie dwustronne, z drugiej zaś pozwalało na utworzenie jednego wspólnego układu obiegu wody dla całej grupy chłodzonych przyrządów. Te cechy, jak również inne zalety cieczowych systemów, zaowocowały szeroką akceptacją tego typu rozwiązań w obszarach zastosowań energoelektronicznych. Radiatory wodne ewoluowały do rozwiązań bardziej uniwersalnych, jakimi są płyty chłodzące (ang. *cold plate* lub *cool plate*), oferowane w różnych rozmiarach i przystosowane do zapewniania bezpiecznej temperatury pracy całym układom, takim jak inteligentne moduły mocy IPM (*Intelligent Power Module*) zawierające np. tranzystory IGBT.

Najczęściej oferowane płyty chłodzące mają kształt aluminiowego lub miedzianego bloku prostokątnego, w którym wykonane zostały kanały, przez które przepływa ciecz chłodząca. Płyty mogą znacznie różnić się między sobą wymiarami, wykonaniem, sposobami połączenia kanałów oraz ich liczbą. W bardziej złożonych rozwiązaniach kanały wykonane są oddzielnie w postaci rurek miedzianych, rzadziej stalowych, osadzonych w otworach wyłobionych w bloku aluminiowym.

Przykładowe rozwiązania oferowane przez firmy Dau oraz Austerlitz Electronic pokazano na rysunku 5. W klasycznych rozwiązaniach liczba kanałów waha się od dwóch do sześciu, w zależności od wymiarów płyty oraz wymiarów i wymagań chłodzonego elementu elektronicznego.

Bardzo ciekawym rozwiązaniem, oferowanym w różnych konfiguracjach przez czołowych producentów płyt chłodzących, są płyty o dużej powierzchni wewnętrznej, których konstrukcja przewiduje zwiększenie powierzchni kontaktu płyty z cieczą chłodzącą dzięki zastosowaniu dodatkowo odpowiednio ukształtowanego ożebrowania wypełniającego wnętrze płaskiego kanału o przekroju prostokątnym.

Przewagę tych rozwiązań nad klasycznymi ilustruje tabela 2, w której zestawiono parametry wybranych płyt chłodzących trzech czołowych producentów [1, 7, 10]. Nowe rozwiązania ze względu na swoją konstrukcję nie mają podanej liczby kanałów i zostały wyróżnione kursywą. W celu ułatwienia porównania w tabeli prócz rezystancji cieplnych R_{th} podano również odpowiadające im wartości rezystywności cieplnej r_{th} obliczone na podstawie wielkości powierzchni, na której można zamontować chłodzony element elektroniczny A oraz maksymalny spadek ciśnienia na płycie chłodzącej p_{max} .



Rys. 5. Przykładowe elementy układu chłodzenia ciekowego pośredniego:
a) radiator wodny KWK 100 firmy Dau, b) aluminiowa płyta chłodząca z miedzianymi rurkami firmy Austerlitz Electronic,
c) aluminiowa płyta chłodząca Hi-contact firmy Aavid

Fig. 5. Examples of indirect liquid cooling elements:
a) water heat sink KWK 100 of Dau Company, b) aluminium cold plate with embedded copper pipes of Austerlitz Electronic,
c) aluminium Hi-contact cold plate of Aavid Company

Tabela 2. Parametry cieplne płyt chłodzących [3, 9–11]**Table 2.** Cold plates thermal parameters [3, 9–11]

Producent		Liczba kanałów	R_{th} [K/W]	A [cm ²]	r_{th} [Kcm ² /W]	p_{max} [bar]
Lytron	C10-6"	2	0,0560	131	7,35	0,2
	C15-6"	6	0,0180	141	2,54	0,5
	C20		0,0350	29	1,02	0,3
	C25		0,0200	34	0,68	0,9
	C30-thin		0,0020	161	0,32	3,5
Dau	KW140	4	0,0130	182	2,37	0,8
	KW140-T	4	0,0090	182	1,64	2
	UW140		0,0045	174	0,78	7
AAVID	Turbo fin		0,0015	245	0,37	1,1
	Turbo flow		0,0028	245	0,69	0,5
	Hi-Contact – 2pass	2	0,0150	32	0,48	0,6
	Hi Contact – 4pass	4	0,0125	193	2,41	1,4

Rozwiązania o dużej powierzchni wewnętrznej, takie jak płyta C30-thin firmy Lytron czy Turbo Fin oferowana przez Aavid, charakteryzują się zdecydowanie najniższą rezystywnością cieplną, jednakże również najwyższymi wartościami spadków ciśnienia p_{max} .

Tabela 2 zawiera także parametry bardzo cienkiej płyty UW140 o grubości 6 mm, która jeszcze niedawno miała za zadanie zrewolucjonizować rynek cieczowych systemów chłodzących do zastosowań w energoelektronice [15]. Niestety, jej atuty, takie jak niska rezystancja i rezystywność cieplna oraz niewielka waga, zostały najprawdopodobniej zniwelowane kosztownością rozwiązania wynikającą z bardzo wysokich spadków ciśnienia sięgających 7 barów. Aktualnie płyta ta nie znajduje się już w ofercie firmy Dau [7].

Systemy wymuszonego chłodzenia cieczowego ze względu na dużą efektywność odprowadzania ciepła, niewielkie wymiary oraz niski poziom hałasu oprócz zastosowań energoelektronicznych zostały już szeroko zaakceptowane w innych obszarach zastosowań elektroniki, wśród których wyróżnić należy przemysł komputerowy. Aktualnie dostępnych jest wiele różnych ofert całych układów i pojedynczych bloków wodnych do chłodzenia procesorów, procesorów graficznych, układów scalonych pamięci, chipsetów czy też dysków twardych komputerów stacjonarnych oraz rozwiązań serwerowych. Często oferowane są one w postaci kompletnego układu chłodzącego, w którego skład wchodzi: pompa, zbiornik wyrównawczy, wymienniki ciepła oraz blok lub bloki zapewniające bezpieczną temperaturę pracy odpowiednich komponentów komputerowych.

Przykład takiego systemu chłodzącego oferowanego przez firmę CoolIT Systems z pojedynczym blokiem wodnym dla procesora głównego pokazano na rysunku 6. System ten zawiera wymiennik ciepła zintegrowany z pompą, czujnikami temperatury oraz systemem mikroprocesorowym kontrolującym i sterującym pracą układu chłodzącego.



Rys. 6. Zamknięty system chłodzenia cieczowego Domino ACL firmy CoolIT Systems

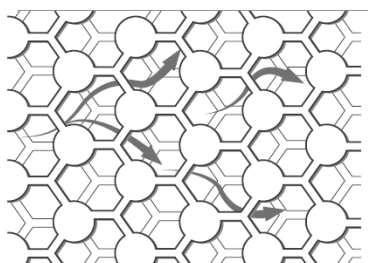
Fig. 6. Closed loop liquid cooling system Domino ACL of CoolIT

Rozwiązania bazujące na systemach jednofazowego chłodzenia cieczowego doczekały się również zastosowań w systemach przenośnych. Pierwszy laptop, Flora 270W Silent Model z wodnym układem chłodzącym zawierającym blok chłodzący procesora, został wprowadzony na rynek w 2002 roku przez firmę Hitachi. Ciekawostką w tym produkcie był wymiennik ciepła wmontowany w obudowę wyświetlacza LCD, niezawierający wentylatora, co przekładało się na prawie bezgłośną pracę komputera [11]. Obecnie firma Asetek na podstawie swojej najnowszej technologii opracowała system chłodzenia cieczowego dla notebooka Alienware M18x, zawierający trzy bloki chłodzące zamontowane na procesorze głównym i procesorach graficznych pozwalające zwiększyć częstotliwość taktowania układów scalonych i uzyskując w testach 23% wzrost wydajności [3].

1.2. Mikrokanałowe systemy chłodzenia pośredniego

Analiza nowo pojawiających się rozwiązań układów chłodzenia cieczowego pozwala zaobserwować wyraźną tendencję w rozwoju tego typu systemów idącą w kierunku zmniejszania wymiaru charakterystycznego pojedynczego kanału oraz gęstszego upakowywania większej liczby mniejszych kanałów, czyli rozwój w kierunku rozwiązań mikrokanałowych. Prekursorami struktur chłodzących zawierających kanały o wymiarze charakterystycznym nieprzekraczającym 1 mm są Tuckerman i Pease. W 1981 roku opublikowali oni wyniki swoich prac teoretyczno-eksperymentalnych poświęconych zastosowaniu sieci niewielkich kanałów o przekroju prostokątnym, wykonanych w spodniej warstwie podłoża układu scalonego, wykorzystanych do odprowadzenia ciepła z tego układu [14]. Uzyskane przez nich wyniki pokazały bardzo duży potencjał tkwiący w rozwiązaniach mikrokanałowych i zapoczątkowały liczne prace nad tego typu rozwiązaniami. Objęły one zarówno systemy jedno-, jak i dwufazowe, choć warto podkreślić, że jedynie te pierwsze osiągnęły na tyle dużą dojrzałość, iż pojawia się coraz więcej ich praktycznych zastosowań.

Pierwsze komercyjne mikrokanalowe układy chłodzące znalazły zastosowanie najpierw w dziedzinie energoelektroniki, w szczególności w modułach mocy [6, 17], a następnie w obszarze układów scalonych, zwłaszcza mikroprocesorów i procesorów graficznych [6, 16, 17, 19]. Pierwsze komercyjne mikrokanalowe struktury chłodzące zaoferowała firma Curamik. Płyty 3D MCI (*Micro Channel Integrated Cooler*) zbudowane są z 5 do 11 miedzianych warstw o strukturze plastra miodu, poukładanych naprzemiennie i połączonych ze sobą w technologii DCB (*Direct Copper Bonding*). W efekcie powstaje przestrzenna sieć mikrokanalów pokazana schematycznie na rysunku 7. Zaletą tego rozwiązania, a dokładniej technologii wytwarzania, jest możliwość łatwej integracji miedzianej mikrostruktury chłodzącej z podłożami DCB wykonanymi z wykorzystaniem ceramiki AlN lub Al₂O₃.



Rys. 7. Przykład przestrzennej struktury sieci mikrokanalów w płytach 3D MCI firmy Curamik [6]

Fig. 7. Example of 3D structure of microchannels formed in Curamik 3D MCI cold plates [6]

Przykładowe parametry testowych płyt 3D MCI w rozwiązaniach dla modułów mocy zostały zestawione w tabeli 3 [6]. Ze względu na częstą integrację rozwiązań mikrokanalowych z elementami elektronicznymi, podanym parametrem cieplnym dla wybranych produktów jest rezystywność cieplna złącze-ciecz wlotowa, oznaczone jako $r_{th,JA}$, a nie jak poprzednio – rezystywność cieplna samej płyty chłodzącej.

Tabela 3. Parametry komercyjnych mikrokanalowych struktur chłodzących

Table 3. Parameters of commercially available microchannel cooling structures

Firma	Materiał	$r_{th,JA}$ [Kcm ² /W]	Przepływ [l/min]	p_{max} [bar]	Zastosowanie
3D MCI (Curamik)	Cu	0,15	6	1,5	moduły IGBT integracja z DCB
	Cu	0,18	2,5	0,4	moduły IGBT integracja z DCB
NCP (Mikros Technologies)	Cu	0,19	0,3 ^(*)	0,2	moduły IGBT
MDT (Wolverin MicroCool)	Cu	0,21	1,6	0,7	CPU
	Cu	0,27	4,6	0,1	moduł IGBT
Mikrostruktura (Cooligy)	Si	0,31	1,2	Brak	CPU

(*) Przepływ dla płyt NCP firmy Mikros Technologies podany jest w (l/min)/cm².

Kolejną firmą oferującą układy chłodzenia mikrokanalowego jest firma Cooligy. Została ona założona w 2002 roku przez zespół z Uniwersytetu Stanford, który opracował system chłodzący oparty na krzemowej strukturze mikrokanalowej bazującej na pionierskiej koncepcji Tuckermana i Pease'a oraz pompę elektroosmotyczną przeznaczoną do chłodzenia procesorów w komputerach osobistych ze szczególnym uwzględnieniem komputerów przenośnych. Obecnie jest to jedyny producent oferujący układy chłodzące przeznaczone do bezpośredniej integracji ze strukturami krzemowymi, jednakże ich zakres zastosowań ogranicza się głównie do rozwiązań dla nowoczesnych procesorów graficznych, układów ASIC oraz układów programowalnych.

Przykładowe rozwiązanie opracowane i przebadane przez Cooligy, oznaczone jako mikrostruktura – Cooligy, zostało przedstawione i porównane w tabeli 3 [8, 16].

Układy chłodzące bazujące na koncepcji mikrokanalów na potrzeby energoelektroniki oraz mikroelektroniki oferują również firmy Mikros Technologies oraz Wolverine MicroCool. Nowością w płytach NCP (*Normal Flow Cold Plate*), produktach pierwszej z wymienionych firm, jest ukierunkowanie przepływu w kierunku normalnym do chłodzonej powierzchni, dzięki czemu rozwiązanie to korzysta z zalet chłodzenia uderzeniowego (ang. *jet impingement*), choć ze względu na niższą prędkość przepływu cieczy w kanałach charakteryzuje się również znacząco niższymi wartościami spadku ciśnienia. Wartości $r_{th JA}$ poniżej $0,15 \text{ Kcm}^2/\text{W}$ są również w zasięgu możliwości rozwiązań NCP, przy czym należy podkreślić, że wysoka wydajność odprowadzania ciepła jest bezpośrednio związana z integracją z podłożami modułów mocy oraz z implementacją chłodzenia dwustronnego.

Mikros Technologies deklaruje również możliwość użycia swoich produktów do chłodzenia modułów z tranzystorami IGBT z wykorzystaniem tzw. cieczy gorącej o temperaturze wlotowej rzędu 85°C . Otrzymana dla takich warunków rezystywność cieplna wynosi $0,32 \text{ Kcm}^2/\text{W}$ [17]. Z kolei drugi z producentów Wolverine MicroCool postawił w swych rozwiązaniach na prostotę konstrukcji oraz niski koszt opracowanej i opatentowanej technologii mikrodeformacji – MDT (ang. *Micro-Deformation Technology*), polegającej na ścinaniu warstw materiału z powierzchni tak, aby uformować sieć równoległych mikrokanalów [19]. Dane zestawione w tabeli 3 pokazują, że rozwiązania Wolverine MicroCool oferują parametry cieplne i przepływowe porównywalne z produktami konkurencji, aczkolwiek pokonują je prostotą wykonania, która przekłada się na cenę oraz niezawodność. W efekcie firma Wolverine nawiązała współpracę z takimi firmami jak CoolIT Systems czy IBM, które wykorzystując ich technologie wykonywania mikrokanalów, opracowują układy chłodzące na potrzeby przemysłu komputerowego [19, 20].

Szczególnie ciekawym pomysłem na zastosowanie chłodzenia mikrokanalowego jest opracowany przez szwajcarski instytut ETH Zurich we współpracy z firmą IBM superkomputer Aquasar. Aquasar jest zbudowany z trzech serwerów IBM BladeCenter, z których dwa są chłodzone z wykorzystaniem układu cieczo-wego, zapewniającego temperaturę rdzeni procesorów na poziomie 85°C przy

zastosowaniu medium chłodzącego o temperaturze 60°C. Superkomputer posiada moc obliczeniową 6 teraflopsów przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia energii o 40%. Aquasar stanowi pierwszy etap w realizacji projektu badawczego, mającego na celu budowę centrum obliczeniowego neutralnego dla środowiska, czyli takiego, które charakteryzowałoby się zerową emisją CO₂ [20].

Porównując parametry rozwiązań mikrokanałowych oraz systemów klasycznych zestawionych odpowiednio w tabelach 2 i 3, można stwierdzić, że te pierwsze charakteryzują się znacząco efektywniejszym odbiorem ciepła z elementów elektronicznych. Obserwowane są niższe wartości rezystywności cieplnej, mimo że porównuje się dwa różne parametry. W przypadku struktur mikrokanałowych wartość r_{th} w tabeli 3 wyznaczano w stosunku do temperatury złącza, a w przypadku rozwiązań klasycznych (tab. 2) – w stosunku do maksymalnej temperatury na powierzchni elementu układu chłodzenia. Jednocześnie warto podkreślić, że zastosowanie rozwiązań o większej powierzchni wewnętrznej wiąże się z wyższymi stratami ciśnienia, szczególnie w przypadku rozwiązań, wymagających odprowadzania ciepła z dużych obszarów, na których zamontowane są układy elektroniczne. Pokazują to dane zestawione w tabeli 2.

PODSUMOWANIE

Rozwój współczesnej elektroniki, charakteryzujący się ciągłym wzrostem skali integracji i miniaturyzacji, stawia coraz to większe wymagania systemom chłodzenia, których zadaniem jest zapewnienie bezpiecznych warunków pracy przyrządów i układów elektronicznych. Coraz częściej okazuje się, że systemy chłodzenia powietrznego pomimo niskiego kosztu, dużego asortymentu oraz braku konieczności przeprowadzania częstych konserwacji, ze względów termicznych należy zastąpić rozwiązaniami bazującymi na cieczy jako medium chłodzącym.

Niniejszy artykuł poświęcony jest systemom chłodzenia cieczowego wymuszonego bez uwzględnienia systemów z przemianą fazową. Przedstawiono i porównano w nim zarówno rozwiązania klasyczne w postaci radiatorów wodnych i płyt chłodzących, jak i coraz częściej pojawiające się na rynku mikrokanałowe struktury chłodzące. Wyraźnie można zaobserwować kierunek rozwoju jednofazowych systemów chłodzenia cieczowego, kładący główny nacisk na zmniejszenie wymiaru charakterystycznego kanału, w którym płynie ciecz, zwiększenie powierzchni kontaktu elementu chłodzącego z medium chłodzącym oraz doprowadzenie strumienia cieczy jak najbliżej źródła wydzielania ciepła.

Praca częściowo finansowana ze środków na naukę w latach 2011–2014 jako projekt badawczy nr UMO-2011/01/B/ST7/06740.

LITERATURA

1. Aavid Thermalloy, www.aavid.com [dostęp 07.2012].
2. Agostini B. i in., *State of the art of high heat flux cooling technologies*, Heat Transfer Engineering, Vol. 28, 2007, No. 4, s. 258–281.
3. *Asetek Demonstrates Liquid Cooling For Laptop And All-In-One PCs*, serwis internetowy Asetek, Press Room, marzec 2012 [dostęp 05.2012].
4. Azar K., *The History of Power Dissipation, Electronics Cooling*, Vol. 6, 2000, No. 1.
5. Bergles A.E., Bar-Cohen A., *Immersion Cooling of Digital Computers*, Cooling of Electronic Systems, 1994, s. 539–621.
6. Curamik Electronics GmbH, www.curamik.com [dostęp 07.2012].
7. Dau Ges.m.b.H & CO.KG, www.dau-at.com [dostęp 07.2012].
8. Goodson K. i in., *Electroosmotic Cooling System for Microprocessors*, Electronics Cooling, Vol. 8, 2002, No. 4.
9. Lamina S.A., www.lamina.com.pl [dostęp 07.2012].
10. Lytron, <http://www.lytron.com> [dostęp 07.2012].
11. Miyake K., *Hitachi Show Off Cool New Notebook*, PC World, lipiec 2002.
12. Raj E., *Mikrokanalowe chłodzenie cieczowe w zintegrowanych systemach elektronicznych*, rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 2004.
13. Simons R.E., *Direct Liquid Immersion for High Power Density Microelectronics*, Electronics Cooling, Vol. 2, 1996, No. 2.
14. Tuckerman D.B., Pease R.F., *High Performance Heat Sinking for VLSI*, IEEE Electron Device Letters, Vol. EDL-2, 1981, s. 126–129.
15. *Ultra High Performance Liquid Cold Plates*, katalog firmy Dau, Components Ltd., Bognor Regis, England, 2004.
16. Upadhya G., *Cooligy Active Micro-Structure Cooling Offers Key to Advanced Processor Performance and Quieter Systems, White Paper*, www.cooligy.com [dostęp 07.2012].
17. Valenzuela J.V., *Advanced Thermal Management of Power Electronics, Mikros NCP Overview*, www.mikrostechnologies.com [dostęp 07.2012].
18. Wilson J., Simons R.E., *Advances in High-Performance Cooling for Electronics*, Electronics Cooling, listopad 2005.
19. Wolverine Tube Inc., MicroCool Division, www.microcooling.com [dostęp 07.2012].
20. *Zero-emission datacenter, IBM Research Zurich*, <http://www.zurich.ibm.com> [dostęp 07.2012].

SINGLE-PHASE LIQUID COOLING SYSTEM FOR ELECTRONICS APPLICATIONS

Summary

The paper is a review of commercially available forced liquid cooling systems for different electronics applications starting from the power electronics up to the microelectronics. It shows and compares the classic solutions such as water heat sinks and cold plates as well as the microchannel cooling structures. The latest ones are being introduced more and more often and likely to the market due to their very promising parameters.